

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Science et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique
Thème

Analyse tridimensionnelle d'un capteur solaire plan muni d'ailettes décalées

Présenté Par :

1) Melle. ZENASNI Malek

Devant le jury composé de :

Pr. BELHAMIANI Mohamed	Prof UAT.B. B (Ain Temouchent)	Président
Pr. BENZENINE Hamidou	Prof UAT.B. B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. DORBANE Abdelhakim	Dr UAT.B. B (Ain Temouchent)	Examineur

Année Universitaire 2025/2026

Remerciement

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la force et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadrant, **Monsieur le Professeur Hamidou BENZENINE**, pour son accompagnement tout au long de ce projet de fin d'études. Sa disponibilité, ses précieux conseils, son expertise scientifique et ses orientations méthodologiques ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury, **Monsieur le Professeur BELHAMIANI Mohamed**, Président du jury, pour l'honneur qu'il me fait en présidant cette soutenance, ainsi que **Monsieur DORBANE Abdelhakim**, Examineur, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Je leur suis reconnaissante pour le temps consacré à son évaluation ainsi que pour leurs remarques constructives et leurs précieux conseils.

J'adresse également mes sincères remerciements à **Madame CHERIET Rahmouna** pour son soutien, ses encouragements et sa disponibilité.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail par leur soutien, leurs conseils ou leurs encouragements.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers grands-parents,

Qu'Allah leur fasse miséricorde.

Avec une profonde émotion et une immense reconnaissance. Votre amour, votre sagesse, vos valeurs et vos prières continuent d'éclairer mon chemin et de m'accompagner à chaque étape de ma vie. Puisse

Allah vous accorder la plus haute place au Paradis.

À mon cher Papa,

Avec toute ma gratitude et mon profond respect. Vous avez toujours été mon pilier, ma force dans les moments difficiles et un exemple de courage, de patience et de persévérance. Vos sacrifices ont largement contribué à la réalisation de ce parcours.

À ma tendre Maman,

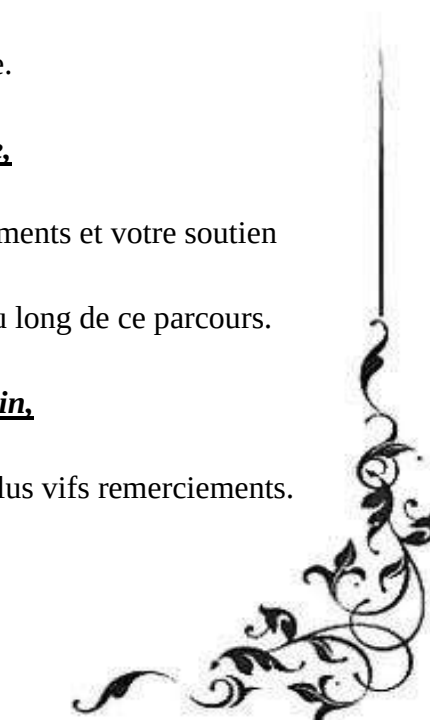
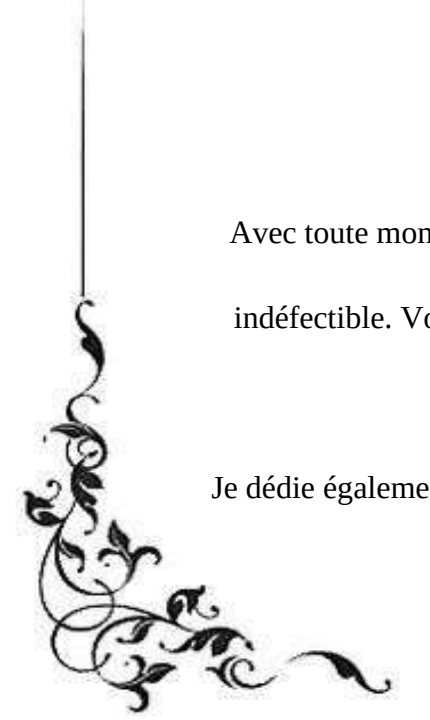
Vous êtes la lumière de ma vie et ma plus grande source de force. Votre amour inconditionnel, vos prières, votre soutien et votre confiance en moi m'ont permis d'avancer malgré les difficultés. Aucun mot ne pourra exprimer toute ma reconnaissance.

À mes chers frères, Ayoub, Safwane et Amrane,

Avec toute mon affection. Merci pour votre présence, vos encouragements et votre soutien indéfectible. Vous avez toujours été une source de motivation tout au long de ce parcours.

À tous ceux qui m'ont soutenue, de près ou de loin,

Je dédie également ce travail avec ma sincère reconnaissance et mes plus vifs remerciements.





Résumé



Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié numériquement le comportement thermique et dynamique de l'écoulement d'air en convection forcée à l'intérieur d'un capteur solaire plan muni d'ailettes décalées rectangulaires. Les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par le code de calcul ANSYS Fluent, basé sur la méthode des volumes finis. Le modèle de turbulence k- ϵ est utilisé pour modéliser la turbulence.

Cette étude examine l'influence du nombre d'ailettes (0, 3 et 6 ailettes) ainsi que l'effet de leur hauteur (0,02 m, 0,05 m et 0,08 m) sur les performances thermo-hydrauliques du capteur, pour différentes valeurs de débit massique (0,02 à 0,06 kg/s). L'évaluation des performances est réalisée à travers le critère thermo-hydraulique qui intègre simultanément le transfert thermique et les pertes de charge.

Mots clés : Capteur solaire plan, ailettes décalées, ANSYS Fluent, transfert thermique.

Abstract

In this work, we numerically investigated the thermal and dynamic behavior of forced convection airflow inside a flat plate solar collector equipped with staggered rectangular fins. The continuity, momentum and energy equations are solved using the ANSYS Fluent code, based on the finite volume method. The k- ϵ turbulence model is used to simulate turbulence.

This study examines the influence of fin number (0, 3 and 6 fins) and fin height (0.02 m, 0.05 m and 0.08 m) on the thermo-hydraulic performance of the collector, for different mass flow rates (0.02 to 0.06 kg/s). Performance is evaluated using the thermo-hydraulic criterion, which simultaneously accounts for heat transfer enhancement and pressure drop penalty."

Keywords: Flat plate solar collector, staggered fins, ANSYS Fluent, heat transfer.

ملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة عددية للسلوك الحراري والديناميكي لتدفق الهواء بالحمل الحراري القسري داخل مجمّع شمسي مسطح مزوّد بزعانف مستطيلة متناوبة. تم حل معادلات الاستمرارية والزخم والطاقة باستخدام برنامج ANSYS Fluent المبني على طريقة الأحجام المحدودة، مع توظيف نموذج الاضطراب k- ϵ لمحاكاة الجريان المضطرب.

تدرس هذه الدراسة تأثير عدد الزعانف (0، 3 و 6 زعانف) وارتفاعها (0,02م، 0,05م و 0,08م) على الأداء الحراري والهيدروليكي للمجمّع، لقيم مختلفة من التدفق الكتلي (0,02 إلى 0,06 كغ/ث). يُقيّم الأداء من خلال المعيار الحراري-الهيدروليكي، الذي يأخذ بعين الاعتبار تحسين انتقال الحرارة وهبوط الضغط في آن واحد.

الكلمات المفتاحية: مجمّع شمسي مسطح، زعانف متناوبة، انتقال الحرارة.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires

Figure I-1 : Schéma de production d'électricité par l'énergie géothermique	5
Figure I-2 : Schéma de production d'électricité par l'éolienne	5
Figure I-3 : L'énergie solaire	6
Figure I-4 : Les principales technologies de conversion de l'énergie solaire	6
Figure I-5 : Production d'électricité par les panneaux solaires photovoltaïques	7
Figure I-6 : Types de technologies photovoltaïques	8
Figure I-7 : Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire thermique	8
Figure I-8 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	10
Figure I-9 : Les différents composants d'un capteur solaire plan.....	10
Figure I-10 : Différents modèles, types et matériaux des absorbeurs	11
Figure I-11 : La couverture transparente d'un capteur solaire plan.....	11
Figure I-12 : Schéma d'un capteur solaire plan complet avec son isolant en face-arrière	12
Figure I-13 : Capteur plan vitré à eau.....	14
Figure I-14 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan à air	15
Figure I-15 : Vue d'un capteur solaire non-vitré	16
Figure I-16 : Description d'un capteur solaire non-vitré	16
Figure I-17 : Capteur à tube sous vide.....	16
Figure I-18 : Schéma de principe d'un système solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire	18
Figure I-19 : Système de chauffage solaire d'un bâtiment par plancher chauffant solaire.....	18
Figure I-20 : Schéma de principe d'un système de chauffage de piscine par capteurs solaires plans.....	19
Figure I-21 : Principe de séchage agricole solaire.....	19

Chapitre II : État de l'art des capteurs solaires plans

Figure II-1 : Capteur solaire plan avec des ailettes dans le conduit.....	23
Figure II-2 : Schéma de la plaque absorbante fixée par ailettes.....	23

Liste des figures

Figure II-3 : (a) Schéma tridimensionnel (3D) du capteur solaire à air, (b) Cas A, (c) Cas B, (d) Cas C, (e) Cas D, et (f) Schéma 3D du déflecteur (baffle) avec les paramètres géométriques.....	24
Figure II-4 : Configuration des ailettes sur l'absorbeur	25
Figure II-5 : Caractéristiques géométriques de chicane longitudinales	25
Figure II-6 : Géométrie des nervures combinées V-down multi-espacées avec nervures décalées	26
Figure II-7 : Visualisation d'un capteur solaire à air avec des ailettes perforées	27
Figure II-8: Vue en plan et vue en coupe latérale du bassin surélevé muni d'ailettes.....	27
Figure II-9: Vue schématique du capteur solaire à air avec ailette décalée fixée	28
Figure II-10: Arrangement d'ailettes (non perforées) sur plaque absorbante.....	29
Figure II-11 : Arrangement d'ailettes (perforées) sur plaque absorbante.....	29
Figure II-12: Géométrie des chicanes en V perforées de formes (circulaire hexagonale, carrée, rectangulaire et triangulaire).....	30
Figure II-13 : Capteur solaire plat muni d'ailettes en forme d'aile	30
Figure II-14: Capteur solaire à air muni d'un absorbeur à ailettes ondulées	31
Figure II-15: (a) structure des ailettes semi-stadium creuse (HSSF), (b) aperçu du FPSAC ajouté avec HSSF et des déflecteurs au niveau de la plaque absorbante.....	31

Chapitre III : Modélisation mathématique et simulation numérique du problème physique

Figure III-1 : Domaine physique du capteur solaire plan étudié.....	33
Figure III-2: Schéma des ailettes utilisées dans le capteur solaire.....	34
Figure III-3: Discrétisation en volumes finis dans le cas monodimensionnel	40
Figure III-4: Description bidimensionnelle d'un volume fini	41
Figure III-5: Les étapes de la méthode des volumes finis.....	41
Figure III-6: Interface de logiciel ANSYS Workbench.	42
Figure III-7: Vue globale du maillage du capteur solaire plan.	45
Figure III-8 : Zoom sur le maillage au niveau des ailettes décalées.	45
Figure III-9 : Zoom sur le maillage des ailettes décalées	46
Figure III-10 : Fenêtre de démarrage FLUENT.....	46
Figure III-11: Évolution des résidus en fonction du nombre d'itérations.	49

Chapitre IV : Résultats et Interprétation

Figure IV-1: Évolution de la température de sortie en fonction du flux d'irradiation solaire : comparaison avec les résultats de Boudjema et al.....	52
Figure IV-2 : Contours de température pour les trois configurations du capteur solaire (Cas 01 : sans ailettes, Cas 02 : 3 ailettes décalées et Cas 03 : 6 ailettes décalées).....	54
Figure IV-3 : Contours de pression pour les trois configurations du capteur solaire (cas 01 : sans ailettes, Cas 02 : 3 ailettes décalées et Cas 03 : 6 ailettes décalées).....	56
Figure IV-4 : Évolution de la température de sortie en fonction du débit massique pour les trois configurations (Cas 01 : sans ailettes, Cas 02 : 3 ailettes décalées et Cas 03 : 6 ailettes décalées).	57
Figure IV-5 : Comparaison de la température de sortie pour les trois configurations (Cas 01 : sans ailettes, Cas 02 : 3 ailettes décalées et Cas 03 : 6 ailettes décalées) à débit massique fixe ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$).	58
Figure IV-6: Comparaison de la perte de charge pour les pour les trois configurations (Cas 01 : sans ailettes, Cas 02 : 3 ailettes décalées et Cas 03 : 6 ailettes décalées) à débit massique fixe ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$).	59
Figure IV-7 : Comparaison du critère PEC pour les trois configurations (Cas 01 : sans ailettes, Cas 02 : 3 ailettes décalées, Cas 03 : 6 ailettes décalées) aux trois débits massiques étudiés..	60
Figure IV-8 : Contours de température pour les trois hauteurs d'ailettes ($H1 = 0,02 \text{ m}$, $H2 = 0,05 \text{ m}$, $H3 = 0,08 \text{ m}$).	62
Figure Iv-9 : Contours de pression statique pour les trois hauteurs d'ailettes ($H1 = 0,02 \text{ m}$, $H2 = 0,05 \text{ m}$, $H3 = 0,08 \text{ m}$).	63
Figure IV-10 : Évolution de la température de sortie en fonction du débit massique pour les trois configurations ($H1 = 0,02 \text{ m}$, $H2 = 0,05 \text{ m}$, $H3 = 0,08 \text{ m}$).	64
Figure IV-11 : Comparaison de la température de sortie pour les trois hauteurs d'ailettes à débit massique fixe ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$).	65
Figure IV-12: Comparaison des pertes de charge pour les trois hauteurs d'ailettes à débit massique fixe ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$).	66
Figure IV-13 : Comparaison du critère PEC pour les quatre configurations ($H0$: canal lisse, $H1 = 0,02 \text{ m}$, $H2 = 0,05 \text{ m}$, $H3 = 0,08 \text{ m}$) aux trois débits massiques étudiés.....	67

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des capteurs plans vitrés	15
Tableau I-2 : Avantages et inconvénients des capteurs plans non vitrés	16
Tableau I-3 : Avantages et inconvénients des capteurs à tubes sous vide	17

Chapitre III : Modélisation mathématique et simulation numérique du problème physique

Tableau III-1 : Différents cas physiques étudiés.	34
Tableau III-2 : Les caractéristiques géométriques de différents capteurs solaires étudiés	35
Tableau III-3 : Coefficients du modèle de turbulence k- ϵ	38
Tableau III-4 : Configurations géométriques des cas étudiés du capteur solaire plan.	44
Tableau III-5 : Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans la simulation..	47
Tableau III-6 : Récapitulatif des conditions aux limites du domaine de calcul.....	48
Tableau III-7 : Schémas de discrétisation spatiale par FLUENT.	48
Tableau III-8 : Facteurs de sous-relaxation.	49

Nomenclature et abréviations

- Symboles latins :

Symbole	Désignation	Unité
A	Section du passage du fluide	m^2
C_p	La capacité calorifique spécifique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C_{pf}	Capacité calorifique spécifique du fluide	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C_{ps}	Capacité calorifique spécifique du solide	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D_h	Diamètre hydraulique	m
e	Épaisseur des ailettes	m
f	Facteur de friction	—
f_o	Facteur de friction du canal de référence	—
G_k	Terme de production de l'énergie turbulente	$m^2 \cdot s^{-3}$
H	Hauteur des ailettes	m
h	Coefficient de convection thermique	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
k	Énergie cinétique turbulente	$m^2 \cdot s^{-2}$
L	Longueur du capteur / des ailettes	m
$\dot{m}$	Débit massique	$kg \cdot s^{-1}$
Nu	Nombre de Nusselt	—
Nu_o	Nombre de Nusselt du canal de référence	—
P	Pression statique	Pa
$PEC (\eta)$	Performance Evaluation Criterion (critère thermo-hydraulique)	—
$P_{mouillé}$	Périmètre mouillé	m
Q	Flux thermique	W
Re	Nombre de Reynolds	—
S	Espacement des ailettes	m
T	Température	K
T_{in}	Température d'entrée du fluide	K
T_{out}	Température de sortie du fluide	K
t	Temps	s
u, v, w	Composantes de vitesse selon x, y, z	$m \cdot s^{-1}$
u_i	Composante de vitesse dans la direction i	$m \cdot s^{-1}$
x, y, z	Coordonnées cartésiennes	m
ΔP	Perte de charge	Pa

Nomenclatures et abréviations

- Symboles grecs

Symbole	Désignation	Unité
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	m^2/s^3
λ	Conductivité thermique	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
μ	Viscosité dynamique du fluide	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
μt	Viscosité turbulente	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
ρ	Masse volumique	kg/m^3
σk	Nombre de Prandtl turbulent relatif à k	-
$\sigma \varepsilon$	Nombre de Prandtl turbulent relatif à ε	-

- Indices

Indice	Signification
f	Fluide
s	Solide
i,j	Directions cartésiennes
e	Est
w	Ouest
n	Nord
s	Sud
t	Haut (top)
b	Bas (bottom)
P	Nœud principal
E,W,N,S,T,B	Nœuds voisins
0	Canal lisse de référence

- Abréviations :

Abréviation	Signification
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CFD	Computational Fluid Dynamics
PEC	Performance Evaluation Criterion

Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Résumé	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux	VII
Nomenclature et abréviations	VIII
Introduction Générale	1

Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires

I.1 Introduction	4
I.2 Les énergies renouvelables	4
I.2.1 Types d'énergies renouvelables	4
I.2.1.1 L'énergie géothermique	4
I.2.1.2 L'énergie éolienne.....	5
I.2.1.3 L'énergie solaire.....	5
I.2.2 Les principales technologies de conversion de l'énergie solaire	6
I.2.2.1 L'énergie solaire photovoltaïque.....	7
I.2.2.2 L'énergie solaire thermique	8
I.3 Les capteurs solaires plans	9
I.3.1 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan	9
I.3.2 Différents composants du capteur solaire	10
I.3.2.1 L'absorbeur	10
I.3.2.2 La couverture transparente	11
I.3.2.3 L'isolant thermique	11
I.3.2.4 Le fluide caloporteur	12
I.3.2.5 Le coffre	13

Sommaire

I.3.3 Différents types des capteurs solaires thermiques.....	13
I.3.3.1 Capteur plan vitré	14
I.3.3.2 Capteur plan non vitré	15
I.3.3.3 Capteurs à tubes sous vide	16
I.4 Applications des capteurs solaires plans	17
I.4.1 Production d'eau chaude sanitaire	17
I.4.2 Chauffage des bâtiments	18
I.4.3 Chauffage de piscine	19
I.4.4 Séchage agricole solaire	19
I. 5 Conclusion.....	20

Chapitre II : État de l'art des capteurs solaires plans

II.1 Introduction.....	22
II.2 Étude bibliographique.....	22
II.3 Conclusion :	31

Chapitre III : Modélisation mathématique et simulation numérique du problème physique

III. 1 Introduction	33
III.2 Description du domaine d'étude.....	33
III.3 Hypothèses simplificatrices.....	35
III.4 Équations gouvernantes.....	35
III.4.1 Conservation de la masse	36
III.4.2 Conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes)	36
III.4.3 Conservation de l'énergie	36
III. 5 Modèle de turbulence k- ϵ standard.....	36
III.5.1 Équation de transport de l'énergie cinétique turbulente (k).....	37
III.5.2 Équation de transport du taux de dissipation.....	37

Sommaire

III.6 Paramètres caractéristiques	38
III.7 Méthodes de résolution.....	39
III.7.1 Méthode des volumes finis	39
III.7.1.1 Les étapes de la méthode des volumes finis	40
III.8 Principes des codes CFD	41
III.9 Présentation du logiciel ANSYS Workbench.....	42
III.9.1 Les étapes de simulation sous ANSYS Workbench	42
III.9.1.1 Géométrie du modèle	43
III.9.1.2 Maillage du modèle	44
III.9.2 Paramétrage sous ANSYS Fluent.....	46

Chapitre IV : Résultats et Interprétation

IV.1 Introduction	52
IV.2 Validation du modèle numérique	52
IV.3 Effet de nombre des ailettes	53
IV.3.1 Contours de température	53
IV.3.2 Contours de pression	55
IV.3.3 Influence du débit massique sur la température de sortie	56
IV.3.4 Comparaison des configurations	57
IV.3.5 Validation de la configuration optimale par le critère PEC	59
IV.4 Effet de la hauteur des ailettes.....	61
IV.4.1 Contours de température	61
IV.4.2 Contours de pression	62
IV.4.3 Influence du débit massique sur la température de sortie :	64
IV.4.4 Comparaison des configurations :	65
IV.4.5 Validation de la configuration optimale par le critère PEC	67
IV.5 Conclusion :	67
Conclusion Générale	70

Sommaire

Références Bibliographiques.....	72
----------------------------------	----



Introduction Générale



Introduction Générale

L'énergie solaire est l'énergie la plus abondante et la plus propre disponible sur la terre. Face à l'épuisement des ressources fossiles et à l'augmentation de la demande énergétique mondiale, elle représente une alternative stratégique et durable. L'Algérie, grâce à son ensoleillement exceptionnel dépassant 3 000 heures par an [1], dispose d'un potentiel solaire considérable encore largement sous-exploité.

Parmi les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire thermique, le capteur solaire plan est l'un des dispositifs les plus utilisés pour la production de chaleur à basse température, notamment pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire et le séchage industriel.

Cependant, les performances thermiques de ce type de capteur restent limitées en raison de la faible conductivité thermique de l'air et de la résistance convective élevée entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur. Pour améliorer ces performances, l'insertion d'ailettes décalées rectangulaires à l'intérieur du canal d'écoulement constitue une technique passive efficace.

Dans ce travail, on vise à améliorer les performances thermo-hydrauliques d'un capteur solaire plan muni d'ailettes décalées, au moyen d'une simulation numérique tridimensionnelle utilisant le code de calcul ANSYS Fluent.

L'objectif de ce mémoire est d'identifier la configuration optimale d'ailettes en termes de nombre et de hauteur. Pour faciliter la compréhension du lecteur, le travail est organisé en quatre chapitres :

- Le **premier chapitre** présente les généralités sur l'énergie solaire, les capteurs solaires thermiques, leurs composants, types et domaines d'application.
- Le **deuxième chapitre** est consacré à une étude bibliographique sur les travaux antérieurs portant sur l'amélioration des performances des capteurs solaires plans par insertion d'ailettes.
- Le **troisième chapitre** décrit la modélisation mathématique et numérique du problème : équations gouvernantes, modèle de turbulence k- ϵ , conditions aux limites et paramètres de simulation ANSYS Fluent.
- Le **quatrième chapitre** présente et analyse les résultats des simulations numériques : contours de température et de pression, et identification de la configuration optimale.

Introduction Générale

Ce travail se termine par une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats obtenus et propose des perspectives pour des recherches futures.



Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires



I.1 Introduction

L'énergie solaire représente aujourd'hui l'une des ressources les plus prometteuses pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux actuels. Face à la raréfaction des combustibles fossiles et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, le recours aux énergies renouvelables s'impose comme une solution incontournable. Dans ce cadre, les capteurs solaires plans jouent un rôle crucial parmi les technologies de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, grâce à leur conception simple, leur coût modéré et leur rendement éprouvé.

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter le cadre général de notre étude. Nous commencerons par un aperçu des énergies renouvelables, avant de nous concentrer sur l'énergie solaire thermique et plus particulièrement sur les capteurs solaires plans. Nous décrirons ensuite leurs principaux composants, leurs différents types ainsi que leurs domaines d'application.

I.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se renouvellent naturellement et de façon continue, contrairement aux énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) qui s'épuisent.

I.2.1 Types d'énergies renouvelables

I.2.1.1 L'énergie géothermique

L'énergie géothermique, une ressource renouvelable, exploite la chaleur des profondeurs terrestres. Elle se manifeste à la surface sous forme de phénomènes naturels tels que geysers, fumeroles, volcans et sources chaudes. Cette énergie écologique est disponible partout dans le monde et présente de nombreux bénéfices, notamment pour le chauffage et la climatisation [2].

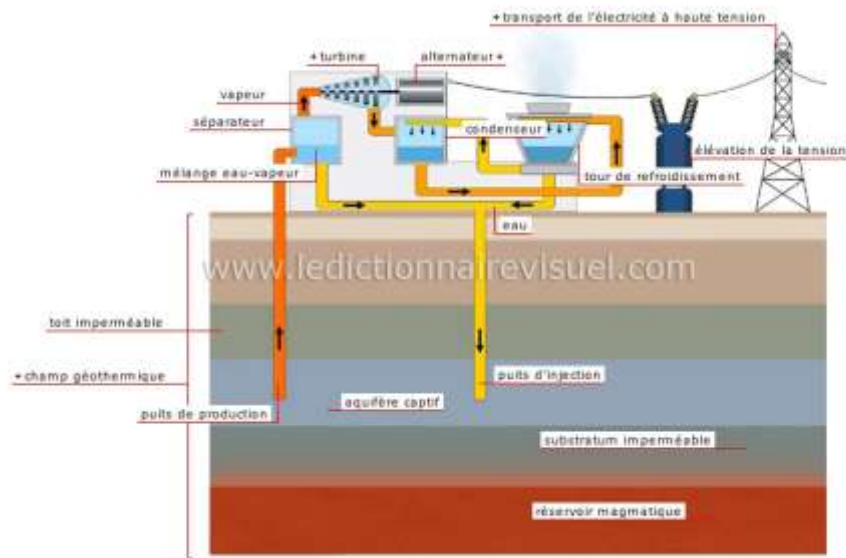


Figure I-1 : Schéma de production d'électricité par l'énergie géothermique [3].

I.2.1.2 L'énergie éolienne

Un aérogénérateur, souvent appelé éolienne, est un appareil qui convertit une partie de l'énergie du vent, qui est un fluide en mouvement, en énergie mécanique grâce à un arbre de transmission, puis en énergie électrique grâce à une génératrice.

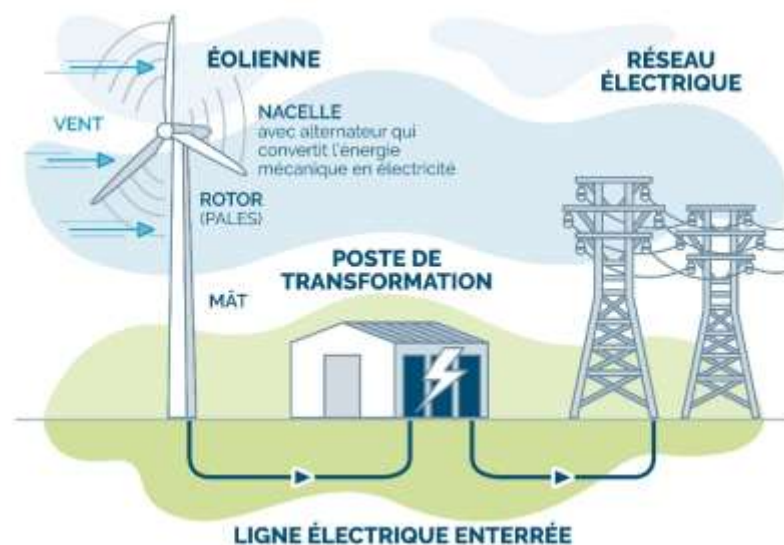


Figure I-2 : Schéma de production d'électricité par l'éolienne [4].

I.2.1.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie provenant du rayonnement du Soleil, qui peut être convertie en électricité ou en chaleur pour diverses applications. C'est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus prometteuses et en pleine expansion.



Figure I-3 : L'énergie solaire [5].

I.2.2 Les principales technologies de conversion de l'énergie solaire

L'énergie solaire présente l'avantage d'être une source d'énergie directement utilisable, car elle est atteinte à la surface du globe sous forme d'un rayonnement électromagnétique, transporté par des photons, qui peut être directement utilisé grâce à des procédés de conversion appropriés. L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux principales technologies :

La conversion du rayonnement solaire en énergie thermique par des capteurs solaires thermiques et la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique par des panneaux photovoltaïques.

Ces techniques permettent de distinguer alors deux types d'exploitation de l'énergie solaire :

- **L'exploitation solaire photovoltaïque** : assurant une production d'électricité de façon directe.
- **L'exploitation solaire thermique** : qui est destinée à la production de chaleur.

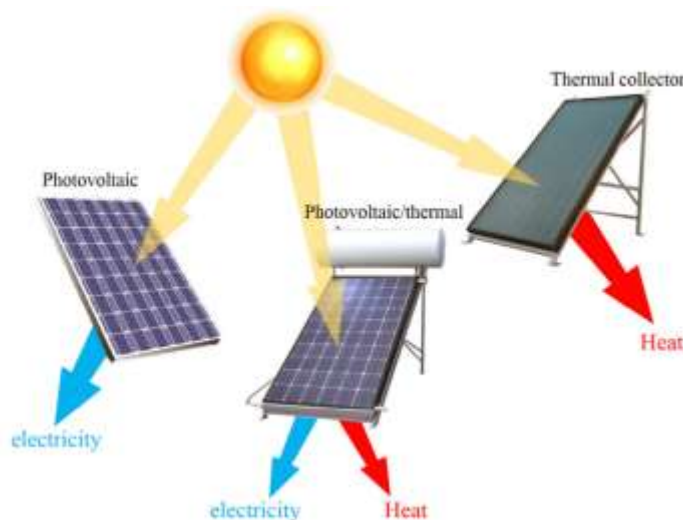


Figure I-4 : Les principales technologies de conversion de l'énergie solaire [6].

I.2.2.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire, une source renouvelable, est transformée en électricité par des cellules photovoltaïques. Ces dernières convertissent directement la lumière solaire grâce à l'effet photoélectrique.

La tension produite dépend principalement du type de matériau semi-conducteur employé. La majorité des cellules photovoltaïques actuelles emploient du silicium de haute pureté, présenté en couches d'environ 150 à 300 μm d'épaisseur [7].

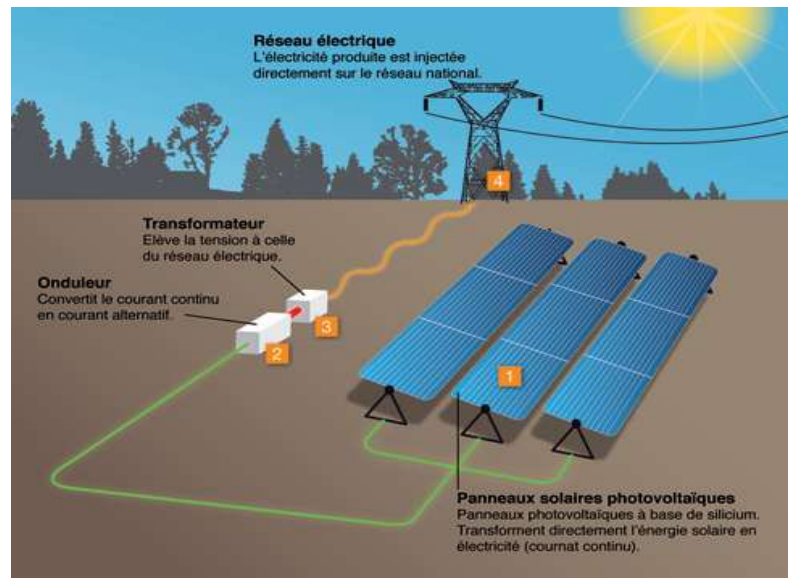


Figure I-5 : Production d'électricité par les panneaux solaires photovoltaïques [8].

I.2.2.1.1 Les technologies photovoltaïques

On distingue trois catégories de cellules PV fabriquées à partir de silicium [9] :

- **Cellules monocristallines** : chaque couche est découpée dans un monocristal de silicium. Ce type de cellule dispose d'un très bon rendement et d'un pouvoir de conversion, mais d'un coût très cher.
- **Cellules polycristallines** : ce sont des cellules de bon rendement aussi, mais légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, ce qui justifie leur coût amoindri.
- **Cellules amorphes** : ce type de cellules ne possèdent pas de structures cristallines. Elles présentent l'avantage d'être intégrées sur des supports souples et rigides. Elles sont souvent utilisées dans des appareils portables, calculatrices, montres.

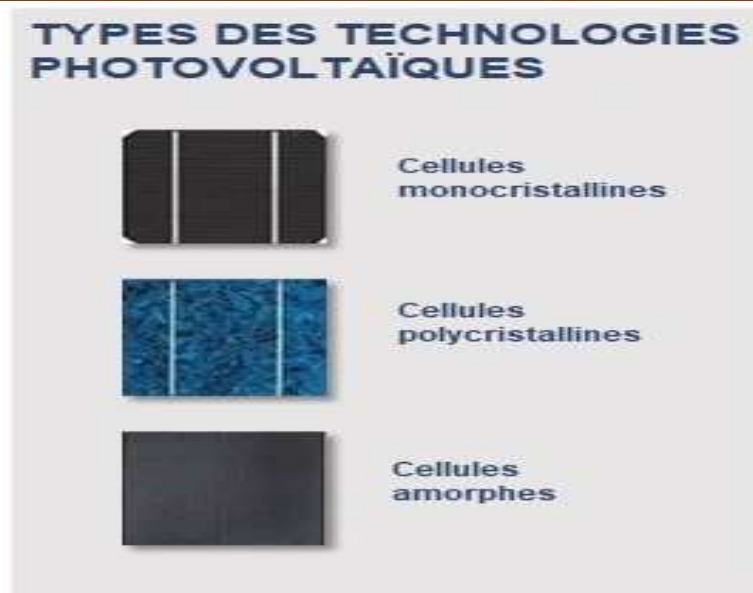


Figure I-6 : Types de technologies photovoltaïques [10].

I.2.2.2 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

Cette technologie est largement utilisée pour :

- Le chauffage de l'eau sanitaire.
- Le chauffage des locaux.
- Le séchage solaire.
- Les procédés industriels à basse et moyenne température.

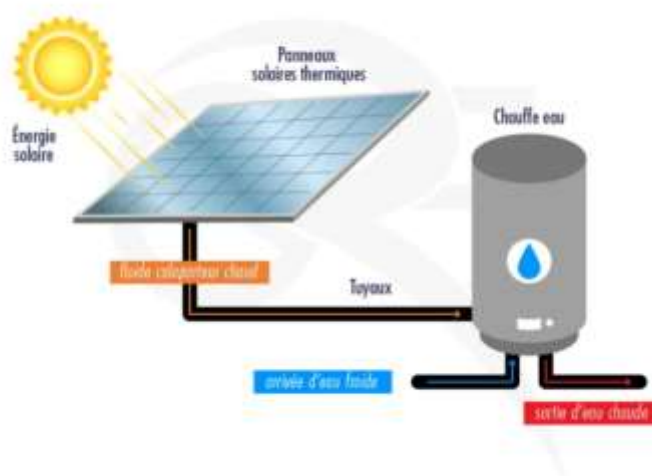


Figure I-7 : Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire thermique [11].

I.2.2.2.1 Types de capteurs solaires thermiques

Les principaux types de capteurs solaires thermiques sont les suivants :

- **Capteurs plans** : ces dispositifs fonctionnent par l'absorption directe du rayonnement solaire grâce à une plaque noire ou sélective plane qui chauffe un fluide caloporteur circulant dans des tubes reliés à l'absorbeur.
- **Les capteurs tubulaires sous vide** : ces dispositifs utilisent des tubes cylindriques sous vide qui absorbent le rayonnement solaire, diminuant ainsi les pertes par conduction et convection. La chaleur est ensuite transférée au fluide caloporteur contenu dans les tubes, ce qui assure une efficacité optimale même en période de faible ensoleillement ou de températures froides.
- **Centrales solaires à concentration** : elles concentrent le rayonnement solaire grâce à des miroirs paraboliques ou des lentilles sur une zone d'absorption réduite, générant ainsi une température élevée ; la chaleur collectée est diffusée à un fluide caloporteur pour des usages industriels nécessitant une grande quantité de chaleur.

I.3 Les capteurs solaires plans

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour capturer l'énergie du rayonnement solaire, la convertir en énergie thermique puis la transmettre à un fluide caloporteur. Il fonctionne essentiellement sur la base de deux principes physiques importants : l'effet de serre et le comportement des surfaces absorbantes en tant que corps noir.

I.3.1 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan

Le fonctionnement d'un capteur solaire plan repose sur les étapes suivantes : Le rayonnement solaire arrive à travers la couverture en verre du capteur et parvient à l'absorbeur doté d'une surface sélective où il est converti en chaleur. La chaleur développée sur la surface de l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans les tubes qui lui sont fixés. Le fluide chauffé transporte alors l'énergie thermique jusqu'à un échangeur de chaleur, et c'est de là que l'énergie est cédée au consommateur.

La couverture en verre est transparente au rayonnement solaire dans le visible et le proche infrarouge, mais elle est quasi opaque au rayonnement infrarouge lointain émis par l'absorbeur réchauffé. Ce mécanisme limite les pertes thermiques par rayonnement et produit un effet de serre à l'intérieur du capteur.

L'isolant thermique (sous l'absorbeur, parois latérales du capteur) limite les pertes thermiques par conduction vers l'extérieur. Ce mécanisme a également pour effet de rendre plus efficace le fonctionnement du capteur solaire plan.

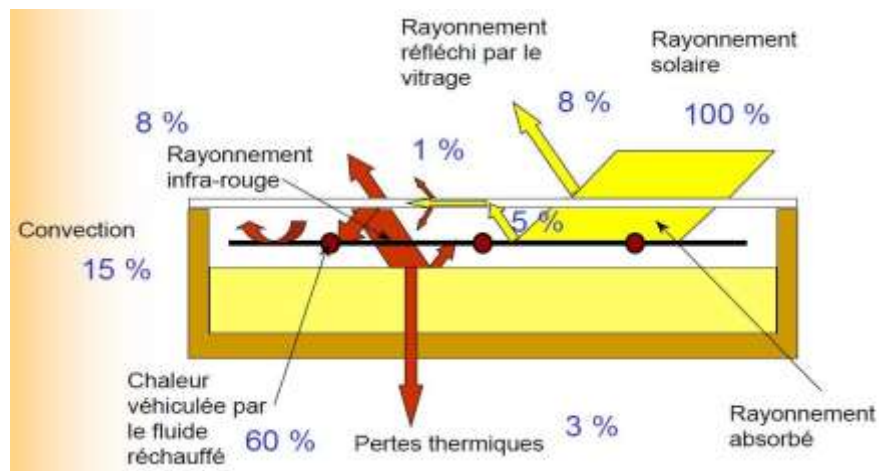


Figure I-8 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan [12].

I.3.2 Différents composants du capteur solaire

Un capteur solaire plan est généralement composé d'un coffre, d'un vitrage, d'une isolation, d'un absorbeur et de tubes permettant le passage du fluide caloporteur.

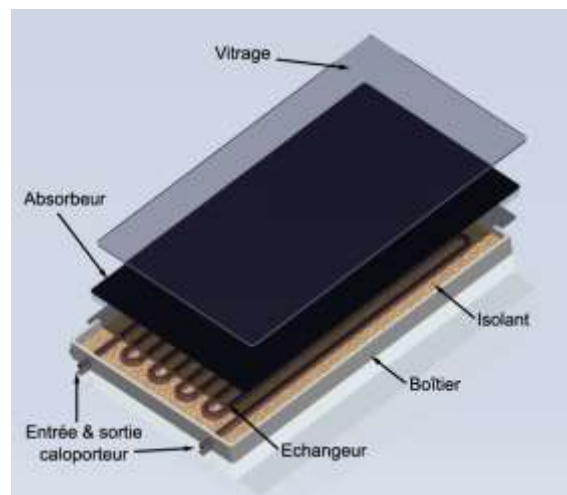


Figure I-9 : Les différents composants d'un capteur solaire plan [13].

I.3.2.1 L'absorbeur

L'absorbeur est l'élément principal du capteur solaire thermique. Il capte le rayonnement solaire et le convertit en énergie thermique que l'on peut utiliser. Pour bien absorber le rayonnement solaire, l'absorbeur est généralement recouvert d'une peinture noire spéciale. Cette peinture absorbe beaucoup de la lumière du soleil, notamment la lumière visible et ultraviolette, mais évite de perdre trop de chaleur par rayonnement infrarouge.

Le choix du matériau pour l'absorbeur dépend de plusieurs choses :

- ❖ Il doit bien absorber le rayonnement solaire.
- ❖ Il doit être bon conducteur de la chaleur pour que la chaleur soit bien transmise.
- ❖ Il doit résister à la corrosion et aux conditions de l'environnement.

- ❖ Il doit rester stable à haute température pour garantir de bonnes performances pendant longtemps.

En fonction de la technologie du capteur utilisée, l'absorbeur peut présenter diverses configurations, comme une plaque métallique, un serpentín, un tube sous vide ou même une structure souple ou rigide en plastique ou en métal, vitrée ou pas, selon l'utilisation prévue et le niveau de température souhaité.

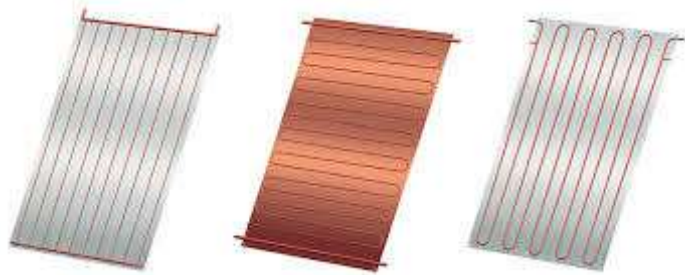


Figure I-10 : Différents modèles, types et matériaux des absorbeurs [14].

I.3.2.2 La couverture transparente

La protection transparente protège l'absorbeur et joue un rôle crucial dans la diminution des émissions thermiques du capteur solaire plan. Généralement fabriquée en verre, elle autorise l'entrée de la lumière solaire tout en réduisant les pertes thermiques, ce qui crée un effet de serre.

L'utilisation d'une double couverture peut encore améliorer le piégeage thermique et le rendement du capteur [15].

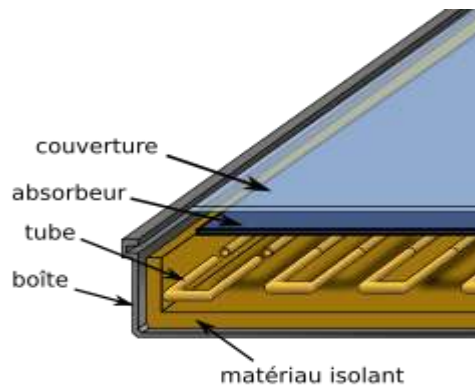


Figure I-11 : La couverture transparente d'un capteur solaire plan [16].

I.3.2.3 L'isolant thermique

L'isolant thermique dans un capteur solaire plan est très important pour le fonctionnement du système. Il est généralement placé sous l'absorbeur et le long des parois latérales du capteur.

L'objectif principal de l'isolant thermique est de minimiser les pertes de chaleur qui se produisent par conduction et convection vers l'arrière et les côtés du capteur solaire plan. La performance d'un isolant thermique dépend de son coefficient de conductivité thermique. Cela signifie que l'isolant thermique avec un coefficient de conductivité thermique faible est plus efficace pour réduire les pertes de chaleur.

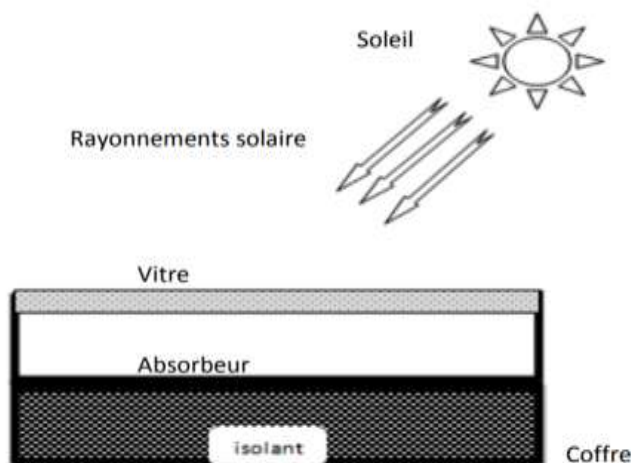


Figure I-12 : Schéma d'un capteur solaire plan complet avec son isolant en face-arrière [17].

I.3.2.4 Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur joue un rôle essentiel dans le fonctionnement d'un capteur solaire plan, car il assure le transfert de l'énergie thermique captée par la plaque absorbante vers le système de stockage ou de consommation final.

Un bon fluide caloporteur doit prendre en compte les conditions suivantes [18] :

- ❖ Présenter une capacité calorifique importante et une conductivité thermique satisfaisante, garantissant ainsi un coefficient de transfert thermique élevé et une transmission efficace de la chaleur.
- ❖ Avoir une viscosité réduite, ce qui diminue les pertes de charge dans le système et favorise l'efficacité de la pompe circulante.
- ❖ Maintenir une stabilité chimique à haute température, en particulier durant les phases d'arrêt du capteur.
- ❖ Posséder un point d'ébullition élevé et d'un point de congélation faible, assurant une performance fiable sur un vaste intervalle de températures tout en étant adapté aux conditions météorologiques locales.
- ❖ Démontrer des caractéristiques anticorrosives et une agressivité chimique minimale envers les matériaux qui composent le capteur.
- ❖ Être inoffensif et avoir un impact environnemental minimal en cas de déversement.
- ❖ Être facilement disponible sur le marché à un prix raisonnable.

Les fluides caloporteurs les plus couramment utilisés dans les capteurs solaires plans sont [19]:

L'air :

L'air est l'un des fluides caloporteurs les plus utilisés dans les capteurs solaires plans. Il présente plusieurs avantages, notamment sa disponibilité, son faible coût, ainsi que l'absence de risques de gel, de corrosion ou de fuite. Ces caractéristiques contribuent à améliorer la durabilité du capteur et à réduire les besoins en maintenance.

En revanche, sa faible capacité calorifique limite la quantité de chaleur qu'il peut transporter. Par conséquent, un débit d'air plus élevé est nécessaire pour transférer une même quantité d'énergie thermique, ce qui peut entraîner une augmentation de la consommation des ventilateurs et une diminution des performances globales du système.

L'eau :

L'eau, grâce à sa grande capacité thermique, est un excellent transmetteur de chaleur, capable de transférer efficacement l'énergie thermique. Cependant, son application comporte quelques contraintes, y compris le danger de gel pendant les nuits d'hiver et le risque de surchauffe lors des chaleurs extrêmes, pouvant causer des dysfonctionnements et compromettre la sécurité du dispositif.

De plus, l'accumulation progressive de tartre à l'intérieur des tuyaux avec le temps provoque une réduction des transferts de chaleur, ce qui impacte les performances globales du capteur solaire.

I.3.2.5 Le coffre

Le coffre est la structure externe du capteur solaire plan. Il supporte mécaniquement tous les composants du capteur, comme la couverture transparente, l'absorbeur, le fluide caloporteur, l'isolant thermique. Il les protège des intempéries, de l'humidité et des chocs.

Le coffre est fait de matériaux résistants et étanches. Il aide à réduire les pertes thermiques en maintenant l'isolant en place. Cela participe à la durabilité et aux performances globales du capteur.

I.3.3 Différents types des capteurs solaires thermiques

On peut valoriser l'énergie solaire de plusieurs façons, tout comme on dispose de diverses techniques pour capter l'énergie dérivée du rayonnement solaire incident. Ces techniques s'appuient sur des technologies de capteurs solaires ajustées en fonction des conditions météorologiques, du fluide porteur de chaleur employé et de l'application prévue (chauffage, production d'électricité, séchage.....).

On identifie les catégories suivantes parmi les types de capteurs solaires thermiques les plus courants :

- Capteurs plans vitrés.
- Capteurs plans non vitrés.
- Capteurs à tubes sous vide.

I.3.3.1 Capteur plan vitré

On utilise beaucoup les capteurs solaires plans vitrés. Ils existent sous deux formes : les capteurs solaires à eau et les capteurs solaires à air. Ces capteurs solaires sont adaptés à des usages à température modérée. En effet, ils fonctionnent mieux lorsque la température se situe entre 30 °C et 70 °C.

Les capteurs solaires à eau (**Figure I-13**) sont très utilisés. On les retrouve dans les systèmes de production d'eau chaude sanitaire, que ce soit à l'échelle individuelle ou collective. Ils sont également utilisés dans des applications industrielles. On les utilise aussi pour chauffer les piscines intérieures.

Les capteurs plans à air (**Figure I-14**) servent au séchage, au réchauffement des endroits et au chauffage de l'air de ventilation.

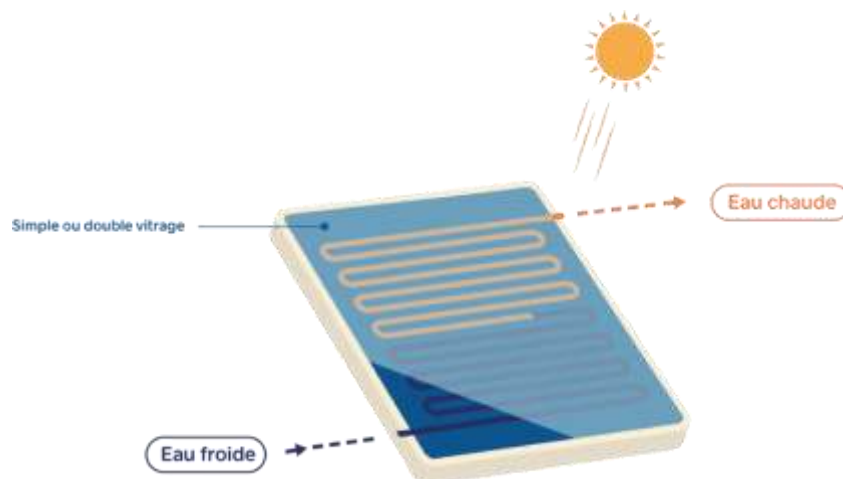


Figure I-13 : Capteur plan vitré à eau [20].

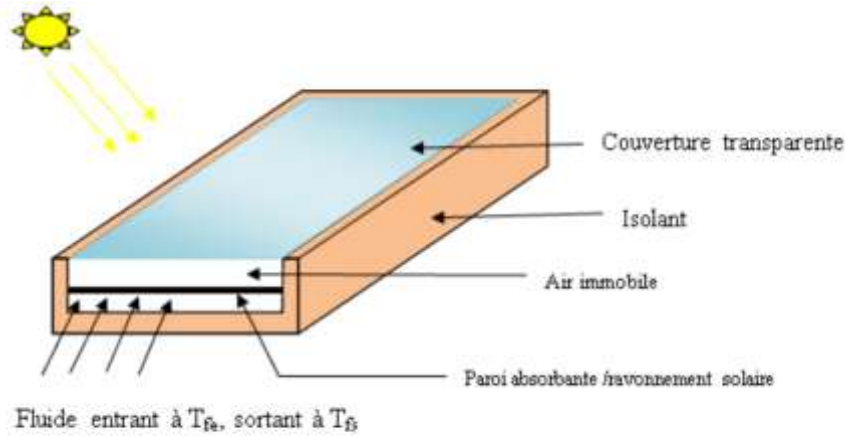


Figure I-14 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan à air [21].

Avantages	Inconvénients
Bon rendement grâce à l'effet de serre.	Rendement limité au-delà de 80°C.
Température de sortie : 30°C – 80°C.	Retour sur long investissement (10–15 ans)
Technologie la plus répandue et éprouvée.	Durée de vie limitée à ≈ 20 ans.
Pertes par convection et rayonnement réduites.	Sensible aux chocs thermiques et météo.
Disponible en simple / double / triple vitrage.	Coût supérieur au capteur non vitré.

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des capteurs plans vitrés [22].

I.3.3.2 Capteur plan non vitré

Ces capteurs se caractérisent par une conception simple et une large surface d'absorption. Ils fonctionnent habituellement à une température basse et montrent une performance plutôt constante face aux changements de l'angle d'incidence du rayonnement solaire (**figure I-15**). Ils sont principalement utilisés pour chauffer les piscines et produire de l'eau chaude à basse température.



Figure I-15 : Vue d'un capteur solaire non-vitré [23].

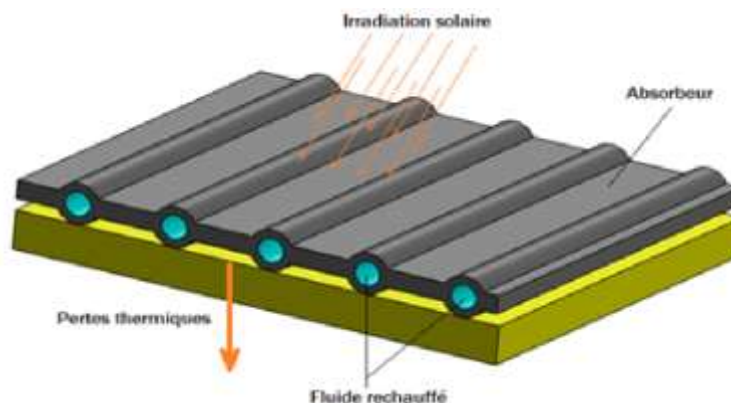


Figure I-16 : Description d'un capteur solaire non-vitré [24].

Avantages	Inconvénients
Très bon rendement à température ambiante.	Faible rendement global.
Peu coûteux — technologie simple.	Température de sortie faible ($\approx 40^{\circ}\text{C}$).
Facile à installer et entretenir.	Application limitée : chauffage de piscines.
Léger et flexible.	Pertes thermiques élevées.

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients des capteurs plans non vitrés [22].

I.3.3.3 Capteurs à tubes sous vide

Le capteur solaire à tubes sous vide est un type d'installation thermique utilisé pour produire des températures moyennes à élevées. Il se compose de deux tubes en verre l'un à l'intérieur de l'autre, avec un vide entre les deux afin de réduire considérablement les pertes de chaleur. Il est particulièrement utile pour obtenir de meilleures performances lorsque les conditions météorologiques ne sont pas favorables. Son utilisation concerne principalement la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage des locaux et certains procédés industriels.

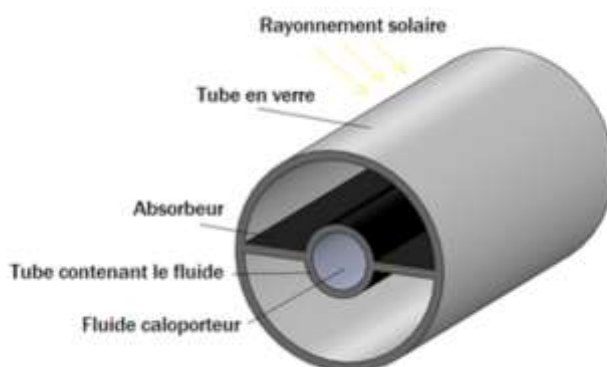


Figure I-17 : Capteur à tube sous vide [24].

Avantages	Inconvénients
Meilleur rendement.	Coût d'acquisition le plus élevé
Températures de sortie très élevées (>100°C).	Fragilité mécanique.
Adapté à la climatisation solaire et process industriel.	Maintenance spécialisée requise
Pertes thermiques minimales.	Pression interne à maintenir < 10 ⁻³ Pa
Orientation des tubes ajustable selon implantation.	Encombrement tubulaire spécifique
Moins encombrant que le capteur plan vitré	—

Tableau I-3 : Avantages et inconvénients des capteurs à tubes sous vide [22].

I.4 Applications des capteurs solaires plans

Le capteur solaire plan trouve son application dans divers domaines tels que le résidentiel, l'industriel et l'agricole. Sa capacité à fonctionner entre 40 °C et 80 °C le rend approprié pour différentes applications thermiques à basse température [25].

I.4.1 Production d'eau chaude sanitaire

Le capteur solaire à plaque plane est le plus largement utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire. À l'heure actuelle, l'une des applications les plus courantes du capteur solaire à plaque plane est la production d'eau chaude sanitaire. L'énergie solaire est absorbée par un ou plusieurs récepteurs, puis transférée à un fluide caloporteur, avant d'être stockée dans le réservoir d'eau chaude, qui peut fournir de l'eau chaude dont la température varie généralement de 40 °C à 70 °C. Ce dispositif aide à diminuer de façon importante la consommation d'énergie classique et à réduire les émissions de CO₂ spécialement dans les régions bien ensoleillées [26].

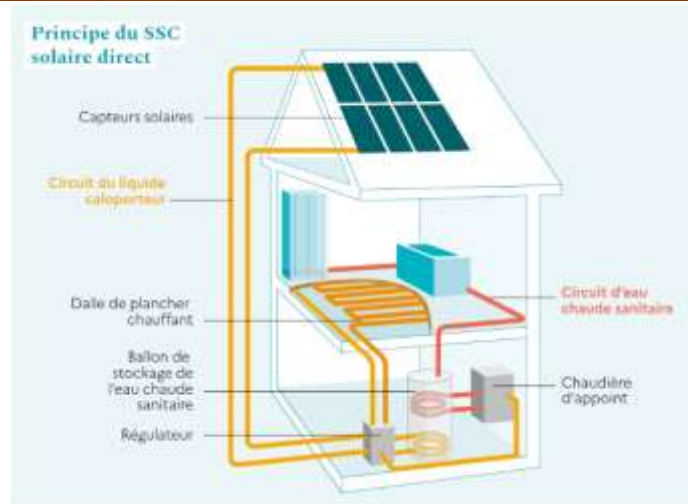


Figure I-18 : Schéma de principe d'un système solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire [27].

I.4.2 Chauffage des bâtiments

Les capteurs solaires plans s'intègrent dans les systèmes de chauffage solaire hybride afin de générer de l'eau chaude domestique et de réchauffer les bâtiments. Un fluide, réchauffé par les capteurs, parcourt et diffuse son énergie dans un ballon de stockage thermique. Ce ballon alimente un système de distribution, généralement un plancher chauffant basse température (30 °C - 45 °C), ce qui est correspondant avec les températures délivrées par les capteurs solaires plans. Un système de chauffage secondaire traditionnel s'active lorsque la luminosité est insuffisante.

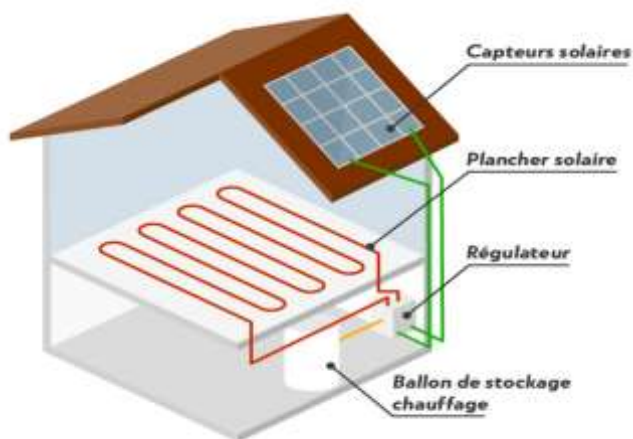


Figure I-19 : Système de chauffage solaire d'un bâtiment par plancher chauffant solaire [28].

I.4.3 Chauffage de piscine

Le chauffage des piscines se prête bien à l'usage de capteurs solaires plans. En raison du faible écart de température nécessaire entre l'eau de la piscine (souvent entre 24 °C et 28 °C) et l'eau du réseau, on peut obtenir de bons rendements avec des systèmes simples et peu coûteux. On retrouve souvent cette application dans les hôtels, les centres sportifs et les complexes touristiques situés dans les régions ensoleillées.

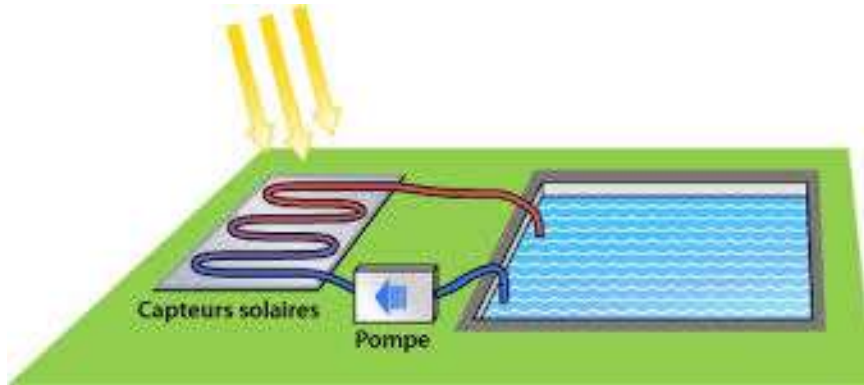


Figure I-20 : Schéma de principe d'un système de chauffage de piscine par capteurs solaires plans [29].

I.4.4 Séchage agricole solaire

Dans l'agriculture, on utilise des capteurs solaires plans pour déshydrater des aliments tels que les fruits, légumes, céréales et herbes aromatiques. Ces séchoirs solaires actifs offrent une qualité de séchage supérieure par rapport aux séchoirs passifs, grâce à un contrôle optimisé de la température et du flux d'air.

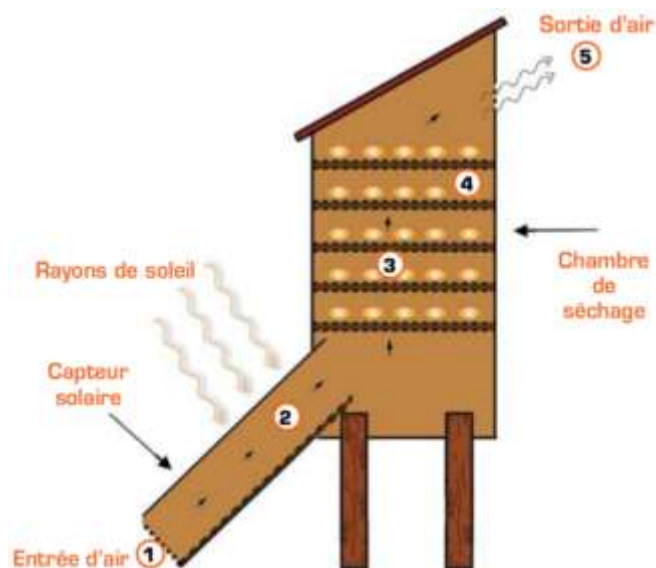


Figure I-21 : Principe de séchage agricole solaire [30].

I. 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les énergies renouvelables et leurs diverses catégories. Nous nous sommes concentrés sur l'énergie solaire thermique, en étudiant les capteurs solaires thermiques, leur fonctionnement, leurs types, leurs classifications et leurs composants.

Enfin, nous avons présenté les différentes applications des capteurs solaires, en particulier dans le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et le séchage agricole.



Chapitre II :
État de l'art des capteurs solaires plans



II.1 Introduction

Les capteurs solaires plans, en raison de leur conception simplifiée et de leur coût modéré, sont parmi les technologies les plus couramment utilisées pour transformer l'énergie solaire en énergie thermique. Toutefois, les performances thermiques de ces dispositifs sont restreintes par les pertes de chaleur et l'efficacité des transferts thermiques entre l'absorbeur et le fluide de transport thermique.

Dans ce cadre, de nombreuses études scientifiques ont été réalisées pour augmenter l'efficacité des capteurs solaires plans, notamment par la mise en place de diverses configurations d'ailettes et l'amélioration de leur forme. Ce chapitre offre un récapitulatif des recherches majeures dédiées à l'optimisation des performances thermiques des capteurs solaires plans.

II.2 Étude bibliographique

L'étude des paramètres influençant les performances thermiques des capteurs solaires plans à air a fait l'objet de nombreuses recherches. Plusieurs travaux disponibles dans la littérature se sont intéressés à l'aspect thermique de ces capteurs, généralement à travers des analyses énergétiques. La plupart des capteurs solaires intègrent des chicanes et des ailettes dont les dispositions peuvent varier (longitudinale, transversale, décalé) ainsi que les formes (rectangulaires, ondulées, etc.). Dans ce contexte, parmi les travaux de recherche réalisés, celui mené par **Junaid et Sadaq [31]** qui ont réalisé une étude numérique tridimensionnelle d'un capteur solaire plan muni d'ailettes internes afin d'améliorer le transfert thermique. À l'aide du logiciel ANSYS Fluent, plusieurs configurations ont été analysées, notamment des tubes sans ailettes puis avec deux, trois et quatre ailettes. Ils ont conclu que l'ajout de deux ailettes permet d'augmenter significativement la température de sortie du fluide et le rendement thermique du capteur, tandis qu'un nombre excessif d'ailettes entraîne une diminution des performances. Cette étude souligne l'importance de l'optimisation géométrique des ailettes dans les capteurs solaires plans.

Ammar et al. [32] ont développé un modèle CFD tridimensionnel d'un capteur solaire plan à air intégrant un absorbeur sélectif et des rangées d'ailettes rectangulaires installées sous la structure. À l'aide du logiciel ANSYS Fluent en conditions stationnaires avec le modèle de turbulence k-epsilon réalisable, une étude paramétrique a été menée en variant le nombre de rangées d'ailettes et leur hauteur relative. Les résultats ont montré que l'ajout d'ailettes améliore significativement la performance thermique, mais provoque une augmentation de la puissance de pompage due à l'écoulement turbulent additionnel. Cette étude démontre l'importance de

l'optimisation du nombre d'ailettes et de l'adoption d'un absorbeur sélectif pour maximiser l'efficacité thermique effective tout en minimisant la consommation énergétique du système.

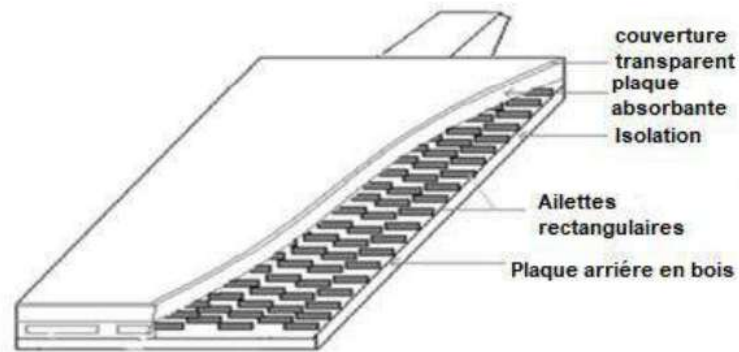


Figure II-1 : Capteur solaire plan avec des ailettes dans le conduit [32].

Kumar et al. [33] ont employé la modélisation numérique pour étudier la performance thermique d'un capteur solaire à air doté d'une plaque absorbante avec des ailettes décalées. La recherche s'est concentrée sur la façon dont le nombre de Reynolds et la géométrie des ailettes influent sur le nombre de Nusselt et le facteur de friction. Les résultats montrent que les ailettes décalées perturbent la couche limite thermique, boostant le coefficient de convection et le transfert thermique par rapport à une plaque lisse. Les auteurs estiment que la configuration à ailettes décalées est intéressante si l'on ajuste bien ses paramètres géométriques pour trouver un bon équilibre entre performance thermique et contraintes hydrauliques.

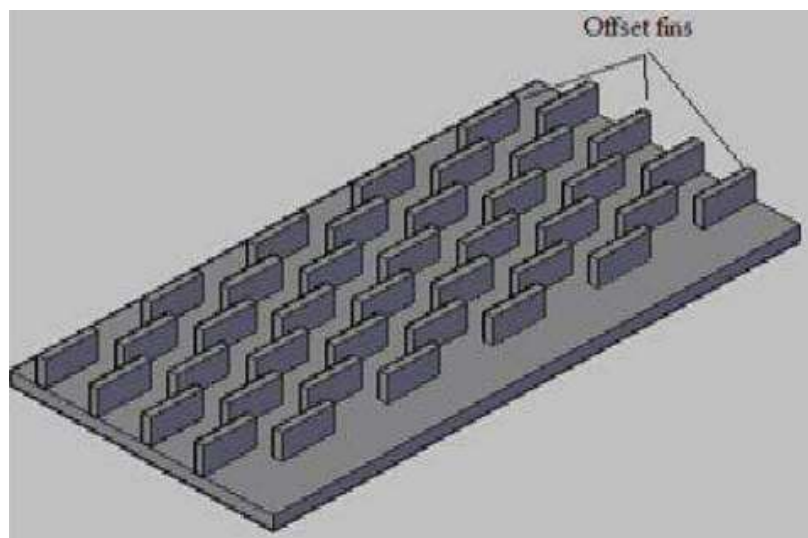


Figure II-2 : Schéma de la plaque absorbante fixée par ailettes [33].

Ayadi et al. [34] ont mené une étude numérique 3D pour améliorer les performances thermiques et hydrauliques des collecteurs solaires à air. Ils ont combiné une plaque absorbante corruguée avec des déflecteurs perforés internes. Des simulations de mécanique des fluides numérique (CFD) ont analysé différentes configurations de déflecteurs (formes arquées et sinusoïdales, avec ou sans perforations) et diverses dispositions d'espacement et de flux (parallèle et contre-courant). Ils ont conclu que les déflecteurs perforés augmentent la turbulence et améliorent le transfert de chaleur. Ces résultats donnent des indications quantitatives pour l'amélioration géométrique des capteurs solaires à air. La conception des déflecteurs est importante pour maximiser l'efficacité thermique tout en contrôlant les pertes de charge, ce qui aide à améliorer les systèmes solaires thermiques durables.

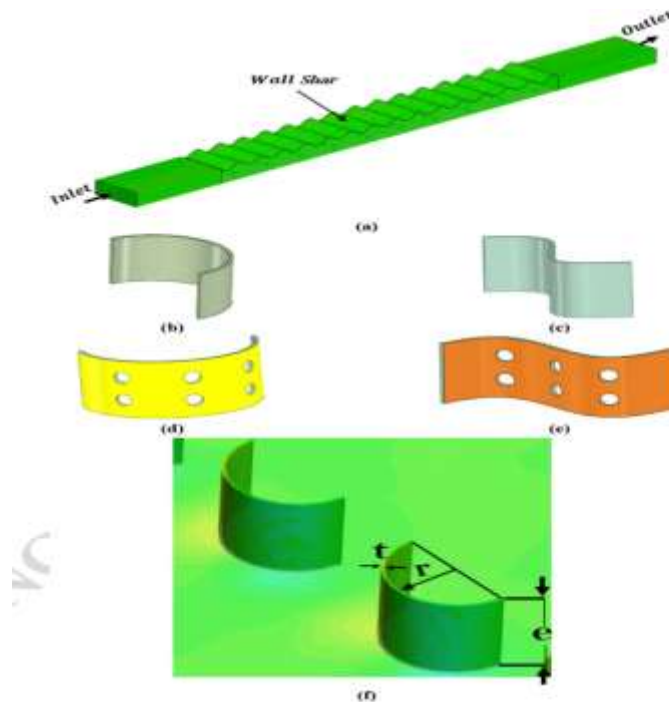


Figure II-3 : (a) Schéma tridimensionnel (3D) du capteur solaire à air, (b) Cas A, (c) Cas B, (d) Cas C, (e) Cas D, et (f) Schéma 3D du déflecteur (baffle) avec les paramètres géométriques [34].

Machi et al. [35] ont mené une étude expérimentale et numérique pour examiner comment de nouvelles formes de déflecteurs affectent l'efficacité thermique des capteurs solaires à double passage. Ils ont testé trois types de déflecteurs : rectangulaires, prismes trapézoïdaux et générateurs de vortex en delta. Grâce à des simulations CFD et des expériences, ils ont pu mesurer l'impact de la forme sur le transfert de chaleur et la perte de charge. Les résultats indiquent que les prismes trapézoïdaux et les générateurs de vortex en delta améliorent le mélange de l'air, ce qui augmente le transfert de chaleur sans créer une perte de pression excessive. Cette recherche apporte des données chiffrées utiles pour concevoir des capteurs solaires à air et élargit les travaux existants sur les configurations traditionnelles.

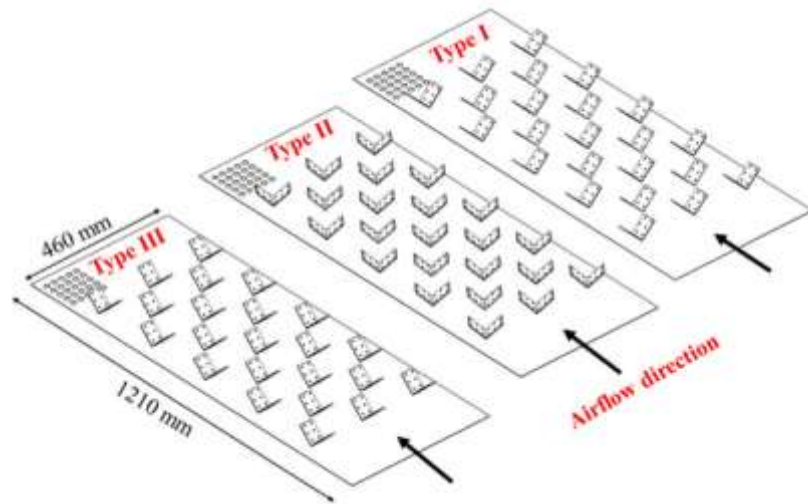


Figure II-4 : Configuration des ailettes sur l'absorbeur [35].

Bahria et Amirat [36] ont examiné comment l'ajout de chicanes longitudinales affecte le rendement thermique. Ils ont fait une étude expérimentale et théorique sur un capteur solaire plan à air. Les chicanes, placées dans le flux d'air, servaient à modifier le flux et à augmenter l'échange de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur. Ils ont changé le nombre de rangées de chicanes pour voir comment cela influençait les performances du capteur. Les résultats montrent que plus il y a de rangées, plus la température de l'air à la sortie et le rendement thermique sont élevés. Cependant, trop de rangées peuvent augmenter les pertes de charge. Cette étude montre qu'il est intéressant d'utiliser des obstacles internes pour augmenter le transfert thermique dans les capteurs solaires plans à air.

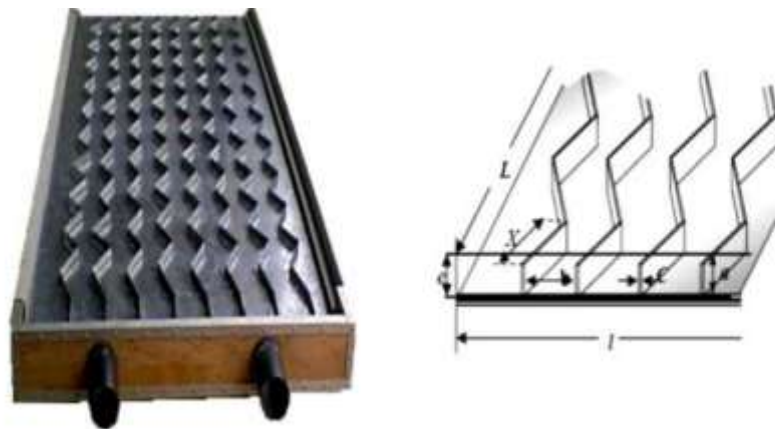
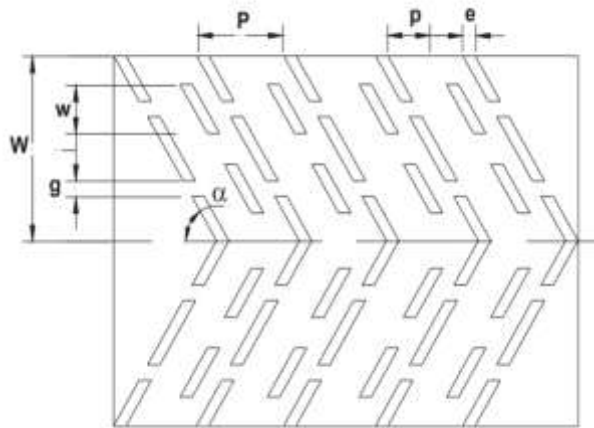


Figure II-5 : Caractéristiques géométriques de chicane longitudinales [36].

Deo et al. [37] ont examiné une étude expérimentale sur un capteur solaire à air équipé d'ailettes triangulaires pour mesurer l'amélioration du transfert thermique. Différentes configurations géométriques des ailettes et diverses valeurs du nombre de Reynolds ont été utilisées lors des essais. Les données obtenues révèlent une hausse significative du coefficient de transfert thermique et de l'efficacité thermique du capteur, accompagnée d'une élévation modeste des pertes de charge.



- **e** : hauteur de la nervure
- **g** : espace (gap) dans la nervure V-down
- **P** : pas longitudinal des nervures V-down
- **p** : distance entre la nervure décalée et la nervure V-down
- **W** : demi-largeur du canal
- **w** : taille de la nervure décalée
- **a** : angle d'attaque

Figure II-6 : Géométrie des nervures combinées V-down multi-espacées avec nervures décalées [37].

Boussouar et al. [38] ont mené une étude expérimentale sur l'influence d'ailettes perforées sur les performances thermo-hydrauliques d'un capteur solaire à air. Ils ont comparé des ailettes pleines avec des ailettes perforées de formes circulaires et rectangulaires, en changeant la taille des trous. Les mesures ont porté sur les températures, le débit d'air et les chutes de pression, ce qui a permis de calculer le nombre de Nusselt, le facteur de friction et l'efficacité thermique. Les résultats indiquent que les ailettes perforées améliorent le transfert de chaleur tout en diminuant les pertes de pression par rapport aux ailettes pleines. Les perforations rectangulaires ont montré un léger avantage thermique par rapport aux perforations circulaires, car elles perturbent mieux la couche limite et mélangent plus efficacement le flux.

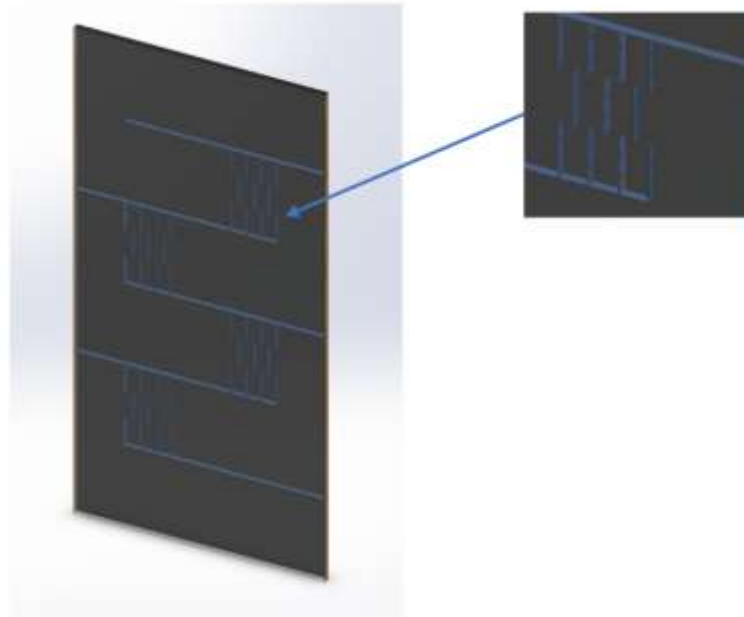


Figure II-7 : Visualisation d'un capteur solaire à air avec des ailettes perforées [38].

Suha et al. [39] ont mené une étude expérimentale et numérique visant à analyser la performance d'une distillation solaire équipé d'une plaque absorbeur munie d'ailettes rectangulaires inclinées et perforées. L'étude a été réalisée à l'aide de logiciels de simulation thermique et CFD, permettant d'examiner différentes configurations d'inclinaison et de perforation des ailettes. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation d'ailettes perforées inclinées améliore significativement le transfert de chaleur et la circulation de l'air, ce qui conduit à une augmentation du rendement global du système. De plus, les auteurs ont démontré que l'angle d'inclinaison et le nombre de perforations jouent un rôle crucial dans l'optimisation de la performance thermique du capteur solaire.

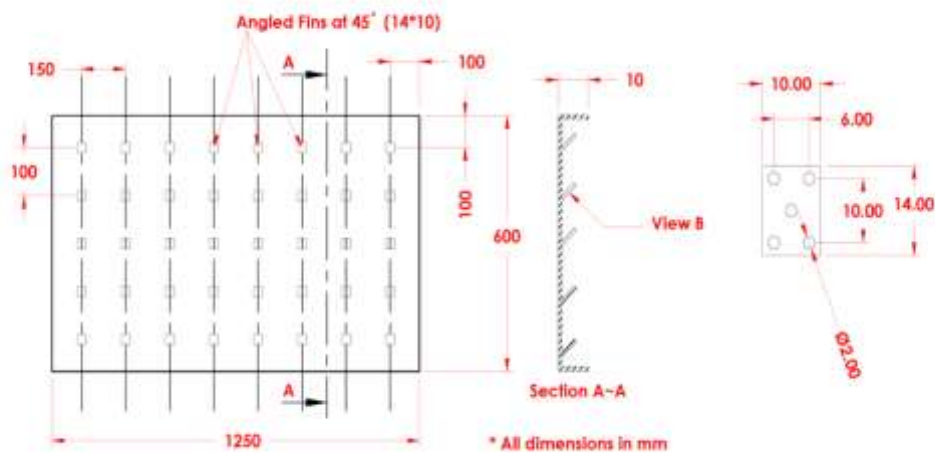


Figure II-8 : Vue en plan et vue en coupe latérale du bassin surélevé muni d'ailettes [39].

Yang et al. [40] ont examiné la conception et l'amélioration d'un capteur solaire à air. Ce capteur est équipé d'une plaque qui absorbe la chaleur et possède des ailettes décalées. Le but était d'améliorer sa performance thermique et hydraulique. Leur recherche, basée sur une analyse numérique en trois dimensions avec CFD, a pris en compte plusieurs aspects des ailettes. Ils ont regardé la hauteur, l'espace entre elles, la longueur et l'angle de décalage. Ils voulaient voir comment ces aspects affectent le transfert de chaleur, la perte de charge et l'efficacité thermique générale du capteur. Les résultats indiquent que les ailettes décalées créent des turbulences et des tourbillons secondaires. Ceci augmente le transfert de chaleur de façon importante. En ajustant bien la forme des ailettes, on peut trouver un bon équilibre entre une grande efficacité thermique et une faible perte de charge. Cela rend le capteur plus efficace qu'une plaque lisse ordinaire.

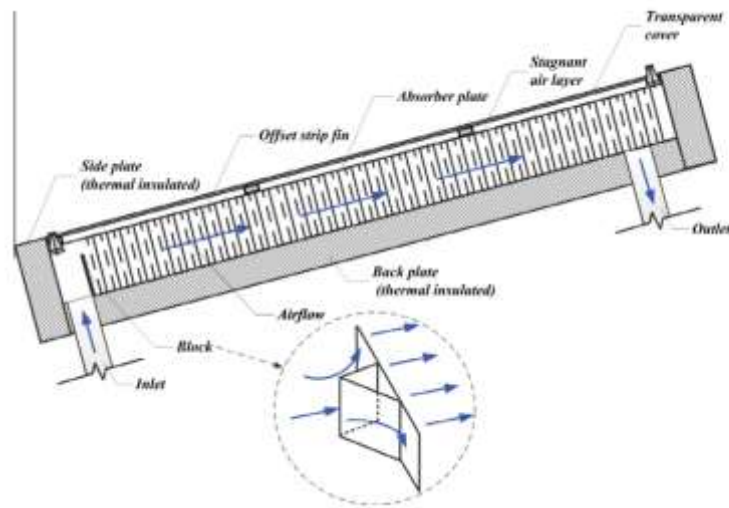


Figure II-9 : Vue schématique du capteur solaire à air avec ailette décalée fixé [40].

Saravanan et al. [41] ont mené une étude expérimentale sur un capteur solaire à air doté d'une plaque absorbeur à ailettes en C décalées. Le but était d'améliorer le transfert de chaleur tout en gérant la perte de charge. Ils ont testé deux configurations : ailettes pleines et ailettes perforées. Les ailettes perforées ont amélioré le transfert de chaleur tout en réduisant la résistance à l'écoulement. Les ailettes décalées perforées sont donc un bon compromis entre performance thermique et perte de charge.

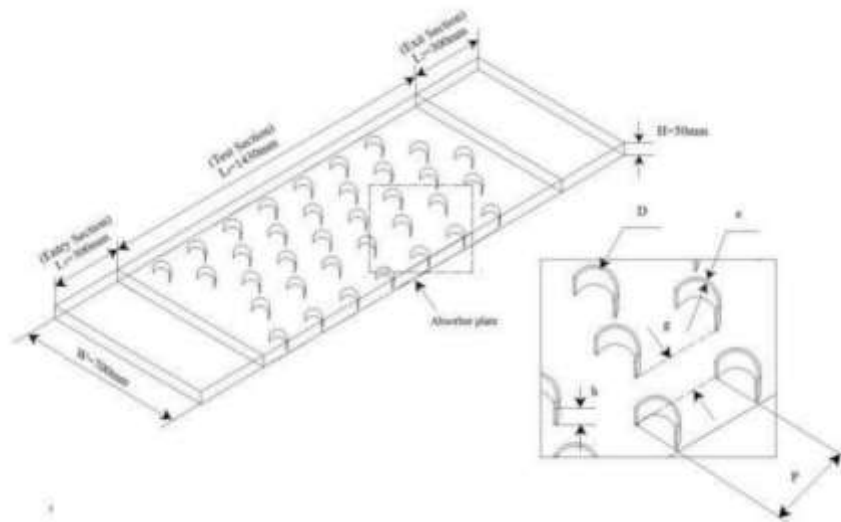


Figure II-10 : Arrangement d'ailettes (non perforées) sur plaque absorbante [41].

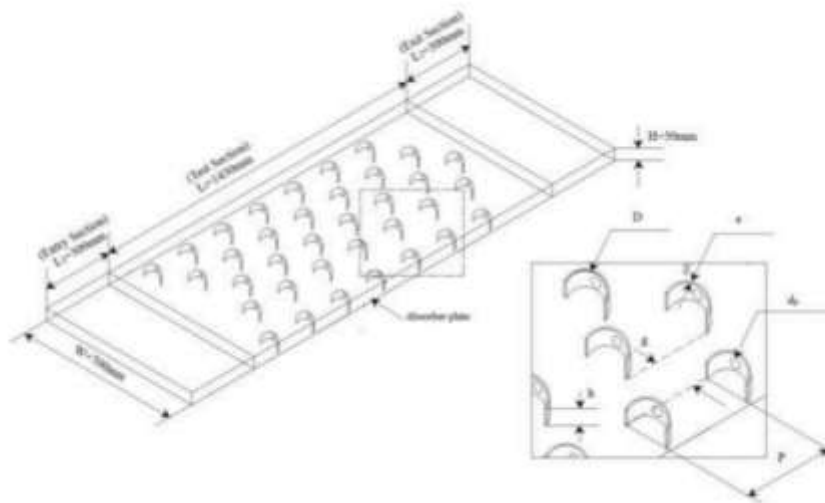


Figure II-11 : Arrangement d'ailettes (perforées) sur plaque absorbante [41].

Shafi et al. [42] ont examiné comment des chicane en V trouées affectent le rendement thermique et hydraulique d'un capteur solaire à air. L'étude compare six configurations : une plaque lisse et cinq plaques avec des chicanes en V perforées de différentes formes (circulaires, hexagonales, carrées, rectangulaires et triangulaires). Les résultats indiquent que l'intégration de chicanes en V perforées augmente considérablement le transfert thermique par rapport à une plaque lisse, car cela provoque de la turbulence et perturbe la couche limite. La configuration avec des trous hexagonaux a donné les meilleurs résultats, avec une augmentation du nombre de Nusselt. Par contre, les trous triangulaires ont créé des pertes de charge importantes même avec un bon transfert thermique, alors que les trous circulaires ont apporté l'amélioration la plus faible. Cette étude conclut que la forme des perforations influence grandement l'optimisation des performances thermo-hydrauliques.

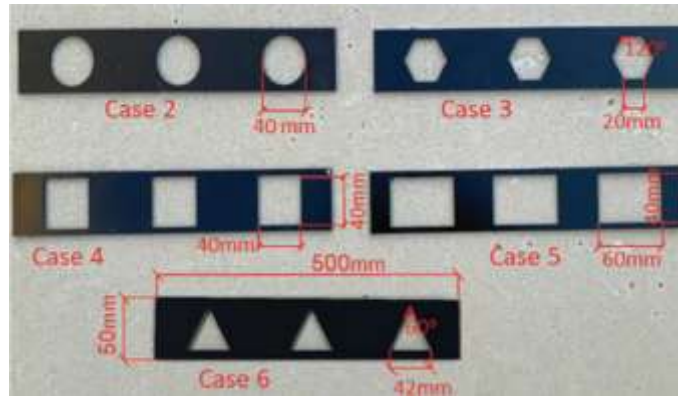


Figure II-12 : Géométrie des chicanes en V perforées de formes (circulaire hexagonale, carrée, rectangulaire et triangulaire) [42].

Abdi et al. [43] ont réalisé une analyse numérique en trois dimensions sur un capteur solaire plat muni d'ailettes en forme d'aile, en se servant d'une modélisation CFD fondée sur la technique des volumes finis et le modèle k- ϵ . L'étude des configurations se concentre sur l'arrangement des ailettes et la variation du nombre de Reynolds. Les données obtenues démontrent une amélioration du transfert thermique ainsi qu'une diminution des zones mortes au sein du canal.

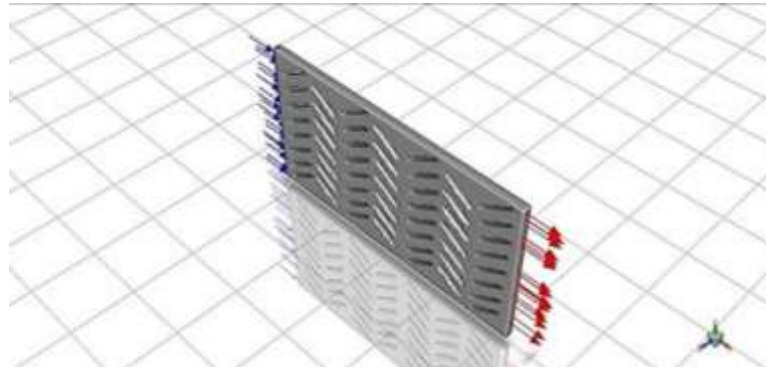


Figure II-13 : Capteur solaire plat muni d'ailettes en forme d'aile [43].

Priyam et Chand [44] ont réalisé une étude numérique concernant un capteur solaire à air muni d'un absorbeur à ailettes ondulées dans le but d'examiner l'impact de la longueur d'onde et de l'amplitude sur les performances thermo-hydrauliques. L'analyse a été effectuée grâce au programme **ANSYS Fluent**, en mettant en œuvre la technique des volumes finis pour diverses configurations géométriques et plusieurs valeurs du nombre de Reynolds. Les résultats montrent que les paramètres géométriques des ailettes ondulées ont un grand impact sur le transfert thermique et les pertes de charge. Les chercheurs ont trouvé une configuration idéale qui équilibre bien le transfert thermique et l'écoulement hydraulique.

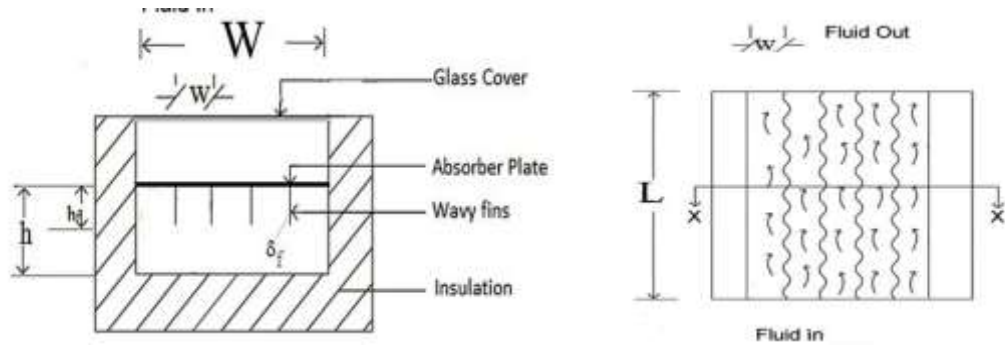


Figure II-14 : Capteur solaire à air muni d'un absorbeur à ailettes ondulées [44].

Rahmat et al. [45] ont mené une étude expérimentale et numérique sur un capteur solaire thermique à air plan équipé d'ailettes semi-stadium creuses disposées en réseau multi-niveau avec chicanes, en utilisant le logiciel ANSYS Fluent 23.2 pour la modélisation CFD. Cette configuration vise à améliorer le transfert thermique en augmentant la surface d'échange et la turbulence de l'écoulement. Les résultats obtenus montrent que le rendement thermique augmente avec le débit massique, atteignant 71,91 %, tandis que le rendement exergetique diminue avec l'augmentation du débit, avec un maximum de 17,06 % pour le plus faible débit. Les auteurs concluent que cette configuration permet d'améliorer les performances globales du capteur, tout en mettant en évidence un compromis entre efficacité énergétique et exergetique.

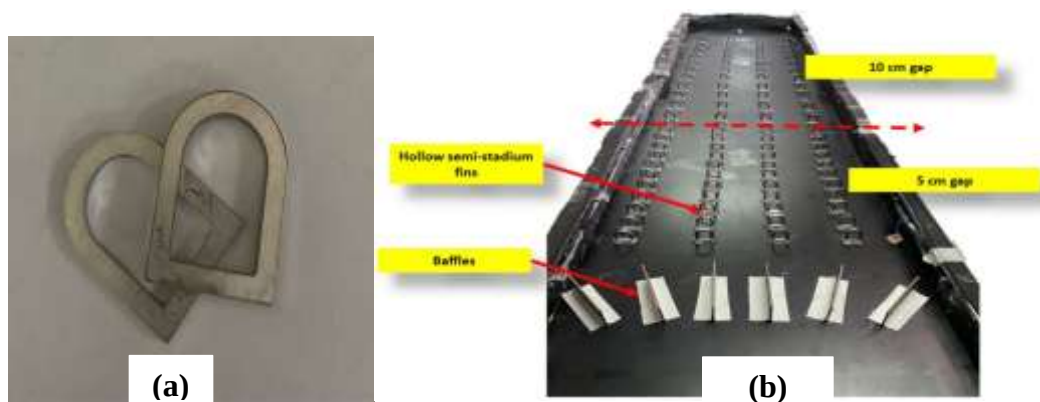


Figure II-15 : (a) structure des ailettes semi-stadium creuse (HSSF), (b) aperçu du FPSAC ajouté avec HSSF et des déflecteurs au niveau de la plaque absorbante [45].

II.3 Conclusion :

La revue de la littérature montre que plusieurs méthodes ont été proposées pour améliorer les performances des capteurs solaires plans, notamment en modifiant la disposition et la forme des ailettes. Plusieurs études ont analysé des configurations variées, comme les ailettes longitudinales, transversales ou décalées, ainsi que différentes formes (ondulées, en V, wavy, etc.), et ont montré que ces facteurs influencent fortement l'efficacité thermique et la production d'énergie. Cela permet de mieux comprendre les mécanismes d'échange thermique.



Chapitre III :

***Modélisation mathématique et simulation
numérique du problème physique***



III. 1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation mathématique et à la simulation numérique du problème physique étudié. Il présente la description du domaine de calcul, les hypothèses simplificatrices adoptées ainsi que les équations gouvernantes régissant l'écoulement et le transfert thermique.

Par ailleurs, les méthodes numériques adoptées, notamment la méthode des volumes finis, ainsi que les paramètres de simulation sous ANSYS Fluent, sont présentées afin d'assurer la fiabilité et la précision des résultats obtenus.

III.2 Description du domaine d'étude

La configuration géométrique du problème étudié est représentée à la figure **III-1**. Les dimensions du capteur solaire utilisées dans ce travail sont basées sur les données expérimentales de **Boudjema et al. [46]**. Le capteur solaire plan mesure 1,97 m de long, 0,98 m de large et possède une hauteur de canal de 0,10 m. Il est constitué des éléments suivants : un vitrage en verre avec une épaisseur de 0,004m, une plaque absorbante en aluminium également de 0,002m d'épaisseur, et une couche isolante en bois d'une épaisseur de 0,05 m.

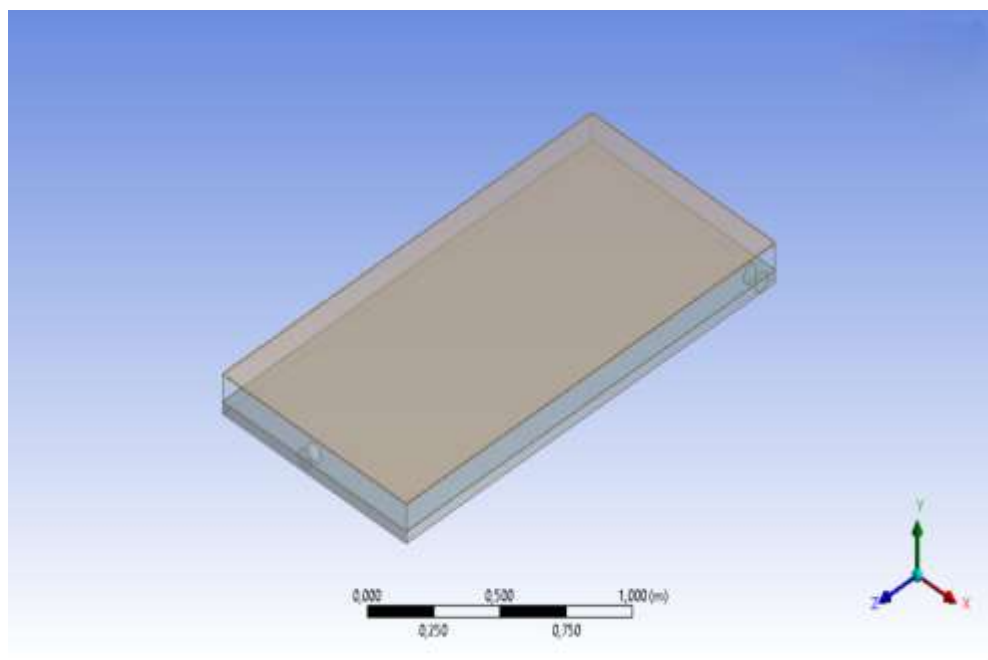


Figure III-1 : Domaine physique du capteur solaire plan étudié.

Les ailettes considérées dans cette étude sont de forme rectangulaire et agissent comme des éléments de perturbation de l'écoulement au sein du canal. Elles sont disposées sur la plaque absorbante selon une configuration décalée afin de renforcer le mélange du fluide et d'améliorer les échanges thermiques.

Elles sont caractérisées par les dimensions suivantes :

- **Longueur (L)** : 0,30 m.
- **Épaisseur (e)** : 0,07 m.
- **Hauteur (H)** : 0,02 m ; 0,05 m ; 0,08 m.
- **Espacement (S)** : 0,30 m.

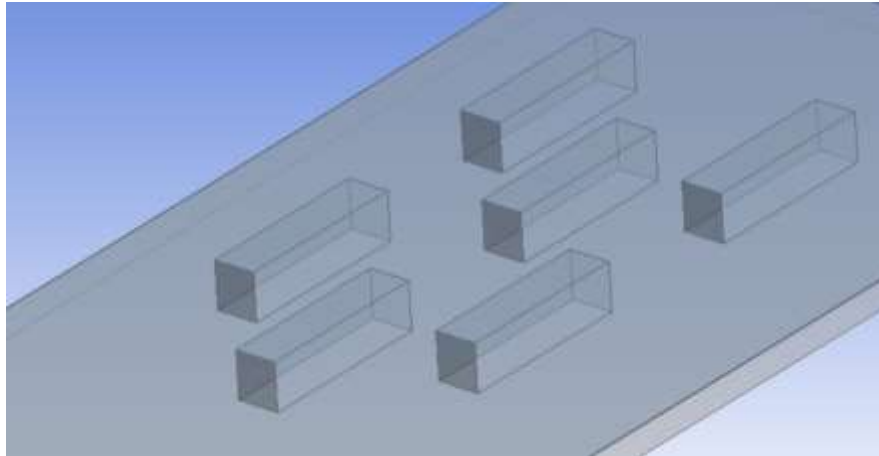


Figure III-2 : Schéma des ailettes utilisées dans le capteur solaire.

Dans cette étude, deux analyses paramétriques sont réalisées afin d'évaluer l'effet des ailettes sur les performances thermo-hydrauliques du système. La première porte sur l'influence du nombre d'ailettes, tandis que la seconde concerne l'influence de la hauteur.

Les cas étudiés sont présentés dans le Tableau **III-1**, et les caractéristiques géométriques détaillées de chaque modèle sont regroupées dans le Tableau **III-2**.

Influence de nombre des ailettes		Nombre	Influence de la hauteur d'ailettes		Hauteur (m)
	Cas 01	-		H1	0,02
	Cas 02	3		H2	0,05
	Cas 03	6		H3	0,08

Tableau III-1 : Différents cas physiques étudiés.

		Les différents modèles étudiés					
Valeur (m)	Dimension	Cas 01	Cas 02	Cas 03	H1	H2	H3
	Longueur de capteur (L)	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97
	Largeur de capteur (l)	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	Hauteur d'ailette (H)	-	0,08	0,08	0,02	0,05	0,08
	Épaisseur de vitrage	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
	Épaisseur de l'absorbeur	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	Épaisseur de l'isolant	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	La veine d'air	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	Nombre d'ailette	-	3	6	6	6	6

Tableau III-2 : Les caractéristiques géométriques de différents capteurs solaires étudiés.

III.3 Hypothèses simplificatrices

La modélisation du problème considéré s'appuie sur plusieurs hypothèses simplificatrices relatives à la configuration géométrique, à la nature de l'écoulement, aux modes de transfert thermique et à l'absence de phénomènes de changement de phase. Ces hypothèses rendent la résolution numérique fiable tout en réduisant la complexité du modèle physique. Elles sont les suivantes :

- L'écoulement est supposé stationnaire et en régime turbulent.
- Le fluide est newtonien, visqueux et incompressible.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide (C_{pf} , λ_f , ρ_f , μ_f) et du solide (C_{ps} , λ_s , ρ_s) sont considérées constantes.
- Les profils de vitesse et de température sont uniformes à l'entrée du capteur.

III.4 Équations gouvernantes

Le comportement thermique et hydraulique d'un fluide dans un capteur solaire plan est décrit par les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie [47].

Ces équations sont établies pour un régime permanent et exprimées en coordonnées cartésiennes tridimensionnelles.

III.4.1 Conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse est la suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \quad (\text{III-1})$$

- L'écoulement est permanent $\Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

Donc l'équation devient :

$$\frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \quad (\text{III- 2})$$

III.4.2 Conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes)

Les équations de conservation de la quantité de mouvement selon les trois directions s'écrivent :

- Selon la direction x :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III-3})$$

- Selon la direction y :

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III- 4})$$

- Selon la direction z :

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III- 5})$$

III.4.3 Conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie à travers le volume de contrôle est donnée par :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III- 6})$$

III. 5 Modèle de turbulence k-ε standard

Le modèle standard de turbulence k-ε est parmi les modèles les plus couramment employés pour la simulation des flux turbulents dans le domaine de l'ingénierie. Il se base sur la résolution de deux équations de transport supplémentaires :

- L'énergie cinétique turbulente k.
- Le taux de dissipation ε.

III.5.1 Équation de transport de l'énergie cinétique turbulente (k)

L'énergie cinétique turbulente **k** représente l'énergie associée aux fluctuations de vitesse dans l'écoulement turbulent. Elle permet de caractériser l'intensité de la turbulence dans le fluide. L'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (\text{III- 7})$$

Où :

- **k** : énergie cinétique turbulente.
- **ρ** : masse volumique du fluide.
- **u_i**: composante de la vitesse dans la direction i.
- **μ** : viscosité dynamique du fluide.
- **μ_t** : viscosité turbulente.
- **σ_k** : constante empirique du modèle.
- **G_k** : terme de production de l'énergie turbulente.
- **ε** : taux de dissipation de l'énergie turbulente.

✚ **Viscosité turbulente μ_t :**

La viscosité turbulente est calculée à partir de la relation suivante :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{III-8})$$

III.5.2 Équation de transport du taux de dissipation

Le taux de dissipation **ε** indique la vitesse avec laquelle cette énergie turbulente est transformée en chaleur par l'effet de la viscosité du fluide. L'équation de transport du taux de dissipation est donnée par :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) G_k - C_{2\varepsilon} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (\text{III- 9})$$

- **C_{1ε}**, **C_{2ε}** sont des constantes déterminées empiriquement.
- **σ_k**, **σ_ε** sont respectivement les nombres de Prandtl turbulents relatifs à l'énergie cinétique turbulente et au taux de dissipation

Le terme de production **G_k** donné par :

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (\text{III- 10})$$

Les constantes du modèle k-ε standard sont regroupées dans le tableau suivant :

C_μ	C_{1ε}	C_{2ε}	σ_k	σ_ε
----------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	----------------------

0,09	1,44	1,92	1	1,3
------	------	------	---	-----

Tableau III-3 : Coefficients du modèle de turbulence k-ε.**III.6 Paramètres caractéristiques****a) Nombre de Reynolds**

Le nombre de Reynolds, noté Re , exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité dans le fluide en mouvement étudié. Son équation est la suivante :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot Dh}{\mu}$$

Où :

- ρ : masse volumique du fluide
- v : vitesse moyenne.
- μ : viscosité dynamique.
- Dh : diamètre hydraulique du canal.

Le diamètre hydraulique est défini par :

$$Dh = \frac{4 \times A}{P}$$

- A : Section de passage du fluide.
- P : périmètre mouillé.

b) Nombre de Nusselt

Ce paramètre nous fournit une indication de la proportion de chaleur transférée par convection par rapport à celle transférée par conduction.

$$Nu = \frac{h Dh}{\lambda}$$

Où :

- h : coefficient de convection.
- λ : conductivité thermique du fluide.
- Dh : diamètre hydraulique.

c) Facteur de Friction

$$f = \frac{2 \Delta P Dh}{\rho L v^2}$$

- ΔP : perte de charge.
- L : longueur du canal.

d) Performance Evaluation Criterion (PEC)

Le Performance Evaluation Criterion (PEC), également connu sous le nom de Thermo-hydraulic Performance Factor (TPF), constitue un indicateur global permettant d'évaluer les performances thermo-hydrauliques d'un système en tenant compte à la fois de l'amélioration du transfert de chaleur et de la pénalité hydraulique associée à l'augmentation des pertes de charge [48].

$$\text{PEC} = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{\frac{1}{3}}}$$

- **Nu** : nombre de Nusselt du cas étudié.
- **Nu₀** : nombre de Nusselt du cas de référence.
- **f** : facteur de friction du cas étudié.
- **f₀** : facteur de friction du cas de référence.

Ce critère permet de statuer objectivement sur la pertinence énergétique d'une configuration :

- **PEC > 1** : le gain en transfert thermique compense la pénalité hydraulique supplémentaire ; la configuration est énergétiquement avantageuse.
- **PEC < 1** : la perte de charge induite dépasse le bénéfice thermique apporté ; la configuration n'est pas justifiée du point de vue énergétique.
- **PEC = 1** : le gain thermique et la pénalité hydraulique se compensent exactement.

III.7 Méthodes de résolution

III.7.1 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis (**MVF**) constitue une forme particulière de la méthode des résidus pondérés dans laquelle la fonction de pondération est prise égale à l'unité. Cette méthode repose sur la discrétisation du domaine d'étude en un ensemble de volumes de contrôle appelés volumes finis.

Chaque volume de contrôle est construit de manière à entourer un nœud principal **P**. Les limites de ce volume sont définies par différentes interfaces selon la dimension du problème étudié :

- Deux interfaces dans le cas monodimensionnel, notées **e** et **w** (est et ouest).
- Quatre interfaces dans le cas bidimensionnel, notées **e**, **w**, **n**, **s** (est, ouest, sud et nord).
- Six interfaces dans le cas tridimensionnel, notées **e**, **w**, **s**, **n**, **t**, **b** (est, ouest, sud, nord, haut et bas).

Le nœud principal **P** est entouré par des nœuds voisins qui interviennent dans le processus de discrétisation :

- **E** et **W** en 1D
- **E, W, S, N** en 2D
- **E, W, S, N, T, B** en 3D

Le principe fondamental de la méthode consiste à intégrer l'équation différentielle gouvernante sur chaque volume de contrôle. Pour évaluer les intégrales apparaissant dans cette formulation, la variable inconnue est approximée par une fonction d'interpolation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance, etc.) entre deux nœuds adjacents.

Après cette étape, la forme intégrale de l'équation est discrétisée sur l'ensemble du domaine de calcul. Cette discrétisation conduit finalement à un système d'équations algébriques, dépendant des valeurs nodales de la variable étudiée, qui peut ensuite être résolu numériquement.

III.7.1.1 Les étapes de la méthode des volumes finis

1. Discrétisation du domaine de calcul

- Découpage du domaine en volumes de contrôle (maillage).
- Chaque volume contient un point central où les grandeurs sont évaluées.

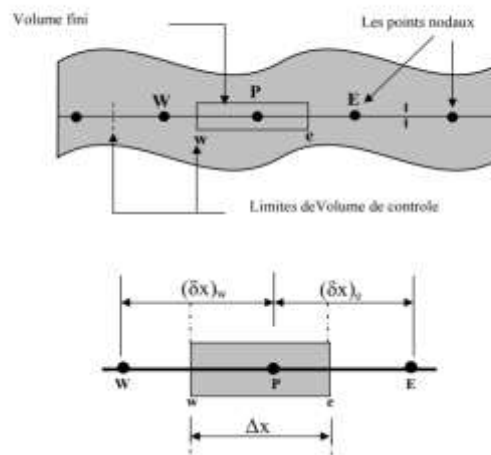


Figure III-3 : Discrétisation en volumes finis dans le cas monodimensionnel [49].

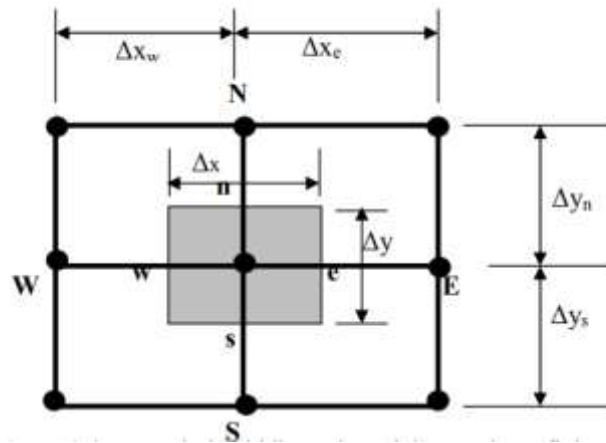


Figure III-4 : Description bidimensionnelle d'un volume fini [49].

2. Intégration des équations sur chaque volume de contrôle :

- Application du théorème de Gauss pour transformer les dérivées en flux à travers les faces.

3. Approximation des flux aux interfaces :

- Calcul des flux convectifs et diffusifs entre les volumes adjacents.

4. Résolution des équations discrétisées

- Transformation en un système d'équations algébriques.
- Utilisation de méthodes numériques pour la résolution (Gauss-Seidel, TDMA...).

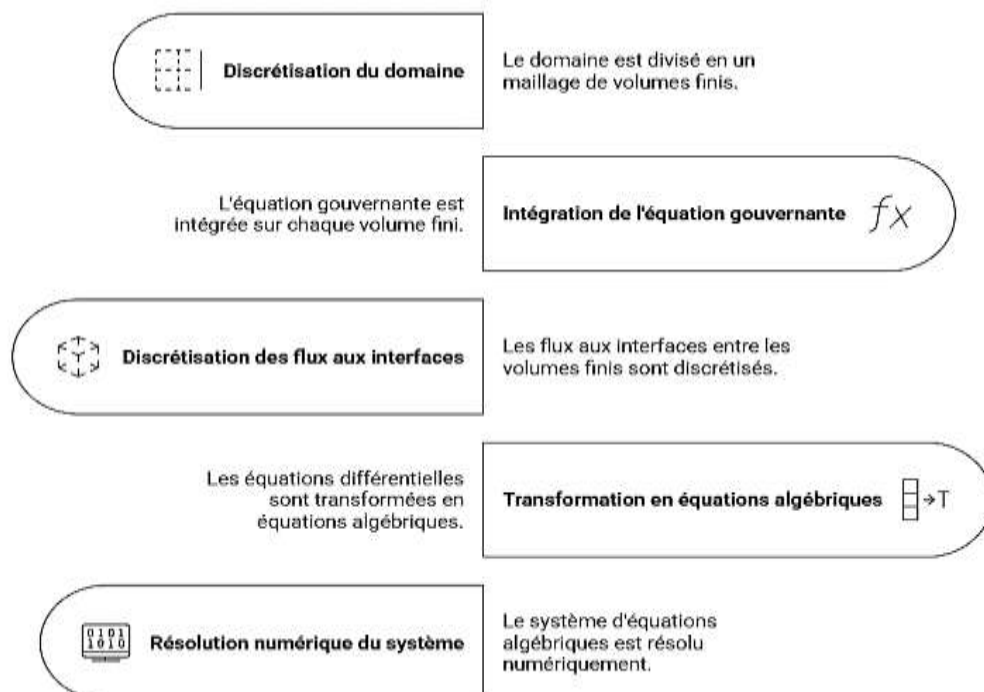


Figure III-5 : Les étapes de la méthode des volumes finis.

III.8 Principes des codes CFD

Les codes de dynamique des fluides numériques (**CFD**) permettent de résoudre de manière numérique les équations qui régissent le mouvement des fluides, notamment les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de conservation de l'énergie. Il existe une multitude de codes CFD et pour nos besoins spécifiques, nous avons sélectionné le code Fluent Workbench, car il répond parfaitement à nos exigences de calcul en termes de simulation tridimensionnelle d'écoulements turbulents avec transfert de chaleur.

III.9 Présentation du logiciel ANSYS Workbench

ANSYS Workbench est une plateforme de simulation numérique qui aide les ingénieurs à modéliser et analyser facilement des systèmes mécaniques, thermiques et fluidiques. Grâce à son interface graphique intuitive, il devient plus simple de créer des modèles, de générer le maillage, de définir les conditions aux limites et d'analyser les résultats.

La plateforme regroupe plusieurs modules spécialisés, comme Mechanical pour la mécanique des solides et Fluent pour la simulation des écoulements de fluides (CFD). Cela permet de réaliser des simulations précises et fiables. Sa structure modulaire et l'automatisation des tâches font d'**ANSYS Workbench** un outil particulièrement pratique pour optimiser des conceptions complexes et tester différents scénarios de fonctionnement, comme cela a été le cas dans ce travail pour l'analyse 3D du capteur solaire plan.

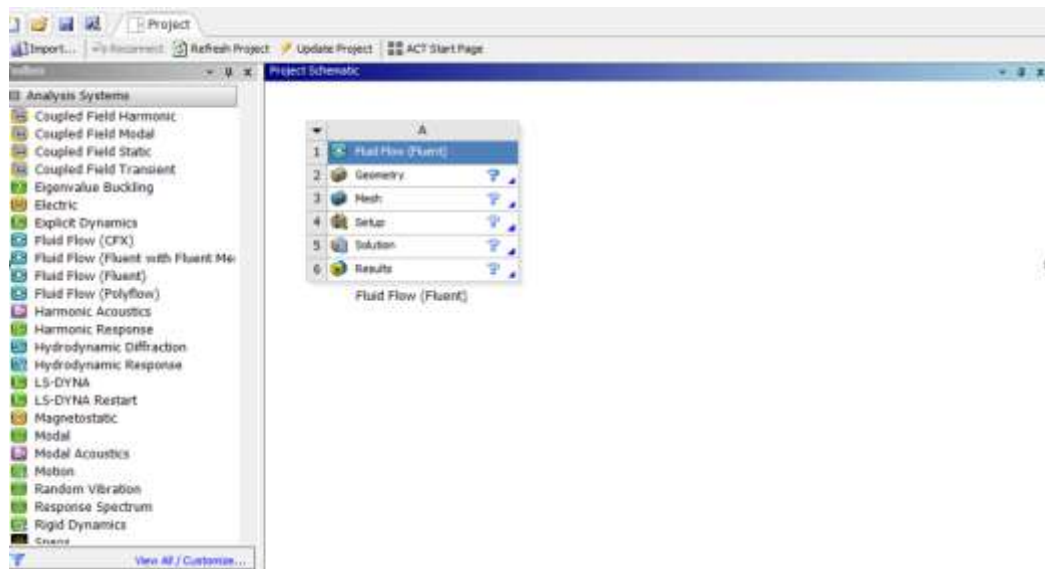


Figure III-6 : Interface de logiciel ANSYS Workbench.

III.9.1 Les étapes de simulation sous ANSYS Workbench

La simulation numérique dans **ANSYS Workbench** se déroule généralement en quatre étapes principales : le prétraitement, la définition des modèles physiques, la résolution numérique et le post-traitement.

1. Prétraitement :

- Création ou importation de la géométrie à l'aide d'ANSYS Design Modeler ou d'un logiciel CAO.
- Génération du maillage du domaine de calcul à l'aide d'ANSYS Meshing.

2. Définition des modèles physiques :

- Sélection du modèle d'écoulement approprié (laminaire, turbulent, multiphasique, etc.).
- Détermination des conditions aux limites (vitesse d'entrée, pression de sortie, température, flux thermique, etc.).
- Le choix des modèles de transfert de chaleur nécessaires à la simulation.

3. Résolution numérique :

- Choix de la méthode de discrétisation basée sur la méthode des volumes finis.
- Sélection de l'algorithme de résolution (SIMPLE ou PISO, etc.).
- Définition des paramètres de calcul tels que le nombre d'itérations et les critères de convergence.

4. Post-traitement :

- Visualisation des champs de vitesse, pression et température.
- Génération de courbes et de rapports d'analyse pour interpréter les résultats.
- Validation et optimisation des performances du modèle numérique.

III.9.1.1 Géométrie du modèle

La géométrie a été réalisée à l'aide du logiciel **ANSYS Design Modeler**, permettant la création de sketches 2D (dessin), ainsi que la génération de modèles 3D par extrusion, révolution et autres opérations géométriques. Cet outil offre également la possibilité de manipuler et d'optimiser les objets 3D. Les différents cas étudiés sont présentés dans le tableau **(III-4)** ci-dessous :

Géométrie	Cas
-----------	-----

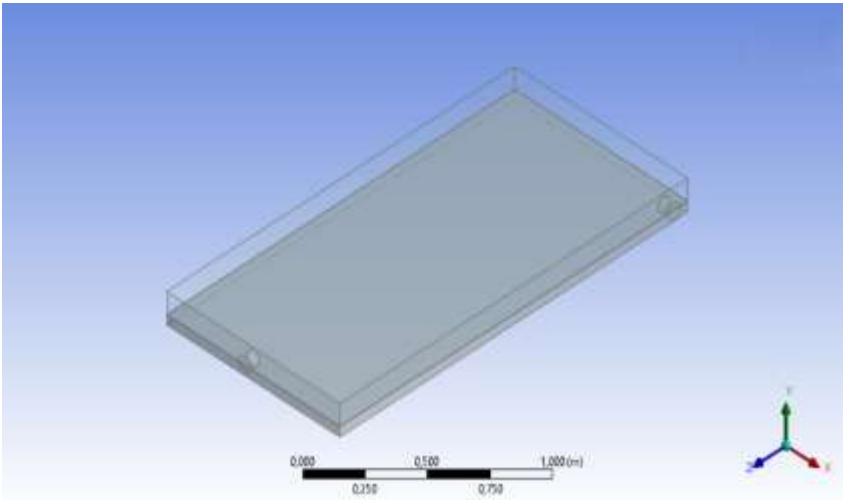
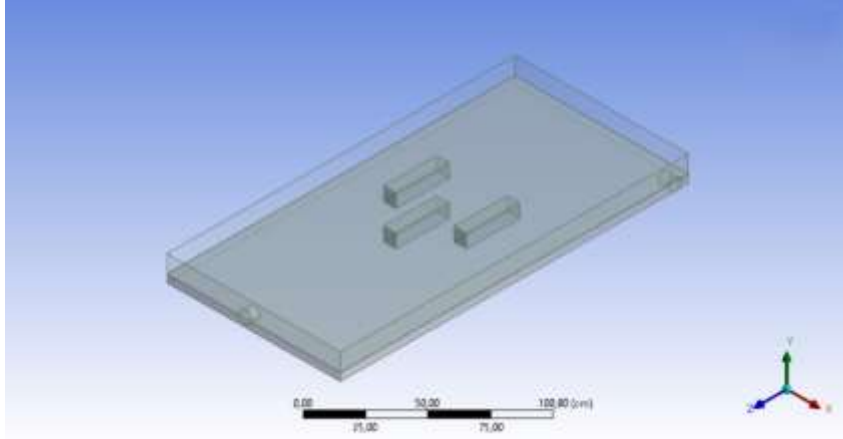
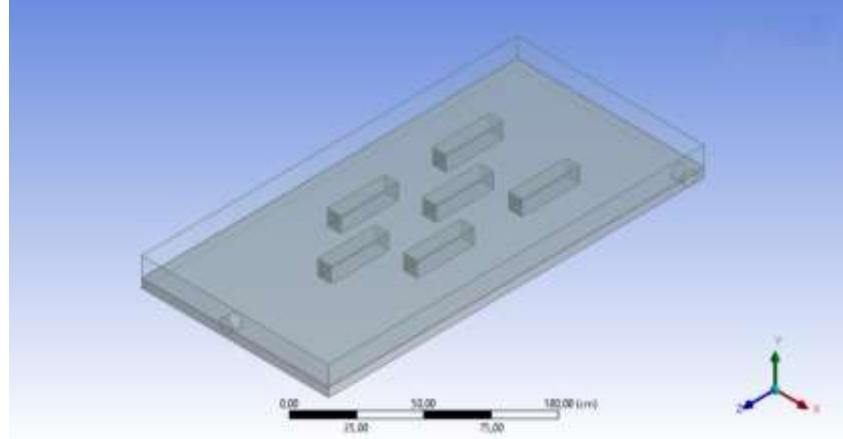
	Cas 01 : capteur solaire plan sans ailettes
	Cas 02 : capteur solaire plan muni de trois ailettes décalées
	Cas 03 : capteur solaire plan muni de six ailettes décalées

Tableau III-4 : Configurations géométriques des cas étudiés du capteur solaire plan.

III.9.1.2 Maillage du modèle

Le maillage du domaine de calcul a été réalisé à l'aide du module **ANSYS Meshing**. Un maillage non structuré composé d'éléments **tétraédriques** a été appliqué à l'ensemble du domaine de calcul. Ce type de maillage offre une grande flexibilité géométrique, particulièrement adaptée aux configurations complexes telles que les ailettes décalées rectangulaires. La fonction de dimensionnement automatique (**Automatic Sizing**) d'ANSYS Meshing a été utilisée, permettant au solveur de détecter automatiquement les zones à forts gradients géométriques notamment les faces et les arêtes des ailettes et d'adapter localement la taille des éléments en conséquence, garantissant ainsi une résolution suffisante dans les régions critiques du domaine. Les figures **III-7**, **III-8** et **III-9** illustrent le maillage obtenu.

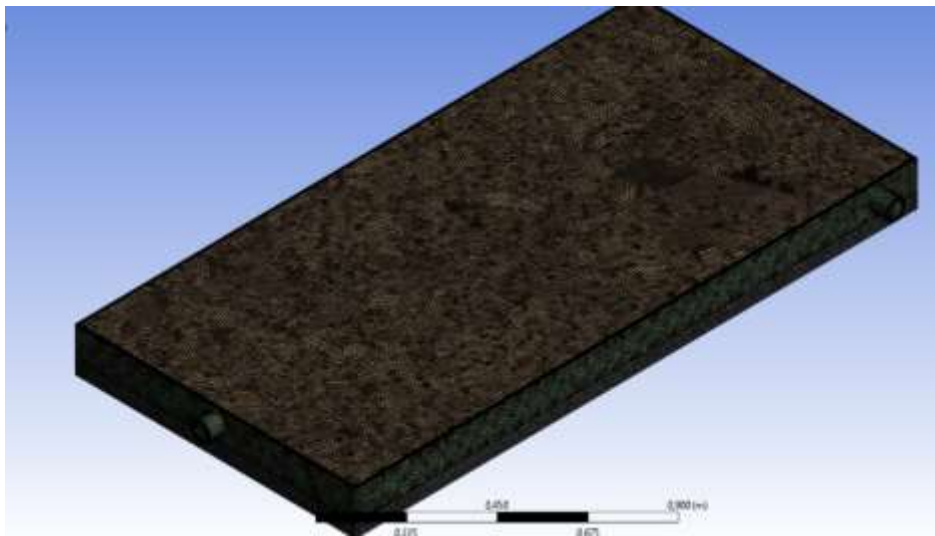


Figure III-7 : Vue globale du maillage du capteur solaire plan.

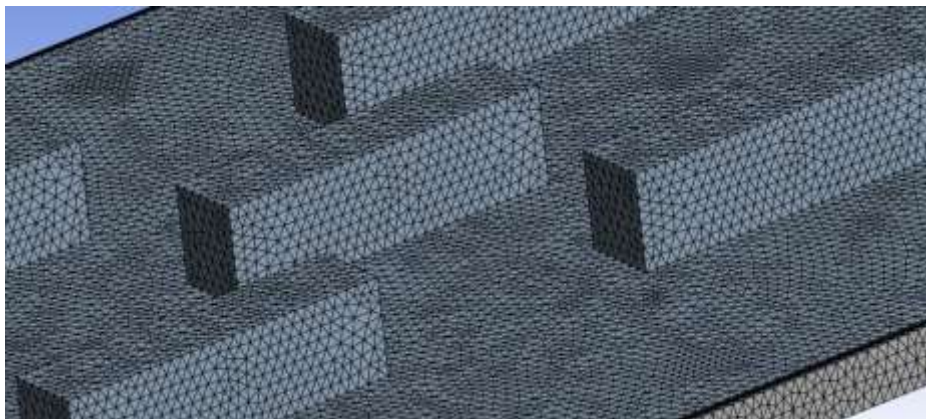


Figure III-8 : Zoom sur le maillage au niveau des ailettes décalées.



Figure III-9 : Zoom sur le maillage des ailettes décalées.

III.9.2 Paramétrage sous ANSYS Fluent

III.9.2.1 Choix de mode de calcul

Fluent offre deux modes de calcul :

- **Le mode double précision** : Dans ce mode, les nombres à virgule flottante sont représentés sur 64 bits.
- **Le mode simple précision** : il utilise une représentation à 32 bits.



Figure III-10 : Fenêtre de démarrage FLUENT.

III.9.2.2 Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés

Les propriétés thermo-physiques des matériaux intégrés à la simulation jouent un rôle déterminant pour reproduire avec précision la réponse thermique du système étudié. Dans le

cadre de ce travail, l'air sert de fluide caloporteur dans la zone fluide, tandis que l'aluminium, le verre et le bois sont retenus respectivement pour l'absorbeur, le vitrage et la couche isolante.

Les valeurs des différentes propriétés retenues pour ces matériaux sont présentées dans le tableau suivant.

Matériels	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.k)	Conductivité thermique (W/m.k)	Viscosité (kg/m. s)
Air	1,225	1006,43	0,0242	$1,789 \times 10^{-5}$
Aluminium	2719	871	202,4	-
Verre	2530	840	1	-
Bois	700	2310	0,173	-

Tableau III-5 : Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans la simulation.

III.9.2.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites varient selon le problème physique étudié, et leur cohérence avec les modèles numériques utilisés influence directement la convergence des calculs ainsi que la fiabilité des résultats obtenus. En mécanique des fluides numérique (CFD), plusieurs types de conditions aux limites peuvent être définis.

Dans notre cas, la résolution du système d'équations nécessite l'introduction des conditions aux limites suivantes :

- **Entrée** : un débit massique et une température d'air uniforme sont imposées à l'entrée du domaine de calcul.
- **Au niveau de l'absorbeur et le vitrage** : Un flux de chaleur uniforme est imposé au niveau de l'absorbeur et le vitrage.
- **Sortie** : A la sortie du domaine de calcul, une pression atmosphérique est appliquée comme conditions aux limites.

Zone	Type de condition
Absorbeur	Wall
Vitrage	Wall
Isolant	Wall
Murs latéraux	Wall
Ailettes	Wall

Zone	Type de condition
Entrée	Mass-Flow inlet
Sortie	Pressure-outlet
Domaine fluide	Fluid
Domaine solide	Solid

Tableau III-6 : Récapitulatif des conditions aux limites du domaine de calcul.

III.9.2.4 Schémas numériques

a) Résolution du couplage vitesse-pressure :

Pour résoudre les équations de Navier-Stokes, il faut obtenir en même temps les champs de vitesse et de pression. Ce couplage est délicat dans les écoulements incompressibles. Le logiciel ANSYS Fluent propose plusieurs algorithmes basés sur une approche prédiction correction : SIMPLE, SIMPLEC, PISO et COUPLED.

b) Schémas de discrétisation spatiale :

Les schémas de discrétisation sont utilisés pour approcher les différents termes des équations différentielles sur le maillage considéré. Le type de schéma choisi a un impact direct sur la précision du calcul numérique et sur la stabilité de la solution que l'on obtient.

Les schémas utilisés dans ce travail sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Schéma	Type
Pression	Second Order
Quantité de mouvement	Second-order Upwind
Énergie	Second-order Upwind
Énergie cinétique turbulente (k)	Second-order Upwind
Taux de dissipation turbulente (ϵ)	Second-order Upwind

Tableau III-7 : Schémas de discrétisation spatiale par FLUENT.

c) Facteurs de sous-relaxation :

En raison du caractère non linéaire des équations discrétisées, il faut surveiller l'évolution des variables au fil des itérations. Pour cela, on introduit des facteurs de sous-relaxation.

Ces facteurs réduisent l'amplitude des corrections appliquées aux variables entre deux itérations consécutives, ce qui renforce la stabilité du processus de résolution.

Les valeurs retenues dans ce travail figurent dans le tableau **III-8** suivant.

Variable	Facteur de sous-relaxation
Pression	0,5
Densité	1
Force de volume	1
Quantité de mouvement	0,5
Énergie	0,75
Énergie cinétique turbulente (k)	0,75
Taux de dissipation turbulente (ϵ)	0,75
Viscosité turbulente	1

Tableau III-8 : Facteurs de sous-relaxation.

d) La convergence :

On dit qu'une solution numérique est convergente lorsque les résidus des équations se réduisent et que les valeurs physiques s'établissent.

Dans ANSYS Fluent, la convergence est considérée comme atteinte lorsque les résidus de continuité et de mouvement sont inférieurs à 10^{-5} , tandis que le résidu de l'énergie doit être inférieur à 10^{-6} .

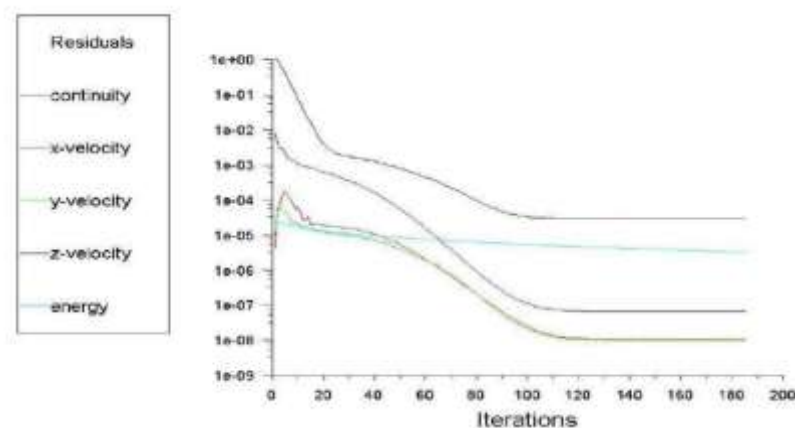


Figure III-11 : Évolution des résidus en fonction du nombre d'itérations.

III.10 Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation mathématique et la démarche numérique utilisée pour étudier le capteur solaire plan. Des hypothèses simplificatrices ont été posées, puis les

équations clés et les paramètres de simulation ont été définis pour garantir des résultats fiables et précis.

Ces résultats seront analysés en détail et interprétés dans le chapitre suivant.



Chapitre IV : Résultats et Interprétation



IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des simulations numériques tridimensionnelles effectuées sur un capteur solaire plan équipé d'ailettes décalées. Tout d'abord, le modèle numérique a été validé. Ensuite, deux études ont été réalisées pour évaluer les performances du système. La première étude examine comment le nombre d'ailettes affecte les performances thermo-hydrauliques. La seconde étude se concentre sur l'impact de la hauteur des ailettes sur les performances du capteur solaire.

IV.2 Validation du modèle numérique

Pour valider le modèle utilisé par le code de calcul **ANSYS Fluent**, les données expérimentales obtenues par **Boujema et al. [46]** ont été adoptées.

La comparaison de la variation de la température de l'air à la sortie du capteur en fonction du flux solaire, obtenue numériquement et expérimentalement par **Boujema et al. [45]**, a été réalisée et est présentée sur la **figure IV-1**.

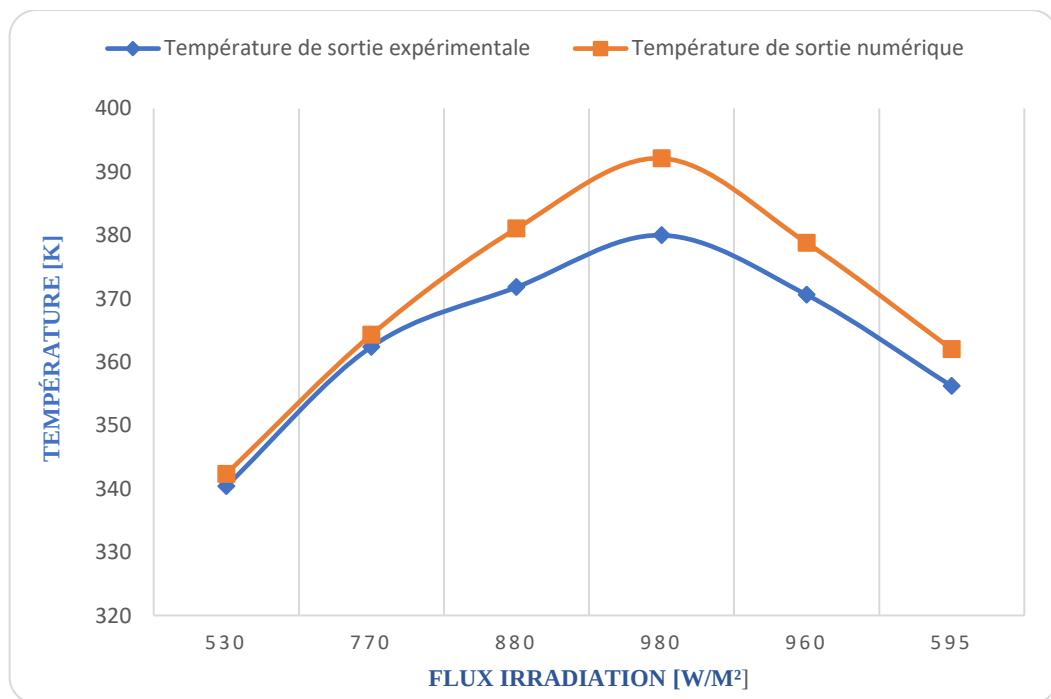


Figure IV-1 : Évolution de la température de sortie en fonction du flux d'irradiation solaire : comparaison avec les résultats de **Boudjema et al. [46]**.

La figure **IV-1** compare les températures de sortie obtenues numériquement et expérimentalement en fonction du flux d'irradiation solaire. On remarque que les deux courbes évoluent de la même façon : la température monte progressivement avec le flux solaire, atteint son pic à 980 W/m², puis redescend. Les valeurs numériques restent proches des mesures

expérimentales tout au long de la plage étudiée, avec un écart qui ne dépasse pas 3 %. Cela confirme que le modèle numérique que nous avons adopté est fiable.

IV.3 Effet de nombre des ailettes

Dans cette section, l'objectif est d'examiner comment le nombre d'ailettes décalées affecte les performances thermiques et hydrauliques d'un capteur solaire plan. Pour ce faire, nous avons considéré trois configurations différentes :

- La première configuration, appelée **Cas 01**, est un canal sans ailettes.
- La deuxième configuration, **Cas 02**, est un canal équipé de 3 ailettes décalées.
- La troisième configuration, **Cas 03**, est un canal avec 6 ailettes décalées.

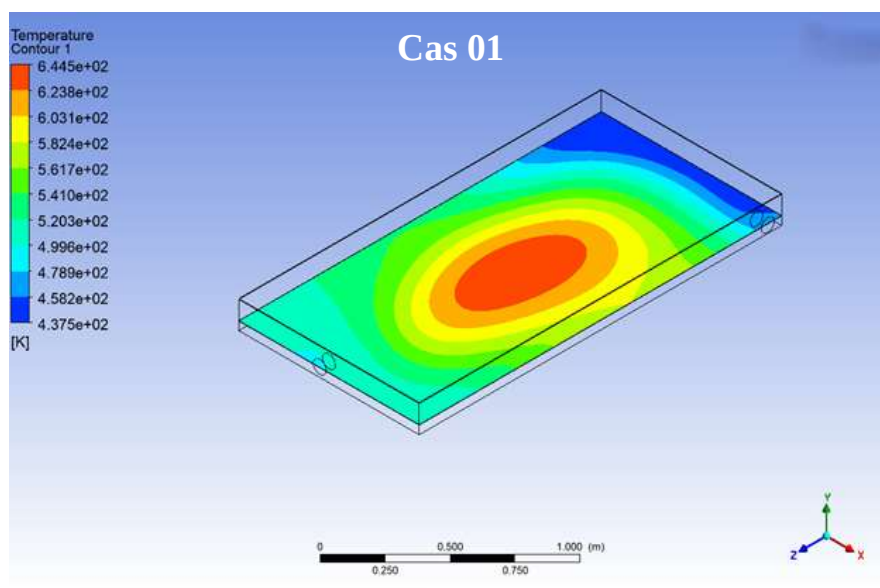
Toutes les simulations ont été effectuées dans des conditions aux limites identiques.

Cela permet d'assurer que les comparaisons entre ces différentes configurations soient objectives.

Pour un débit massique variant de 0,02 à 0,06 kg/s, une température d'entrée de 305 K et un flux volumique imposé sur la plaque absorbante de 980 W/m². Les figures suivantes illustrent les contours de température et de pression obtenus pour un capteur solaire plan de longueur 1,97 m et pour différentes configurations d'ailettes décalées.

IV.3.1 Contours de température

Pour voir comment la chaleur se répartit dans le canal, on présente les contours de température pour les trois configurations. Cela nous aide à trouver les endroits où il y a beaucoup d'échange de chaleur et à comprendre comment les ailettes aident à rendre la température du fluide caloporteur plus uniforme le long du canal.



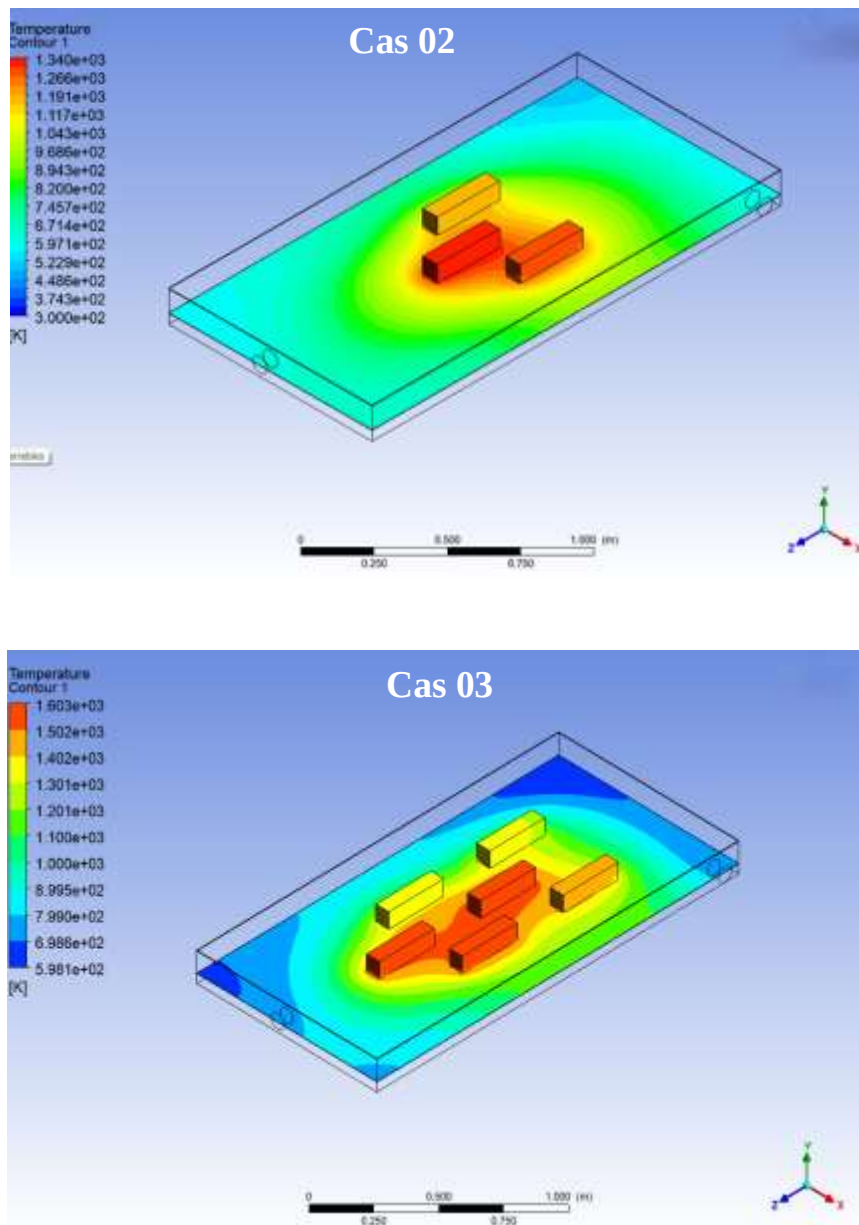


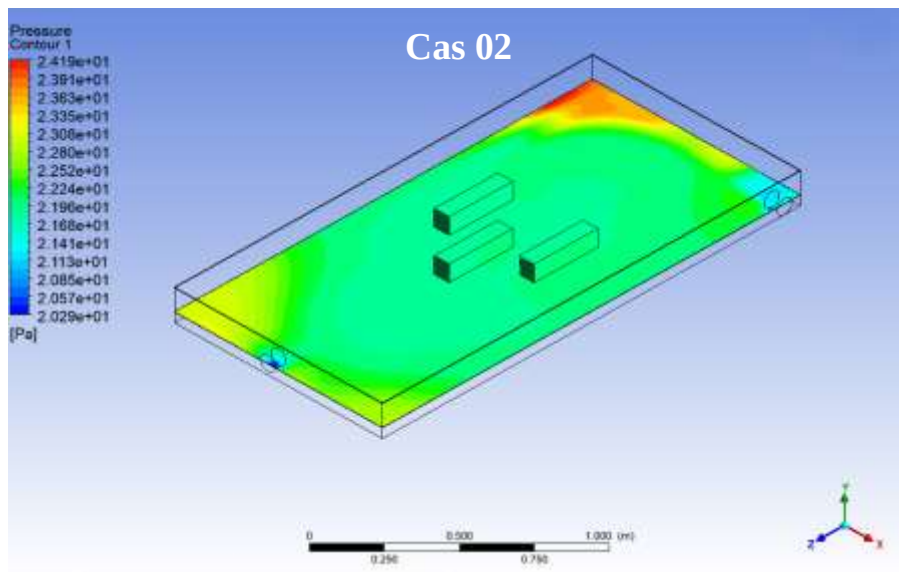
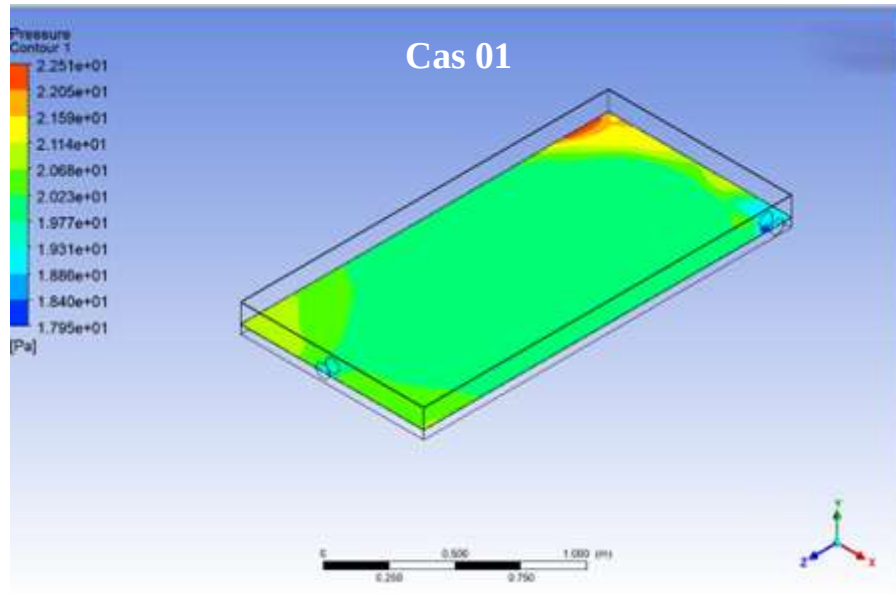
Figure IV-2 : Contours de température pour les trois configurations du capteur solaire (Cas 01 : sans ailettes, Cas 02 : 3 ailettes décalées et Cas 03 : 6 ailettes décalées).

- **Interprétations**

La figure IV-2 présente les contours de température des trois configurations étudiées. Le Cas 01 montre une distribution thermique progressive, caractéristique d'un écoulement peu perturbé où le transfert de chaleur est principalement assuré par la convection pariétale. L'ajout d'ailettes décalées (**Cas 02 et Cas 03**) augmente la surface d'échange thermique et perturbe l'écoulement, favorisant le renouvellement de la couche limite thermique et un meilleur mélange du fluide. Bien que des zones de recirculation apparaissent en aval des ailettes, l'augmentation du nombre d'ailettes de 3 à 6 renforce les échanges thermiques, améliore l'homogénéité de la température et conduit à une température de sortie plus élevée.

IV.3.2 Contours de pression

Les contours de pression statique sont examinés pour chaque configuration afin d'évaluer l'impact des ailettes sur le champ de pression. Cela nous permet de voir comment les ailettes affectent la pression et où les pertes de charge se produisent à l'intérieur du canal.



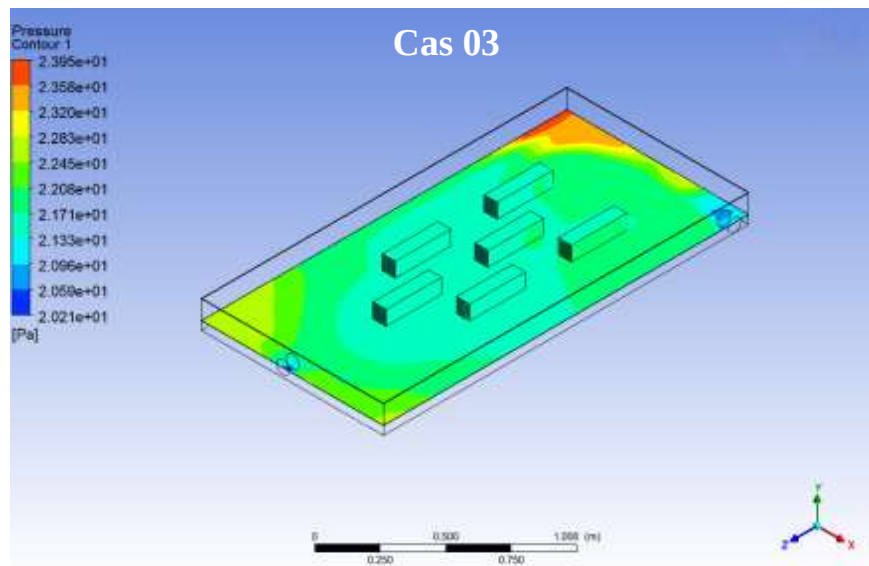


Figure IV-3 : Contours de pression pour les trois configurations du capteur solaire (**cas 01** : sans ailettes, **Cas 02** : 3 ailettes décalées et **Cas 03** : 6 ailettes décalées).

- **Interprétations**

La figure **IV-3** présente les contours de pression statique obtenus pour les trois configurations étudiées.

Le **Cas 01** montre une décroissance progressive et quasi uniforme de la pression entre l'entrée et la sortie, traduisant un écoulement pleinement développé où les pertes de charge sont principalement dues aux frottements visqueux.

L'introduction des ailettes décalées modifie fortement le champ de pression, avec l'apparition de zones de haute pression en amont des obstacles et de zones de basse pression en aval associées aux recirculations et aux sillages tourbillonnaires. La disposition décalée favorise également la déviation de l'écoulement et améliore son mélange.

Pour le **Cas 03**, la répartition devient plus homogène et les zones mortes sont réduites, ce qui conduit à une meilleure optimisation thermo-hydraulique. Malgré l'augmentation du nombre d'ailettes, la configuration reste plus efficace que le **Cas 02** en termes de pertes de charge globales.

IV.3.3 Influence du débit massique sur la température de sortie

L'évolution de la température de sortie en fonction du débit massique est tracée pour les trois configurations. Cela nous aide à comprendre à quel point les performances thermiques sont affectées par le débit. Nous pouvons ainsi comparer comment les différentes configurations se comportent sur toute la plage de débits étudiée, allant de 0,02 à 0,06 Kg/s.

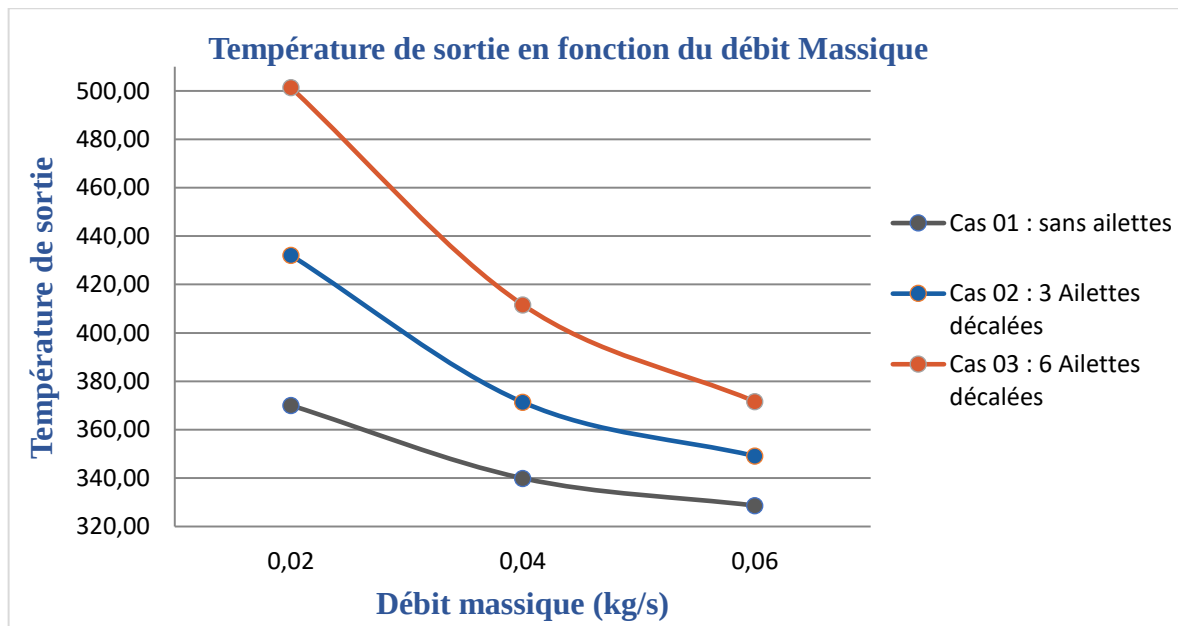


Figure IV-4 : Évolution de la température de sortie en fonction du débit massique pour les trois configurations (**Cas 01 : sans ailettes**, **Cas 02 : 3 ailettes décalées** et **Cas 03 : 6 ailettes décalées**).

- **Interprétation**

La **figure IV-4** présente l'évolution de la température de sortie en fonction du débit massique pour les trois configurations étudiées, sur une plage comprise entre 0,02 et 0,06 kg/s.

Dans tous les cas, la température diminue lorsque le débit augmente, ce qui s'explique par la réduction du temps de séjour du fluide dans le canal et donc un échange thermique moins important. La hiérarchie des performances reste constante : **Cas 03 > Cas 02 > Cas 01**, montrant l'effet positif des ailettes décalées sur le transfert thermique. Les écarts entre configurations sont plus importants à faibles débits, puis diminuent lorsque le débit augmente, en raison de la réduction du temps d'échange.

Le **Cas 03** présente la variation la plus marquée, car son intensification du mélange thermique est plus efficace à faibles vitesses.

IV.3.4 Comparaison des configurations

Pour comparer directement les trois configurations, nous représentons la température de sortie, et la perte de charge, en fonction des cas où le débit massique est fixé à 0,02 kg/s. Cela nous permet de constater clairement quelle configuration est la plus performante en termes de thermo-hydraulique.

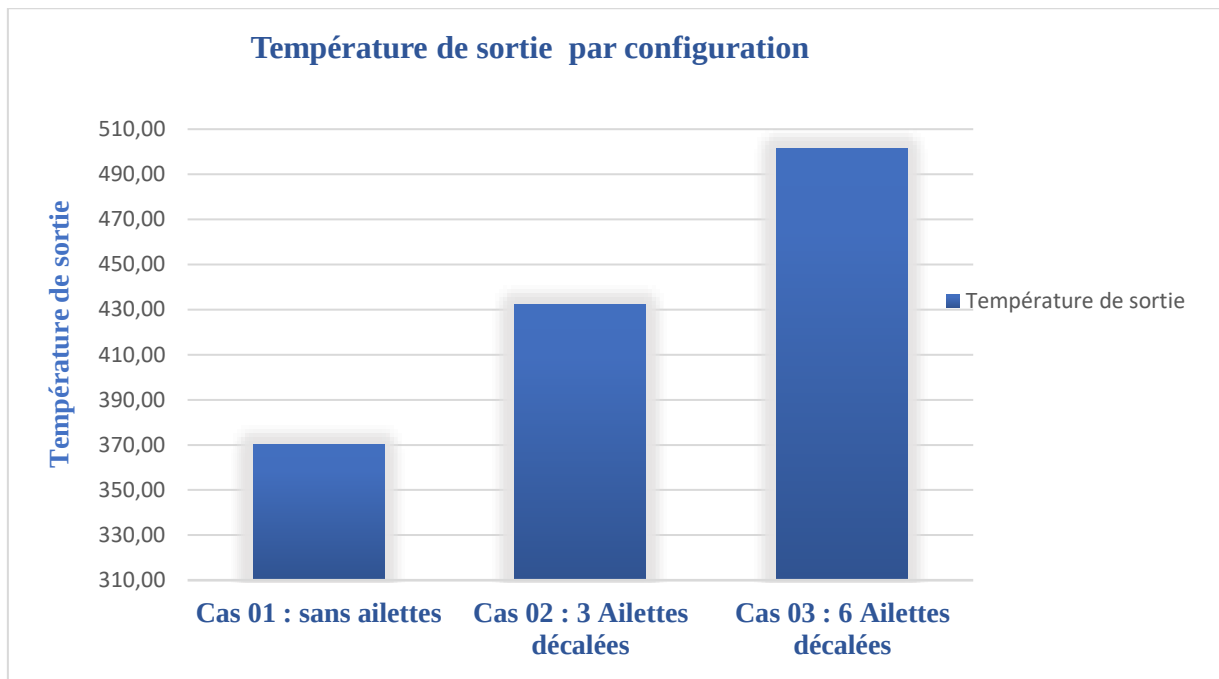


Figure IV-5 : Comparaison de la température de sortie pour les trois configurations (**Cas 01 : sans ailettes**, **Cas 02 : 3 ailettes décalées** et **Cas 03 : 6 ailettes décalées**) à débit massique fixe de $\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$.

- **Interprétation**

La figure **IV-5** présente la comparaison de la température de sortie pour les trois configurations étudiées à débit massique constant ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$).

Les résultats montrent une augmentation progressive de la température avec le nombre d'ailettes décalées. Le **Cas 01** présente la valeur la plus faible en raison de l'absence de surfaces d'échange supplémentaires et d'une faible perturbation de l'écoulement.

L'ajout de 3 ailettes (**Cas 02**) améliore les performances grâce à l'augmentation de la surface d'échange et à la perturbation de la couche limite thermique.

Le **Cas 03** atteint la meilleure performance, grâce au renouvellement continu de la couche limite et à un meilleur mélange du fluide induit par les 6 ailettes. Ces résultats confirment que l'augmentation du nombre d'ailettes améliore efficacement le transfert thermique.

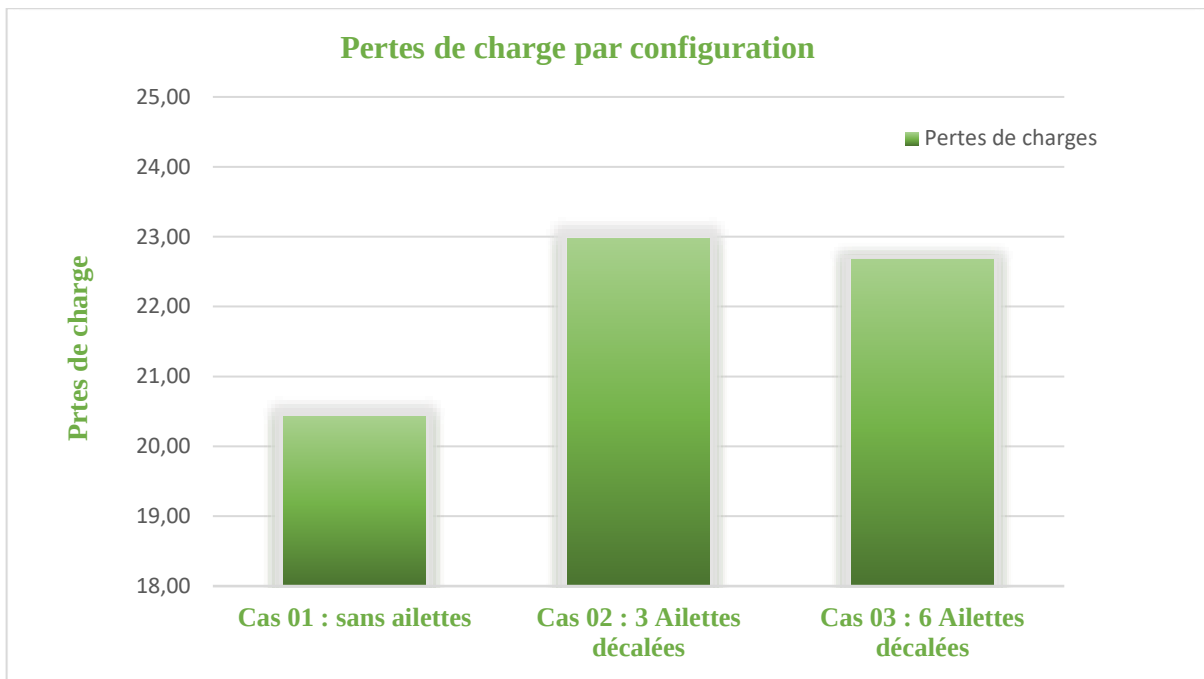


Figure IV-6 : Comparaison de la perte de charge pour les pour les trois configurations (**Cas 01 : sans ailettes**, **Cas 02 : 3 ailettes décalées** et **Cas 03 : 6 ailettes décalées**) à débit massique fixe de $\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$.

- **Interprétation**

La Figure **IV-6** présente la comparaison de la perte de charge pour les trois configurations à débit massique fixe ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$).

Le **Cas 01** présente la perte de charge la plus faible, due uniquement aux frottements visqueux dans un canal sans obstacles. L'ajout de 3 ailettes (**Cas 02**) augmente la perte de charge à cause de la résistance de forme et des zones de recirculation générées derrière les obstacles.

Cependant, le **Cas 03** présente une perte de charge plus faible que le **Cas 02** malgré un plus grand nombre d'ailettes, grâce à une meilleure répartition de l'écoulement et une réduction des zones mortes. Ce résultat montre que la configuration décalée optimisée permet un meilleur compromis thermo-hydraulique.

IV.3.5 Validation de la configuration optimale par le critère PEC

Afin de confirmer quantitativement les observations issues des contours et des courbes, le critère d'évaluation des performances PEC est calculé pour les trois configurations. Ce critère intègre simultanément le gain thermique et le coût hydraulique par rapport au canal de référence.

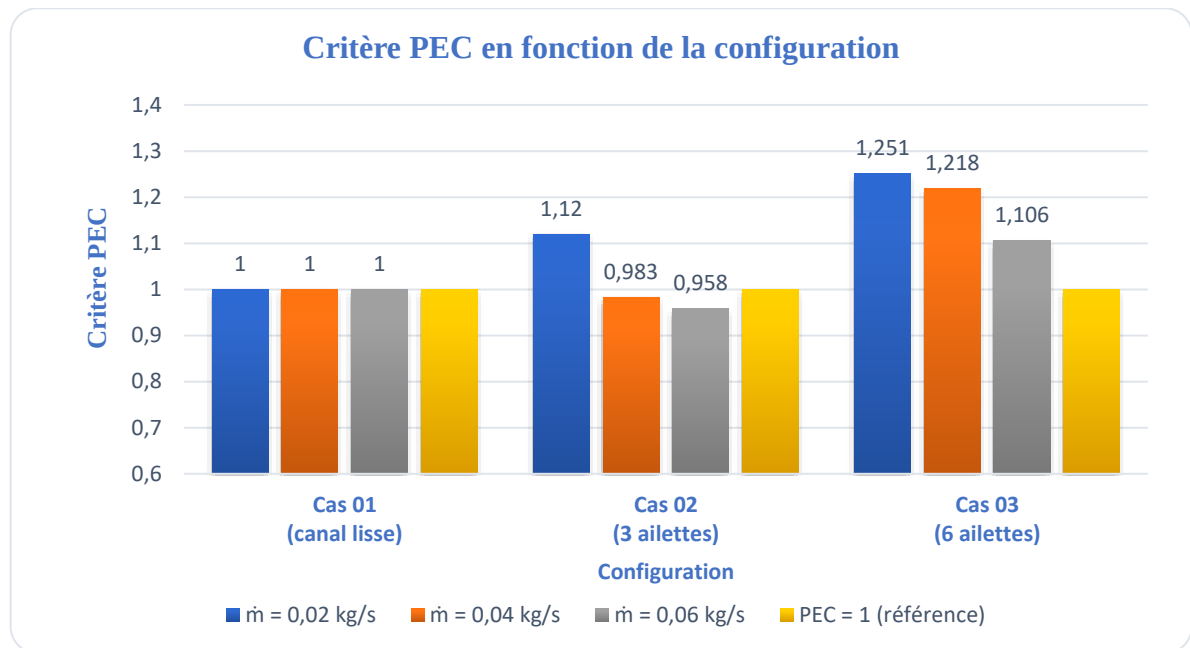


Figure IV-7 : Comparaison du critère PEC pour les trois configurations (**Cas 01 : sans ailettes, Cas 02 : 3 ailettes décalées, Cas 03 : 6 ailettes décalées**) aux trois débits massiques étudiés.

- **Interprétations**

La figure **IV-7** présente l'évolution du critère PEC pour les trois configurations aux trois débits massiques étudiés.

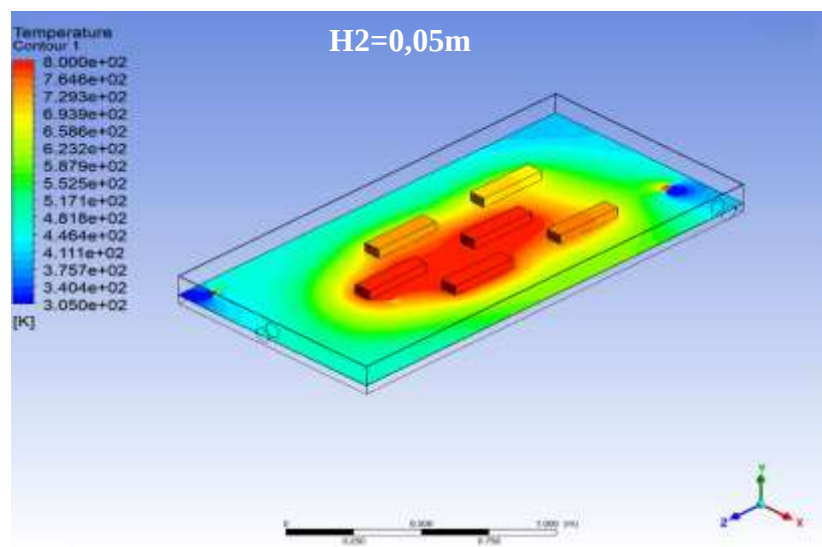
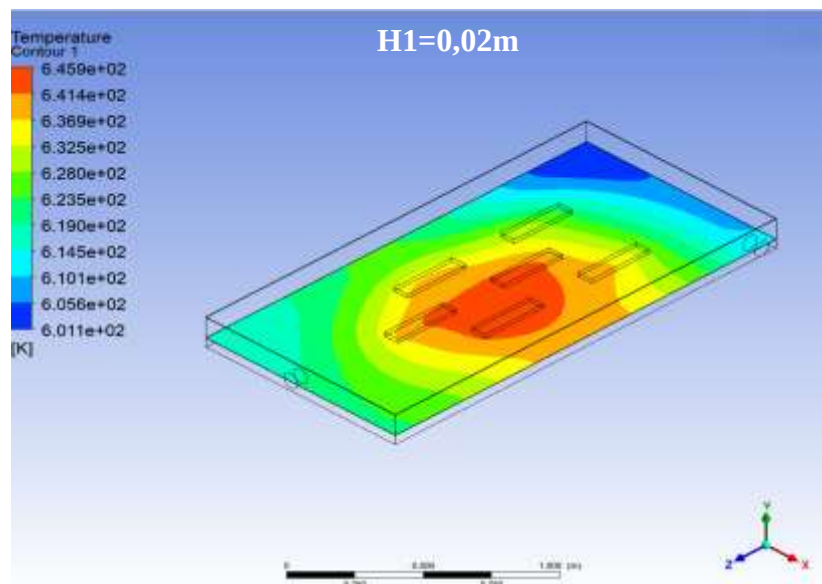
Le **Cas 01** est pris comme référence avec un PEC égal à 1 pour tous les débits. Le **Cas 02** présente un PEC supérieur à 1 uniquement à faible débit ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$), puis devient inférieur à la référence lorsque le débit augmente, ce qui montre que les pertes hydrauliques deviennent dominantes. Le **Cas 03** conserve un PEC supérieur à 1 pour tous les débits étudiés, indiquant que le gain thermique compense toujours la perte de charge. Ainsi, le **Cas 03** constitue la configuration la plus performante et la plus équilibrée de l'étude 1, indépendamment du débit massique.

IV.4 Effet de la hauteur des ailettes

Suite à l'analyse de l'effet du nombre d'ailettes, cette section est consacrée à l'étude de l'influence de la hauteur des ailettes sur les performances thermo-hydrauliques du capteur solaire. En se basant sur la configuration comportant 6 ailettes décalées, trois hauteurs d'ailettes sont considérées : $H1 = 0,02 \text{ m}$, $H2 = 0,05 \text{ m}$ et $H3 = 0,08 \text{ m}$, tout en conservant les mêmes conditions aux limites pour l'ensemble des configurations étudiées.

IV.4.1 Contours de température

Les contours de température pour les trois hauteurs d'ailettes étudiées sont présentés. Lorsque la hauteur des ailettes augmente, cela modifie la surface d'échange et la structure de l'écoulement. Cela entraîne des distributions thermiques différentes. Ces champs de température permettent de voir directement comment la hauteur des ailettes affecte le transfert de chaleur dans le canal.



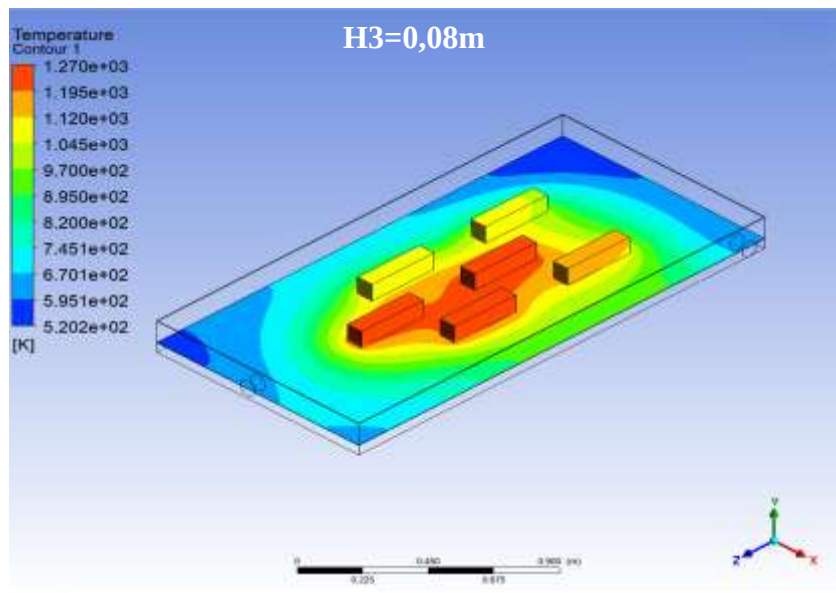


Figure IV-8 : Contours de température pour les trois hauteurs d'ailettes ($H1 = 0,02 \text{ m}$, $H2 = 0,05 \text{ m}$, $H3 = 0,08 \text{ m}$).

- **Interprétations**

La figure **IV-8** présente les contours de température obtenus pour les trois hauteurs d'ailettes étudiées.

Pour $H1 = 0,02 \text{ m}$, la distribution thermique reste relativement homogène, avec une faible perturbation de l'écoulement et un transfert thermique limité dû à une surface d'échange réduite.

Pour $H2 = 0,05 \text{ m}$, l'augmentation de la hauteur des ailettes améliore les performances thermiques grâce à une surface d'échange plus importante et à une perturbation plus marquée de la couche limite thermique, entraînant une meilleure diffusion de la chaleur dans le canal.

Pour $H3 = 0,08 \text{ m}$, l'intensification du transfert thermique est maximale : la réduction de la section d'écoulement accélère le fluide et augmente localement la convection, malgré la présence de zones de recirculation plus importantes. Globalement, l'augmentation de la hauteur des ailettes améliore les performances thermiques en renforçant les échanges convectifs et le mélange du fluide.

IV.4.2 Contours de pression

Les contours de pression statique sont analysés pour trois variantes de hauteur d'ailettes. Une hauteur plus grande risque de perturber davantage l'écoulement et d'augmenter les pertes de charge. L'objectif est de visualiser et de quantifier cet effet pour évaluer le coût hydraulique de chaque variante géométrique.

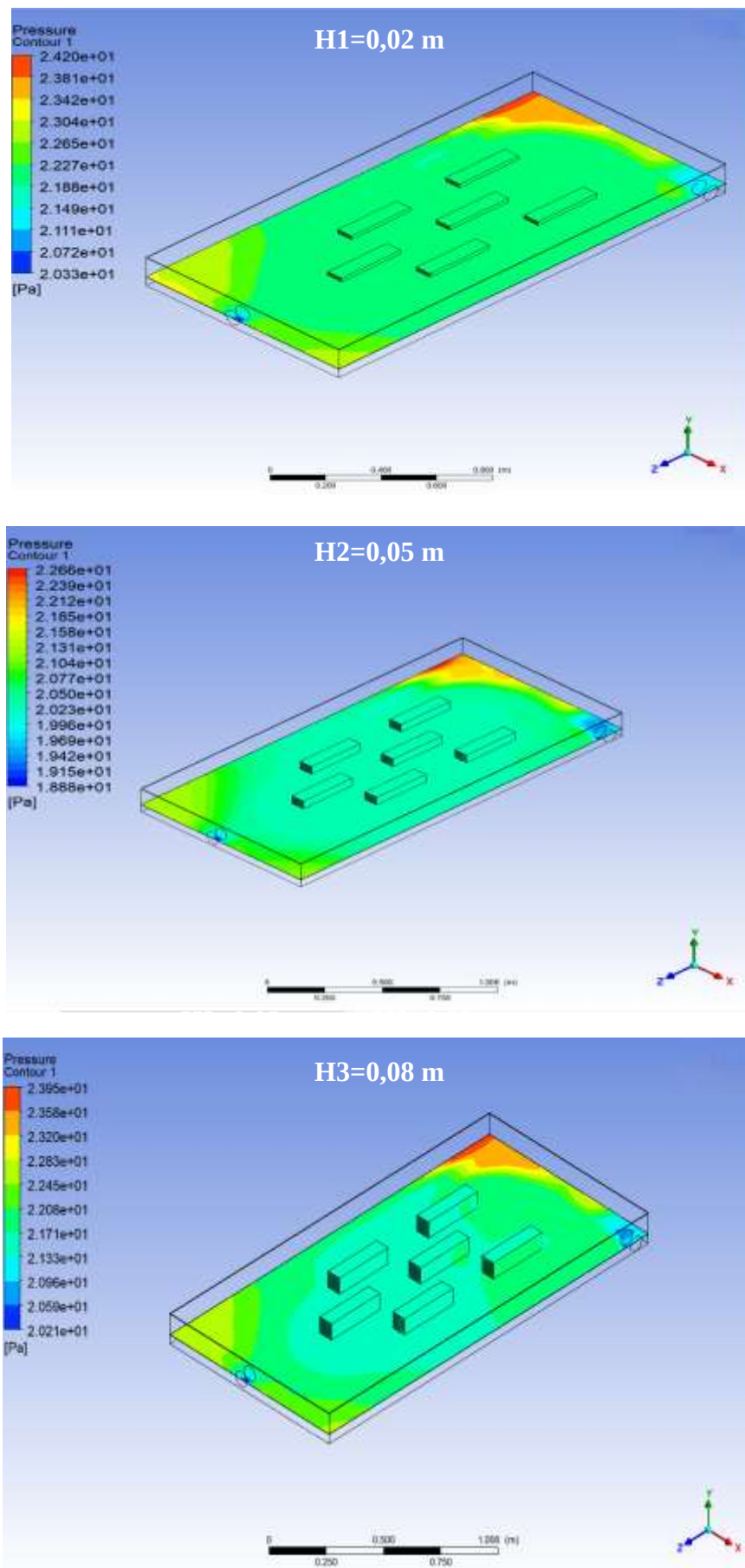


Figure IV-9 : Contours de pression statique pour les trois hauteurs d'ailettes ($H1 = 0,02 \text{ m}$, $H2 = 0,05 \text{ m}$, $H3 = 0,08 \text{ m}$).

- **Interprétation**

La figure IV-9 présente les contours de pression statique pour les trois hauteurs d'aillettes étudiées.

Pour **H1 = 0,02 m**, le champ de pression montre une décroissance globale régulière, mais avec une perte de charge relativement élevée due à une faible efficacité de guidage de l'écoulement et à des séparations locales.

Pour **H2 = 0,05 m**, la distribution devient plus organisée, avec des zones de surpression en amont et de dépression en aval des ailettes. Cette configuration permet une meilleure structuration de l'écoulement et une réduction des zones stagnantes, ce qui améliore le comportement hydraulique global.

Pour **H3 = 0,08 m**, l'augmentation importante de la hauteur des ailettes réduit fortement la section de passage, intensifie les zones de recirculation et augmente les pertes de charge. Globalement, H2 représente le meilleur compromis hydraulique entre guidage de l'écoulement et limitation des pertes de charge.

IV.4.3 Influence du débit massique sur la température de sortie :

On a tracé la température de sortie, notée Tout, en fonction du débit massique pour les trois hauteurs d'aillettes. Cela nous permet d'examiner comment les performances thermiques varient en fonction de la hauteur des ailettes pour les débits massiques allant de 0,02 à 0,06 kg/s. L'objectif est de trouver la hauteur d'aillettes qui offre le meilleur transfert thermique.

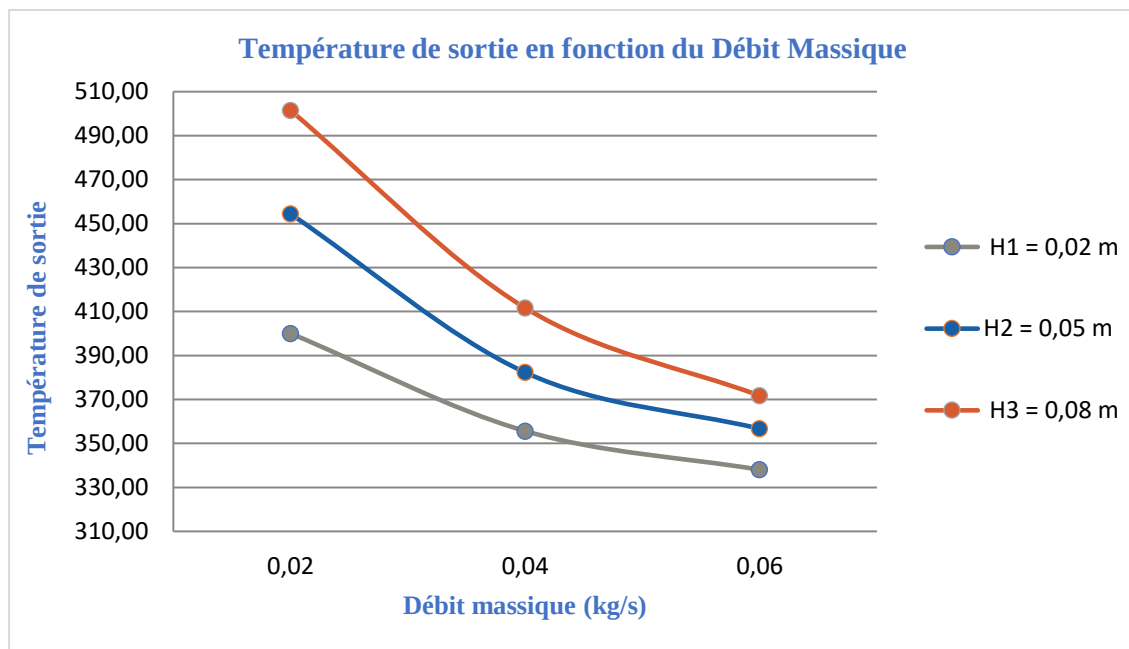


Figure IV-10 : Évolution de la température de sortie en fonction du débit massique pour les trois configurations (**H1 = 0,02 m**, **H2 = 0,05 m**, **H3 = 0,08 m**).

- **Interprétation**

La figure **IV-10** présente l'évolution de la température de sortie en fonction du débit massique pour les trois hauteurs d'ailettes étudiées, sur une plage comprise entre 0,02 et 0,06 kg/s.

Dans tous les cas, la température diminue lorsque le débit augmente, ce qui s'explique par la réduction du temps de séjour du fluide dans le canal et donc une diminution du transfert thermique. Une hiérarchie claire est observée : $H3 > H2 > H1$, montrant que l'augmentation de la hauteur des ailettes améliore les performances thermiques. Les écarts entre configurations sont plus importants à faibles débits, puis diminuent lorsque le débit augmente, en raison de la réduction du temps d'échange. Enfin, **H3** présente une décroissance plus marquée, indiquant une sensibilité plus forte au débit massique.

IV.4.4 Comparaison des configurations :

Une comparaison est faite entre les trois hauteurs d'ailettes à débit massique constant, soit 0,02 kg/s. Cette comparaison se base sur la température de sortie, et la perte de charge. L'objectif de cette comparaison est de choisir la hauteur d'ailette qui offre les meilleures performances thermo-hydrauliques pour le capteur solaire plan.

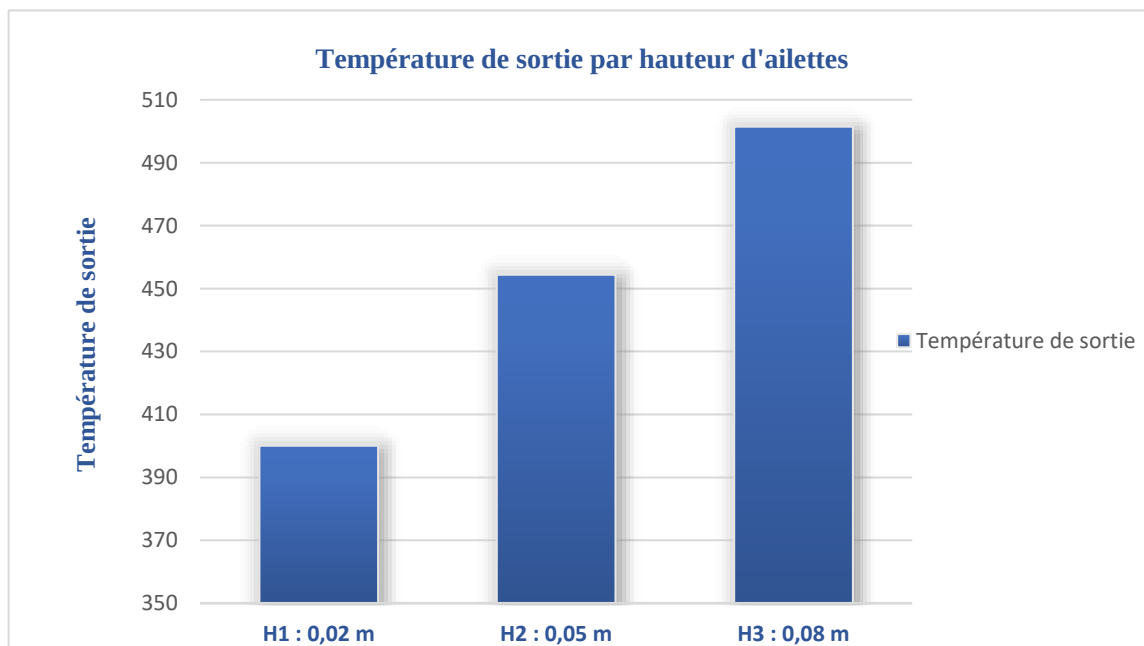


Figure IV-11 : Comparaison de la température de sortie pour les trois hauteurs d'ailettes à débit massique fixe de $\dot{m} = 0,02$ kg/s.

- **Interprétation**

La figure **IV-11** présente la comparaison de la température de sortie pour les trois hauteurs d'ailettes à débit massique fixe ($\dot{m} = 0,02$ kg/s). Les résultats montrent une augmentation progressive de la température avec la hauteur des ailettes.

H1 = 0,02 m présente la performance la plus faible en raison d'une surface d'échange réduite et d'une faible perturbation de l'écoulement.

H2 = 0,05 m améliore les performances grâce à une surface convective plus importante et à une meilleure intensification des échanges thermiques.

H3 = 0,08 m atteint la température la plus élevée, car la réduction de la section de passage accélère l'écoulement et renforce le transfert convectif. Ces résultats confirment que l'augmentation de la hauteur des ailettes améliore les performances thermiques, mais doit être analysée avec les pertes de charge pour évaluer la performance globale.

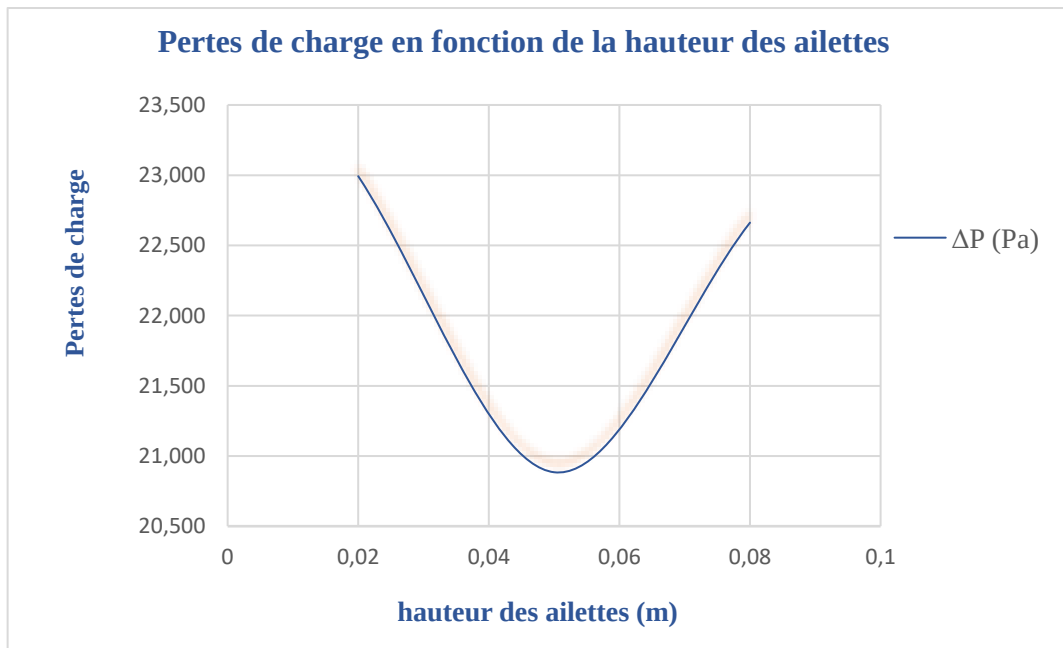


Figure IV-12 : Comparaison des pertes de charge pour les trois hauteurs d'ailettes à débit massique fixe ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$).

• Interprétation

La figure **IV-12** présente l'évolution de la perte de charge en fonction de la hauteur des ailettes à débit massique fixe ($\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$).

Les résultats montrent un comportement non monotone : la perte de charge diminue de H1 à H2, puis augmente de H2 à H3.

Pour **H1 = 0,02 m**, les pertes sont relativement élevées en raison de perturbations locales et d'une mauvaise organisation de l'écoulement.

Pour **H2 = 0,05 m**, la configuration permet une meilleure structuration de l'écoulement et une réduction des zones de recirculation, ce qui conduit à la perte de charge minimale.

Pour **H3 = 0,08 m**, la forte réduction de la section de passage augmente la vitesse du fluide et intensifie les pertes par frottement et séparation, entraînant une hausse de ΔP . Ainsi, H2 représente le meilleur compromis thermo-hydraulique.

IV.4.5 Validation de la configuration optimale par le critère PEC

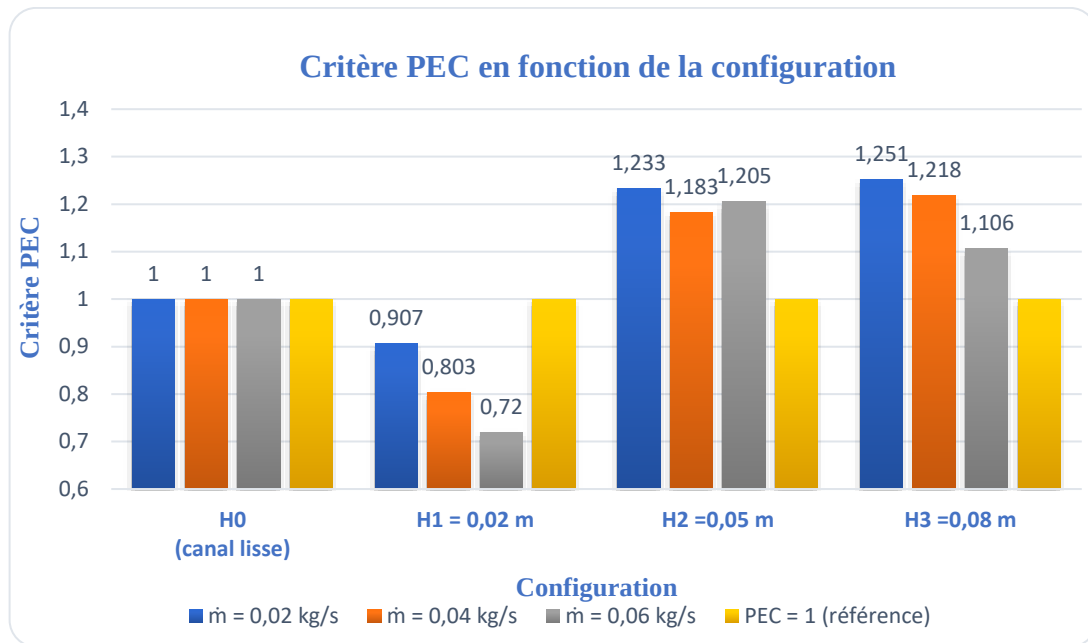


Figure IV-13 : Comparaison du critère PEC pour les quatre configurations (**H0 : canal lisse**, **H1 = 0,02 m**, **H2 = 0,05 m**, **H3 = 0,08 m**) aux trois débits massiques étudiés.

- Interprétation**

La figure **IV-13** présente l'évolution du critère PEC pour les trois hauteurs d'ailettes aux trois débits massiques étudiés. **H0 (canal lisse)**, pris comme référence, affiche un PEC égal à 1,000 pour les trois débits.

H1 = 0,02 m présente un PEC inférieur à 1 pour tous les débits, indiquant une dégradation des performances due à des pertes de charge élevées sans gain thermique suffisant. **H2 = 0,05 m** maintient un PEC supérieur à 1 sur toute la plage de fonctionnement, montrant un bon équilibre entre amélioration thermique et pertes hydrauliques.

H3 = 0,08 m reste globalement performant mais présente une baisse plus rapide du PEC à fort débit, avec en plus une température de paroi plus élevée. Ainsi, H2 constitue la hauteur d'ailettes optimale de l'étude 2.

IV.5 Conclusion :

Dans cette étude, nous avons mené des simulations numériques en trois dimensions pour examiner le comportement thermique et dynamique de l'air en convection forcée dans un capteur solaire plat équipé d'ailettes rectangulaires décalées. Nous avons utilisé le logiciel **ANSYS Fluent** pour nos calculs. Les résultats que nous avons obtenus montrent les contours de température et de pression pour différentes configurations d'ailettes, et ce, pour des débits massiques variant entre 0,02 et 0,06 kg/s.

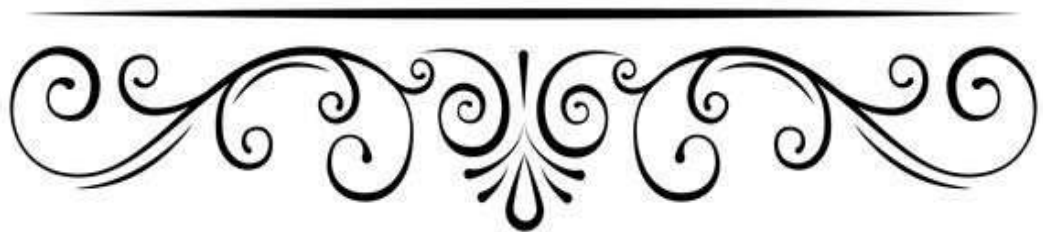
Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- L'amélioration du transfert thermique est obtenue par l'insertion d'ailettes décalées rectangulaires dans le canal du capteur solaire, qui perturbent la couche limite thermique et augmentent la surface d'échange convectif.
- La configuration comportant le plus grand nombre d'ailettes **Cas 03** présente les valeurs de température de sortie les plus élevées, tandis que le canal lisse **Cas 01** enregistre les valeurs les plus faibles.
- L'augmentation de la hauteur des ailettes améliore progressivement les performances thermiques, mais engendre une contrainte thermique importante sur la paroi absorbante pour les grandes hauteurs.
- La validation par le critère PEC confirme que les résultats d'amélioration thermique ne peuvent être dissociés de l'analyse hydraulique pour identifier la configuration réellement optimale.

En conclusion, afin d'établir le classement des configurations étudiées, la meilleure efficacité thermo-hydraulique est obtenue respectivement par le **Cas 03 (6 ailettes décalées)** pour l'étude 1, et par **H2 = 0,05 m** pour l'étude 2. Ces résultats constituent une base utile pour le dimensionnement et l'optimisation des capteurs solaires plans à ailettes décalées.



Conclusion générale



Conclusion Générale

Ce travail a porté sur l'analyse numérique tridimensionnelle des performances thermo-hydrauliques d'un capteur solaire plan muni d'ailettes décalées rectangulaires. Les simulations ont été réalisées à l'aide du code de calcul **ANSYS Fluent**, basé sur la méthode des volumes finis et le modèle de turbulence $k-\varepsilon$.

Le modèle numérique a été validé par comparaison avec les données expérimentales de **Boudjema et al. [46]**, avec un écart inférieur à 3 %, ce qui confirme la fiabilité des résultats obtenus.

Deux études paramétriques ont été menées et les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

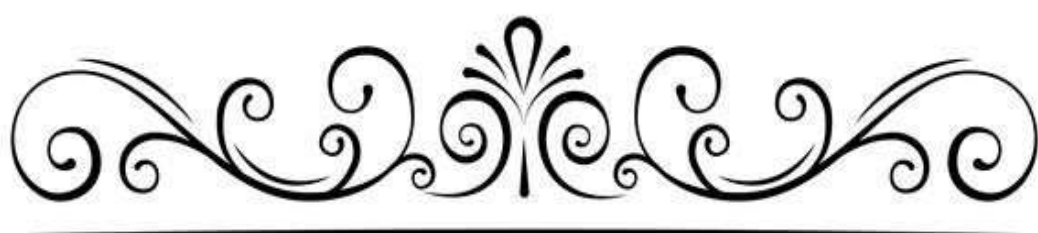
- **Étude 1 : Effet du nombre d'ailettes** : l'augmentation du nombre d'ailettes améliore progressivement les performances thermiques du capteur. Le critère PEC confirme que le **Cas 03 (6 ailettes décalées)** est la configuration optimale, avec un PEC supérieur à 1 sur toute la plage de débits étudiée.
- **Étude 2 : Effet de la hauteur des ailettes** : la hauteur **$H_2 = 0,05 \text{ m}$** offre le meilleur compromis thermo-hydraulique, avec un PEC stable et supérieur à 1 pour les trois débits massiques et une température de paroi maîtrisée.

En conclusion, la configuration optimale pour le capteur solaire plan étudié est celle associant **6 ailettes décalées de hauteur de 0,05 m**, offrant la meilleure amélioration des performances globales sur l'ensemble des conditions opératoires considérées.

Perspectives

Ce travail ouvre plusieurs perspectives pour des recherches futures :

- Étendre l'étude à d'autres géométries d'ailettes (perforées, en V).
- Intégrer les conditions climatiques réelles de l'Algérie dans la simulation.
- Effectuer une optimisation multi-paramètres combinant nombre, hauteur et espacement des ailettes.



Références bibliographiques



Références Bibliographiques

- [1] “Énergie solaire, cap sur une production de 15 gigawatts en 2035 – Portail algérien.”. Available : <https://portail.cder.dz/2024/12/17/energie-solaire-cap-sur-une-production-de-15-gigawatts-en-2035/>
- [2] S. Ouali, “Technologies d’Exploration et d’Exploitation de l’Energie Géothermique”. Available : https://www.cder.dz/IMG/pdf/ber58_08_11.pdf
- [3] “aquifère captif.” Available : <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/17574008/aquifere-captif>
- [4] “Production & Technique,” Eoliennes de Provence. Available : <https://www.eoliennes-de-provence.ch/production-et-technique/>
- [5] “Charbonnières. Le projet de centrale photovoltaïque au sol sur la table du conseil municipal.” Available : <https://www.lejsl.com/politique/2025/02/26/le-projet-de-centrale-photovoltaïque-au-sol-sur-la-table-du-conseil-municipal>
- [6] F. Yazdanifard and M. Ameri, “Exergetic advancement of photovoltaic/thermal systems (PV/T): A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 97, pp. 529–553, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.053.
- [7] M. Z. Rezki, “Présenté par BOUNOUAR Malika Thème :”. Available : <https://dspace.ummo.dz/server/api/core/bitstreams/c862bfd5-1008-41c6-b1c7-97b82682384d/content>
- [8] “[ENGIE,” Engie.com. Available : <https://www.engie.com/activites/renouvelables/solaire>
- [9] M. S. Haddad, “Modélisation et commande pour la poursuite du point de puissance maximale d’un système photovoltaïque en tenant compte de la variation de la température”.
- [10] Ivanogagliardo, “Cellules photovoltaïques : qu’est-ce que c’est et comment fonctionnent-elles,” BibLus. Available : <https://biblus.accasoftware.com/fr/cellules-photovoltaïques-quest-ce-que-cest-et-comment-fonctionnent-elles/>
- [11] Virginie@ekela.fr, “Différence entre les panneaux solaires,” Démocratisons le photovoltaïque. Available: <https://www.democratisonslephotovoltaïque.fr/bonnes-pratiques/difference-panneau-solaire-photovoltaïque/>
- [12] “Les énergies renouvelables : état des lieux et perspectives - Capteurs solaires thermiques.” Available: <https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-1-2-1-capteurs-solaires-thermiques.html>
- [13] “Fichier:Capteurplan.png — Solarpedia.”. Available : <https://fr.solarpedia.net/wiki/index.php/Fichier:Capteurplan.png>

Références Bibliographiques

- [14] “Les absorbeurs : matériaux et modèles.” Available : <https://www.lepanneausolaire.net/les-absorbeurs-materiaux-modeles.php>
- [15] J. A. Duffie (Deceased), W. A. Beckman, and N. Blair, *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*, 1st ed. Wiley, 2020. doi: 10.1002/9781119540328.
- [16] “Capteur Solaire thermique,” Wikipédia. Jun. 29, 2025. Available : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Capteur_solaire_thermique&oldid=226885059#Couverture
- [17] “CHAPITRE II Capteur solaire plan à air”. Available : <https://dspace.univ-tiaret.dz/server/api/core/bitstreams/4b88934b-b17d-4c73-bcc1-3f42e7cb8c5d/content>
- [18] “Energie solaire - Calculs et optimisation - Génie énergétique - Niveau B - 2e édition,” Éditions Ellipses. Available: <https://www.editions-ellipses.fr/fr/accueil/1220-energie-solaire-calculs-et-optimisation-genie-energetique-niveau-b-2e-edition-9782729864927.html>
- [19] M. Aliane, “Etude numérique d’un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité”.
- [20] H. Defreville, “Énergie solaire thermique : fonctionnement • Newheat,” Newheat. Available: <https://newheat.com/fonctionnement-energie-solaire-thermique/>
- [21] Z. Merouane, K. Mahfoud, and M. Fouad, “Effet des Paramètres Géométriques sur les Performances Thermiques des Capteurs Solaires Plans à Air”.
- [22] “Capteurs Solaires Thermiques”. Available : https://elearning.univ-mila.dz/a2024/pluginfile.php/116182/mod_resource/content/0/Chap%20III%20%28Partie%201b-Capteurs%20Solaires%20Thermiques%29.pdf
- [23] “Capteur thermique : types de capteurs, atouts et prix - PagesJaunes.” Available: <https://panneau-solaire.pagesjaunes.fr/astuce/voir/474871/capteur-thermique>
- [24] M. M. D. Ndiaye, “Optimisation d’un capteur solaire double passe à air et estimation des échanges de chaleur paroi-fluide.”.
- [25] S. A. Kalogirou, “Solar thermal collectors and applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 231–295, 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.001.
- [26] S. Kalogirou, “Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 1, pp. 39–48, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.solener.2008.06.005.
- [27] “Système solaire combiné : fonctionnement et coût | Choisir.com.”. Available: <https://www.choisir.com/energie/articles/203902/zoom-sur-le-systeme-solaire-combine>
- [28] “Tout savoir sur... l’énergie solaire thermique - [THEMATIQUE].”. Available: <https://mamaisondeaaz.gedimat.fr/article/1052/268-tout-savoir-sur-l-energie-solaire-thermique.htm>

Références Bibliographiques

- [29] “Chauffage solaire piscine : aides, prix, fonctionnement,” ECOinfos. Available: <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/chauffage-solaire/fonctionnement-chauffage-solaire/chauffage-solaire-piscine/>
- [30] “Séchoir solaire indirect — Low-tech. Available: https://wiki.lowtechlab.org/w/index.php?title=S%C3%A9choir_solaire_indirect/fr&embed=true#!/step/1
- [31] “Design and Optimization of Fins in Solar Flat Plate Collector Using CFD,” *Int. J. Sci. Res. IJSR*, vol. 6, no. 1, pp. 1696–1700, Jan. 2017, doi: 10.21275/ART20164493.
- [32] M. Ammar, A. Mokni, H. Mhiri, and P. Bournot, “Numerical analysis of solar air collector provided with rows of rectangular fins,” *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 3412–3424, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.11.252.
- [33] A. Kumar, A. Kumar, D. T. Thirumalai, and N. Kumar, “THERMAL PERFORMANCE ANALYSIS ON STAGGERED FINNED ABSORBER SOLAR AIR HEATER”.
- [34] B. Ayadi *et al.*, “Enhancing solar air heater performance using corrugated plates and perforated baffles,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 45773, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-28600-7.
- [35] M. H. Machi, I. Farkas, and J. Buzas, “Optimizing double-pass solar air collector efficiency: Impact of a perforated discrete V-angled fins,” *Energy Rep.*, vol. 13, pp. 2021–2034, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.egyr.2025.01.057.
- [36] S. Bahria and M. Amirat, “Influence de l’adjonction des chicanes longitudinales sur les performances d’un capteur solaire plan à air,” *J. Renew. Energ.*, vol. 16, no. 1, Oct. 2023, doi: 10.54966/jreen.v16i1.363.
- [37] N. S. Deo, S. Chander, and J. S. Saini, “Performance analysis of solar air heater duct roughened with multigap V-down ribs combined with staggered ribs,” *Renew. Energy*, vol. 91, pp. 484–500, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.01.067.
- [38] G. Boussouar, B. Rostane, K. Aliane, D. Ravi, M. J. Gęca, and A. Gola, “Study of the Thermal Performance of Solar Air Collectors with and without Perforated Baffles,” *Energies*, vol. 17, no. 15, p. 3812, Aug. 2024, doi: 10.3390/en17153812.
- [39] W. H. Alawee, “Performance analysis of a solar still using an absorber plate with inclined perforated rectangular fins: Comprehensive study,” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 19, no. 4, pp. 403–419, Aug. 2021, doi: 10.22201/icat.24486736e.2021.19.4.1107.
- [40] M. Yang, X. Yang, X. Li, Z. Wang, and P. Wang, “Design and optimization of a solar air heater with offset strip fin absorber plate,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1349–1362, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.091.

- [41] A. Saravanan *et al.*, “Thermo-hydraulic performance of a solar air heater with staggered C-shape finned absorber plate,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 168, p. 107068, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107068.
- [42] S. T. A. Shafi, M. K. Al-Saadi, and A. A. Jaddoa, “Optimizing Solar Air Heater Performance Using Perforated V-Shaped Barriers with Varied Geometric Designs,” *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 23, no. 2, pp. 703–719, 2025, doi: 10.32604/fhmt.2025.063118.
- [43] G. Abdi, M. A. Amraoui, N. Medjadji, G. Lorenzini, and Y. Menni, “3D Evaluation of a Thermal and Hydraulic Winged Solar Collector,” *Instrum. Mes. Métrologie*, vol. 21, no. 2, pp. 35–41, Apr. 2022, doi: 10.18280/i2m.210201.
- [44] A. Priyam and P. Chand, “Effect of wavelength and amplitude on the performance of wavy finned absorber solar air heater,” *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 690–702, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.12.010.
- [45] M. A. A. Rahmat *et al.*, “Field-based experimental investigation of energy and exergy performances of a novel solar thermal air collector,” *Sci. Rep.*, vol. 16, no. 1, p. 6621, Jan. 2026, doi: 10.1038/s41598-026-37250-2.
- [46] F. M. Boudjema, H. Benzenine, and S. Abboudi, “An experimental investigation of the thermal performance of solar collectors utilizing finned aluminum can pipes,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 238, no. 14, pp. 7275–7284, Jul. 2024, doi: 10.1177/09544062241230220.
- [47] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, 2nd ed. Harlow, England; New York: Pearson Education Ltd, 2007.
- [48] R. K. Donga, S. Kumar, and G. Velidi, “Heat transfer enhancement in a parabolic trough collector using finned tubular absorber,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 24142, Jul. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-07825-6.
- [49] “Chapitre 03.pdf.” Available: <http://thesis.univ-biskra.dz/2722/5/Chapitre%2003.pdf>.