



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 الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Mémoire

Présentée pour obtenir le diplôme de

Master

Spécialité : Energétique

Filière : Génie mécanique

Investigation numérique sur les pertes thermique à l'avant d'un capteur solaire plan

Présenté par :

M^r MOUZAIA Sami Rami

Mémoire soutenue le 11 / 06 / 2024 devant le jury composé de

Président :	BOUAFFANE Abdelkrim	MCB
Encadreur :	MEKAHLIA Ala Eddine	MAB
Examineur :	GHANAIA Sadek	MAB

Année universitaire :2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

RESUME

Ce travail vise à réduire les pertes convectives dans la lame d'air située entre l'absorbeur et la vitre d'un capteur solaire plan en utilisant la stratégie des nids d'abeilles, qui implique l'installation de partitions fixes dans cette lame d'air. L'étude est divisée en trois parties : d'abord, le logiciel Meteonorm a été utilisé pour recueillir des données météorologiques telles que l'irradiance solaire et les températures ambiantes nécessaires pour les simulations. Ensuite, un code de calcul a été élaboré à partir du bilan énergétique du capteur et des données obtenues, permettant de déterminer les variables thermiques, les paramètres de performance, les coefficients d'échange thermique, et l'énergie perdue à l'avant du capteur. Enfin, l'effet de la stratégie des nids d'abeilles sur la réduction des pertes convectives a été étudié numériquement à l'aide du logiciel ANSYS Fluent, démontrant que cette approche peut efficacement réduire les pertes de chaleur, améliorant ainsi les performances globales du capteur solaire.

Mots clés : Capteur solaire, Nid d'abeilles, Pertes thermique, Simulation numérique

REMERCIEMENT

Je remercie **Dieu** tout puissant pour la santé, la volonté le courage et la patience qu'il m'a donné durant ces années d'étude.

Je tiens à remercier **Dr. MEKAHLIA Alaedine** pour son encadrement, sa compréhension, ses conseils, ses observations son aide et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

Mes profondes gratitude s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants de département de génie mécanique, sans pour autant oublier tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin afin

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu et encouragé. Leur amour et leur dévouement ont été une source d'inspiration constante.

À mes deux frères, qui ont toujours été là pour moi, avec leur soutien inconditionnel et leurs précieux conseils.

À la mariée de mon grand frère, dont la gentillesse et l'affection ont enrichi notre famille.

À ses deux petits-fils [ARIS & ANAIS] , dont les sourires et l'innocence apportent tant de joie et d'espoir dans nos vies.

À mes amis, qui m'ont accompagné tout au long de ce voyage avec leur amitié sincère et leur soutien constant. Leur présence a rendu ce parcours plus agréable et mémorable.

Merci à chacun d'entre vous pour votre présence et votre soutien tout au long de ce parcours.

SOMMAIRE

RESUME	I
REMERCIEMENT.....	II
DEDICACE.....	III
SOMMAIRE.....	IV
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
NOMENCLATURE.....	X
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ENERGIES RENOUVELABLES	2
Introduction.....	3
I.1 Energies renouvelables.....	3
I.1.1 Définition	3
I.1.2 Importance et avantage d'énergies renouvelables.....	4
I.1.3 Energies renouvelables dans l'Algérie	5
I.1.4 Différentes sources d'énergies renouvelables.....	5
Conclusion	17
II. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	18

Introduction.....	19
II.1 Capteur solaire.....	19
II.1.1 Capteurs à concentration.....	20
II.1.2 Capteurs non-concentration.....	21
II.2 Modes de transfert de chaleur et pertes thermiques du capteur solaire plan.....	23
II.2.1 Différents modes de transfert de chaleur d'un capteur solaire plan.....	24
II.3 Bilan thermique d'un capteur solaire.....	27
II.3.1 Rayonnement reçu par le capteur solaire.....	27
II.3.2 Energie utile.....	29
II.3.3 Expression du coefficient global de pertes.....	34
II.4 Analyse bibliographique.....	39
Conclusion.....	41
III. APPROCHE NUMERIQUE.....	42
Introduction.....	43
III.1 Les équations gouvernantes :.....	43
III.1.1 L'équation de continuité.....	43
III.1.2 L'équation de la quantité de mouvement.....	44
III.1.3 L'équation de l'énergie.....	44
III.2 CFD.....	45
III.2.1 Comment fonctionne un code CFD.....	46
III.2.2 Choix des équations résolues par le solveur.....	55
III.2.3 Post processeur.....	57
III.3 Méthode numérique.....	57
III.3.1 Principe de la méthode de volume finis.....	58
Conclusion.....	59
IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	60
Introduction.....	61

IV.1	Cas d'étude.....	61
IV.2	Données métrologiques.....	62
IV.3	Caractéristiques géométriques, physiques et optiques du capteur	63
IV.3.1	Caractéristiques géométriques	63
IV.3.2	Caractéristiques physiques et optiques	64
IV.4	Calcul du bilan thermique	65
IV.4.1	Principe de fonctionnement de la méthode essai-erreur	66
IV.4.2	Résultats.....	67
IV.5	Simulation numérique.....	68
IV.5.1	Hypothèses simplificatrices.....	68
IV.5.2	Configurations du problème	69
IV.5.3	Simulation numérique.....	70
IV.5.4	Indépendance de maillage	70
IV.5.5	Résultats et discussion	71
	Conclusion	79
V.	CONCLUSION GENERALE.....	80
VI.	REFERENCES	82

LISTE DES FIGURES

FIGURE I-1 : DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLES.	4
FIGURE I-2 : PRESENTATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS LA PRODUCTION NATIONALE.	5
FIGURE I-3 : FONCTIONNEMENT D'ENERGIE EOLIENNE.....	6
FIGURE I-4 : FONCTIONNEMENT D'ENERGIES HYDRAULIQUE.	7
FIGURE I-5 : FONCTIONNEMENT D'ENERGIE GEOMETRIQUE.....	8
FIGURE I-6 : CARTE D'ECLAIREMENT SOLAIRE DE L'ALGERIE.	9
FIGURE I-7 : MOUVEMENT DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL.	10
FIGURE I-8 : CORDONNEE TERRESTRE D'UN MILIEU DONNE	10
FIGURE I-9 : RAYONNEMENT DIRECT, DIFFUS ET REFICHER.....	14
FIGURE II-1 : CAPTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE.	20
FIGURE II-2 : CAPTEUR PARABOLIQUE.....	20
FIGURE II-3 : CAPTEUR SOLAIRE SOUS VIDE.	21
FIGURE II-4 : COMPOSANTE D'UN CAPTEUR PLAN.....	22
FIGURE II-5 : ACTION DE FLUIDE EN MOUVEMENT AVEC LE FLUIDE.	25
FIGURE II-6 : REFRACTION ET REFLEXION D'UN RAYON SOLAIRE DANS UN VITRAGE.	30
FIGURE II-7 : TTRANSFERT DE RAYONNEMENT SOLAIRE ENTRE LE VITRAGE ET L'ABSORBEUR D'UN CAPTEUR SOLAIRE PAN.....	32
FIGURE II-8 : DIFFERENTS TYPES DE PERTES THERMIQUE DANS UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN.	35
FIGURE II-9 : RESEAUX THERMIQUES D'UN CAPTEUR A SIMPLE VITRAGE EN TERMES DE (A) CONDUCTION, CONVECTION ET RAYONNEMENT ; (B) RESISTANCE ENTRE LA PLAQUE ET L'ENVIRONNEMENT ; ET (C) LE RESEAU D'UN CAPTEUR SIMPLE VITRAGE.	36
FIGURE II-10 : DIFFERENTES FORME DE NID D'ABEILLES.....	40
FIGURE III-1 ETAPES DE LA SIMULATION NUMERIQUE.....	47
FIGURE III-2 METHODOLOGIE GENERALE DE LA GENERATION DE MAILLAGE	47
FIGURE III-3 DIFFERENT TYPE DE MAILLAGE	48
FIGURE III-4 DEFINITION DE SKEWNESS SUR UN VOLUME TRIANGULAIRE.....	50
FIGURE III-5 EXEMPLE DE MAILLAGE EN PROCHE PAROI DE TYPE MAILLAGE DE COUCHE LIMITE.	51
FIGURE III-6 EVOLUTION DE LA TAILLE DES ELEMENTS.....	51
FIGURE III-7 TEST DE CONVERGENCE EN MAILLAGE.....	52
FIGURE III-8 EVOLUTION DU NOMBRE DE NUSSELT MOYENNE SUR LE CŒUR (COURBE DU BAS, ECHELLE DE GAUCHE) ET DE LA TEMPERATURE MOYENNE EN SORTIE (COURBE DU HAUT, ECHELLE DE DROITE).	56
FIGURE III-11 : VOLUME DE CONTROLE DANS LE CAS 2D.	59
FIGURE IV-1 : LOCALISATION DE LA WILAYA DE TEBESSA EN ALGERIE.	61

FIGURE IV-2 : ORGANIGRAMME DU MODELE DE CODE CALCULE	67
FIGURE IV-3 : DIFFERENTES DIMENSIONS ET CONDITIONS AUX LIMITES (A) SANS NIDS D'ABEILLES (B) AVEC LA STRATEGIE DES NIDS D'ABEILLES	70
FIGURE IV-4 : EVOLUTIONS DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'ABSORBEUR EN FONCTION DU NOMBRE DE CELLULES	71
FIGURE IV-5 : COMPARAISON LES RESULTATS NUMERIQUES ET DU BILAN THERMIQUE (A) COEFFICIENTS D'ECHANGES CONVECTIF ENTRE L'ABSORBEUR ET LA VITRE EN FONCTION DES HEURES DE LA JOURNEE (B) COEFFICIENT DES PERTES THERMIQUES GLOBALES EN FONCTION DES HEURES DE LA JOURNEE.....	72
FIGURE IV-6 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'ABSORBEUR EN FONCTION DE NOMBRE DE PARTITIONS.	73
FIGURE IV-7 : LIGNES DE COURANT POUR LES DEUX CAS SANS ET AVEC PARTITIONS (14 PARTITIONS).	74
FIGURE IV-8 : LIGNES DE COURANT POUR LES DEUX CAS SANS ET AVEC PARTITIONS (18 PARTITIONS).	74
FIGURE IV-9 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'ABSORBEUR EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE PARTITIONS POUR UN NOMBRE DE PARTITIONS EGALE 18 ET $L_p = 0,5$ MM.....	75
FIGURE IV-10 : LIGNES DE COURANT DANS LE CAS SANS PARTITIONS ET AVEC PARTITIONS POUR DIFFERENTES LONGUEURS DE PARTITIONS.	76
FIGURE IV-11 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'ABSORBEUR POUR LES DEUX CAS SANS ET AVEC PARTITIONS EN FONCTION DE LA DISTANCE ENTRE LA VITRE ET LES PARTITIONS ($L_p = 9$ MM, NOMBRE DE PARTITIONS = 18).....	77
FIGURE IV-12 : LIGNES DE COURANT POUR LE CAS SANS PARTITIONS ET AVEC PARTITIONS POUR DIFFERENTE DISTANCE ENTRE LA VITRE ET LES PARTITIONS	78
FIGURE IV-13 : COEFFICIENT D'ECHANGE (A) TOTALE (B) CONVECTIF EN FONCTION DES HEURES DE LA JOURNEE ETUDIE POUR LES DEUX CAS SANS ET AVEC PARTITIONS	79

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU III-1 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'APPROCHE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE.	45
TABLEAU III-2 : COEFFICIENT DE DISTORSION.	50
TABLEAU IV-1 : DIVERSES DONNEES METEOROLOGIQUES DE LA WILAYA DE TEBESSA POUR LE 30 AVRIL 2023.	62
TABLEAU IV-2 : CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU CAPTEUR.....	63
TABLEAU IV-3 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE DIVERS COMPOSANTS DU CAPTEUR	64
TABLEAU IV-4 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU FLUIDE CALOPORTEUR, EN L'OCCURRENCE L'EAU.	64
TABLEAU IV-5 : PROPRIETES OPTIQUE	65
TABLEAU IV-6 : DIVERS RESULTATS OBTENUS PAR L'EXECUTION DU CODE DE CALCUL.	67

NOMENCLATURE

LETTRES LATINES

A_p	La surface de l'absorbeur
F'	Le rapport entre la résistance thermique de quelque absorbeur
F_R	Facteur de récupération de chaleur du capteur
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2)
H	Rapport de forme de l'absorbeur ondulé (η/e_a)
h	Altitude (m), Coefficient d'échange thermique ($W/m^2.K$), Enthalpie (J/kg)
h_v	Coefficient de la convection du vent ($W/m^2.K$)
I	Rayonnement solaire incident (W/m^2)
I_b	Rayonnement de soleil direct
I_G	Rayonnement du soleil global
I_d	Rayonnement du soleil réfléchi
j	Numéro du jour dans l'année
L	Longueur caractéristique (m), Longueur de la cavité (m)
\dot{m}	Débit massique (kg/s)
n	Nombre de vitre (-)
N_u	Nombre de Nusselt (-)
P	Pression (Pa)
P_{atm}	Pression atmosphérique ($mbar$)
P_r	nombre de pente (-)
Q	Puissance thermique (W)
q_u	Le flux utile (W)
q_{conv}	Le flux de convection (W)
R_b	Facteur de rapport de rayonnement
R	Résistance thermique (K/W)
T	Température (K)
t	Temps (s)

TL	Temps légal (h)
TSL	Temps solaire local (h)
TSV	Temps solaire vrais (h)
TU	Temps universel (h)
U	Coefficient global des pertes thermiques à l'avant du capteur ($W/m^2 \cdot K$)
u	Composante de la vitesse suivant l'axe x (m/s)
V	Vitesse du vent (m/s)
v	Composante de la vitesse suivant l'axe y (m/s)
\vec{v}	Vecteur de vitesse (m/s)
w	Composante de la vitesse suivant l'axe z (m/s), Hauteur d'eau condensable (cm) Eq. (I.15)
x	Coordonnée cartésienne (m)
y	Coordonnée cartésienne (m)
z	Coordonnée cartésienne (m), Distance zénithale ($^\circ$)

LETTRES GRECQUES

α	Diffusivité thermique (m^2/s), Coefficient d'absorption (-)
β	Inclinaison du plan ($^\circ$), Coefficient de dilatation thermique a pression constante ($1/K$)
γ	Hauteur angulaire du soleil ($^\circ$)
ε	Émissivité (-)
δ	Déclinaison du soleil ($^\circ$), Nombre de vagues de l'absorbeur ondulé (-)
η	Amplitude de l'absorbeur ondulé (m)
θ	Latitude ($^\circ$), Angle d'inclinaison du capteur solaire ($^\circ$)
λ	Conductivité thermique ($W/m \cdot K$), Longueur d'onde électromagnétique (μm)
μ	Viscosité dynamique ($Pa \cdot s$)
ν	Viscosité cinématique (m^2/s)
ρ	Masse volumique (kg/m^3)
σ	Fraction d'ensoleillement (-), Coefficient de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)
τ	Coefficient de transmission (-)
φ	Longitude ($^\circ$), Quantité scalaire
ψ	Azimut ($^\circ$)
ω	Angle horaire ($^\circ$)

NOMBRES ADIMENSIONNELS

<i>Gr</i>	Nombre de Grashof ($g\beta L^3 \Delta T / \nu^2$)
<i>N_u</i>	Nombre de Nusselt ($h \cdot L / \lambda$)
<i>Pr</i>	Nombre de Prandtl ($\mu \cdot C_p / \lambda$)
<i>Ra</i>	Nombre de Rayleigh ($Gr \cdot Pr$)
<i>Ra_{cr}</i>	Nombre de Rayleigh critique pour une cavité inclinée ($1708 / \cos \theta$)
<i>Re</i>	Nombre de Reynolds ($\rho v L / \mu$)

INDICES

<i>abs</i>	Absorbeur
<i>amb</i>	Ambiante
<i>ar</i>	Arrière
<i>av</i>	Avant
<i>c</i>	Ciel
<i>ca</i>	Capteur
<i>cs</i>	Constante solaire
<i>conv</i>	Convectif
<i>cr</i>	Critique
<i>Dif</i>	Diffus
<i>Dir</i>	Direct
<i>en</i>	Entrée
<i>f</i>	Fluide
<i>G</i>	Global
<i>is</i>	Isolant
<i>lat</i>	Latéral
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>p</i>	Pertes
<i>rad</i>	Radiatif
<i>s</i>	Solide
<i>so</i>	Sortie
<i>t</i>	Total
<i>ut</i>	Utile
<i>vit</i>	Vitre

ACRONYMES

2D	Bidimensionnel
CAO	Conception assistée par ordinateur
CFD	Computational Fluid Dynamics
EDP	Équations aux Dérivées Partielles
ET	Equation du temps
ICS	Integral Collector Storage
IR	Infrarouge
TU	Temps universel
TIM	Transparent insulating Materials
TL	Temps légal
TSL	Temps solaire local
TSV	Temps solaire vrais

INTRODUCTION GENERALE

Face à l'épuisement des ressources fossiles et aux défis du changement climatique, les énergies renouvelables se sont imposées comme une solution incontournable pour assurer une production énergétique durable. Ces énergies, telles que le solaire, l'éolien, l'hydraulique, et la biomasse, offrent des alternatives propres et renouvelables pour répondre aux besoins croissants en énergie tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces solutions, l'énergie solaire se distingue par son potentiel immense et sa disponibilité globale.

Les capteurs solaires plans jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie solaire en chaleur utilisable, que ce soit pour le chauffage de l'eau, le chauffage domestique, ou dans les processus industriels. Ces dispositifs sont essentiels pour capturer l'énergie solaire et la transformer efficacement, contribuant ainsi à une utilisation plus vaste et efficace de cette ressource naturelle.

Le premier chapitre de ce mémoire explore les différentes sources d'énergie renouvelable, soulignant leur importance dans le contexte énergétique actuel et futur. Le deuxième chapitre est dédié à une analyse bibliographique des capteurs solaires plans, couvrant leur bilan thermique et optique ainsi que l'impact de diverses stratégies, notamment celle des nids d'abeilles, sur leurs performances. Cette revue permet de situer les capteurs solaires dans le paysage des technologies renouvelables et de comprendre les avancées et les défis associés à leur optimisation.

Dans le troisième chapitre, une approche numérique est présentée pour évaluer les performances thermiques des capteurs solaires plans. Ce chapitre décrit les équations gouvernantes et l'utilisation de la CFD (Computational Fluid Dynamics) pour simuler et analyser les performances du capteur. La simulation numérique permet d'explorer les effets des modifications structurelles et des conditions opérationnelles sur l'efficacité du capteur.

Le quatrième chapitre se concentre sur les résultats et discussions issus de cette analyse. En utilisant les données et les modèles développés, nous évaluons l'impact de la stratégie des nids d'abeilles sur les performances thermiques des capteurs solaires. Les résultats montrent comment cette stratégie peut réduire les pertes thermiques et augmenter l'efficacité globale du capteur, offrant des perspectives concrètes pour l'amélioration des technologies de captation solaire.

Ce mémoire vise à fournir une analyse complète et rigoureuse des capteurs solaires plans, intégrant des approches théoriques et numériques pour proposer des améliorations significatives dans leur conception et leur efficacité, en vue de favoriser une transition énergétique plus propre et plus efficace.

CHAPITRE I : ENERGIES RENOUVELABLES



Introduction

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce qui n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

Il est évident que la dynamique énergétique du 21^{ème} siècle rassemblera de nouveaux acteurs issus du secteur des énergies renouvelables assurant ainsi un développement durable.

Parmi les systèmes qui fonctionnent avec les énergies renouvelables, on mentionne les systèmes solaires fonctionnant avec l'énergie solaire et les systèmes éoliens fonctionnant avec l'énergie du vent.

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu général sur les énergies renouvelables, et précisément sur les systèmes solaires qui représentent l'actualité des énergies renouvelables.

I.1 Energies renouvelables

I.1.1 Définition

Bien que le terme « énergie renouvelable » soit relativement récent et ait été introduit en 1970, les énergies renouvelables ont été utilisées par l'homme depuis plusieurs centaines ou plusieurs milliers d'années.[1]

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

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables aux l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel etc. Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimités à l'échelle humain. [2]



Figure I-1 : Différentes sources d'énergie renouvelables.

I.1.2 Importance et avantage des énergies renouvelables

L'intérêt pour les énergies renouvelables est dû à plusieurs raisons, dont les plus importantes sont :

- **Améliorer la santé globale :** L'utilisation du charbon et du gaz entraîne une pollution de l'air et de l'eau et la survenue de nombreux problèmes de santé, ils peuvent être éliminés par l'exploitation des énergies renouvelables car ils produisent de l'énergie sans aucune émission qui peut causer la pollution.
- **L'énergie renouvelable élève le niveau de développement économique :** L'énergie renouvelable a considérablement contribué à relever le niveau de croissance économique dans les pays qui l'utilisent, car elle constitue un domaine d'investissement important
- **Inactivité :** L'énergie renouvelable est inépuisable, par rapport aux autres sources d'énergie fossiles. Elles sont présentes en permanence et bien disponibles partout dans le monde.
- **Les énergies renouvelables nous fournissent du carburant au moindre coût :** En plus des avantages précédents, l'énergie renouvelable est gratuite lorsqu'elle est exploitée et le processus de création pour la première fois est peu coûteux par rapport aux coûts continus des autres ; L'installation d'éoliennes ou de panneaux solaires n'est pas plus coûteuse que de creuser des puits pour l'extraction et l'exploration de pétrole [3].

I.1.3 Energies renouvelables dans l'Algérie

En raison de la présence d'énormes capacités naturelles dans notre pays, l'Algérie est l'un des pays candidats pour que les experts en énergie jouent un rôle majeur dans le domaine de la capacité renouvelable.

Selon la figure (I.2), d'ici 2030, la production d'électricité sera principalement basée sur l'énergie solaire et éolienne, et environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable. Cependant, pour atteindre cet objectif, des efforts supplémentaires et des projets innovants doivent être menés. Malgré le fait qu'il s'agisse d'un investissement coûteux, il peut aider à développer le pays avec le temps, surtout étant donné que l'Algérie perd actuellement un grand pourcentage des énergies fossiles. [4]

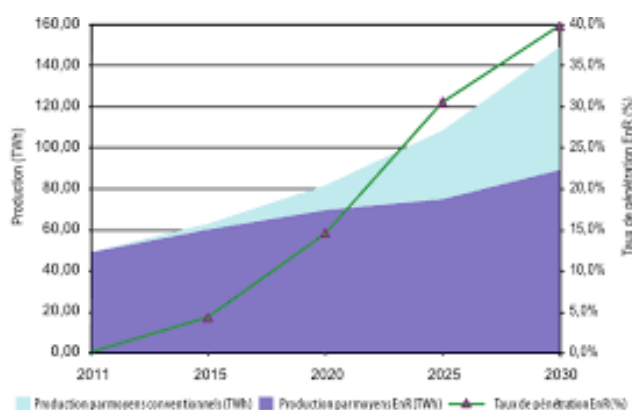


Figure I-2 : Présentation des énergies renouvelables dans la production nationale.

I.1.4 Différentes sources d'énergies renouvelables

Il existe une grande variété d'énergies renouvelables. Les principales sources d'énergie sont l'énergie éolienne ou de vent, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique, la biomasse et l'énergie solaire.

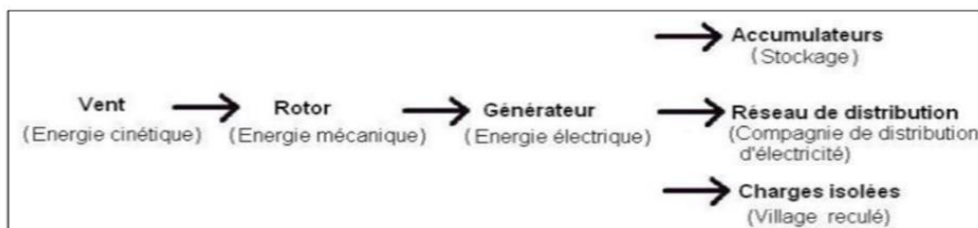
I.1.4.1 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. La Terre est chauffée inégalement par le soleil, ce qui crée des zones de températures et de pression distinctes dans l'atmosphère. Ces différences de pression provoquent des mouvements d'air, appelés vent. Les éoliennes, également appelées aérogénérateurs, exploitent le vent pour générer de l'énergie électrique et autre mécanique [5]

Les éoliennes montrent à la fois sur terre et en mer d'excellentes capacités de production et sont des alternatives intéressantes pour les régions les plus reculées où l'accès à l'électricité est difficile. [6]

1.1.4.1.1 Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne repose sur la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique. On peut le résumer dans le schéma suivant :



Une éolienne est constituée des pales, d'une nacelle, d'un système d'orientation, d'un mât et d'une armoire de couplage au réseau électrique

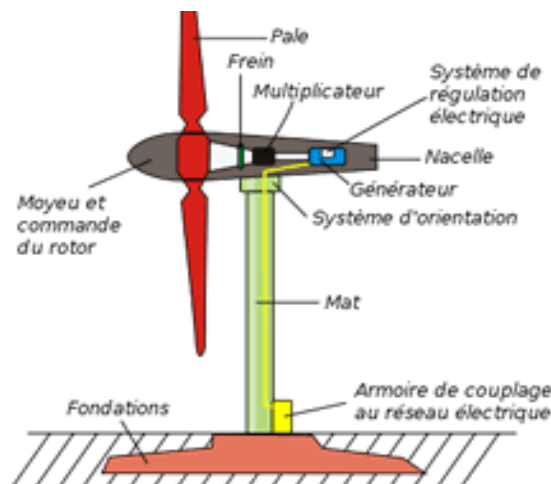


Figure I-3 : Fonctionnement d'énergie éolienne.

1.1.4.2 L'énergie hydraulique

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. On discerne le petit hydraulique (Inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée qui implique

des installations de production d'énergie plus petites et souvent dispersées on va considérer essentiellement le petit hydraulique, Le petit hydraulique est constitué en grande majorité par des centrales au fil de l'eau ce qui les rend fortement dépendantes du débit des cours d'eau. [9]

1.1.4.2.1 Principe de fonctionnement des énergies hydraulique

Il s'agit de produire de l'électricité en utilisant la force motrice de l'eau. L'eau des barrages ou des sources d'eau peut être utilisée pour faire tourner la turbine d'une génératrice. Ensuite, l'énergie hydraulique est transformée en énergie mécanique. Cette turbine est mécaniquement connectée à un alternateur pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. [10]

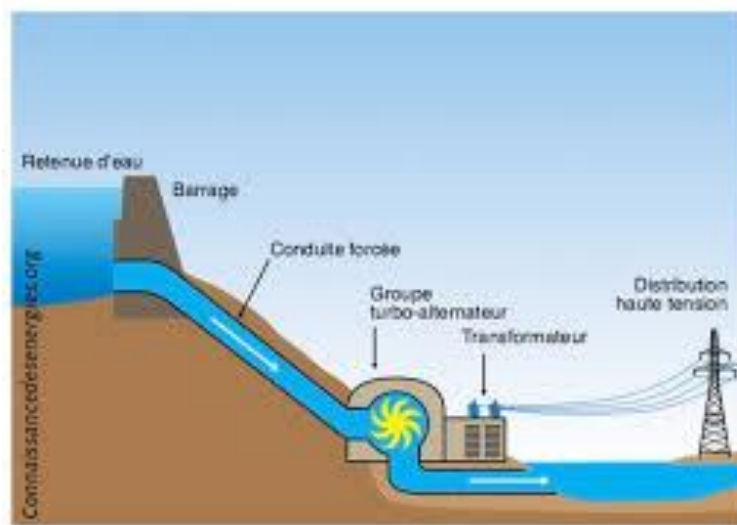


Figure I-4 : Fonctionnement d'énergies hydraulique.

1.1.4.3 L'énergie géothermique

La géothermie est un terme dérivé des mots grecs géo (la terre) et thermos (la chaleur) et qui fait référence à la fois à la science qui étudie les phénomènes thermiques internes de la Terre, ainsi qu'à la technologie qui vise à les exploiter. Par conséquent, la géothermie peut également être utilisée pour décrire l'énergie. L'énergie géothermique produite par la Terre est transformée en chaleur.

Afin de récupérer l'énergie géothermique, un liquide est envoyé dans les profondeurs de la planète pour circuler. Ce fluide peut être une nappe d'eau chaude captive naturelle ou de l'eau injectée sous pression pour briser une roche chaude et imperméable. Le fluide se réchauffe et

remonte charger de calories (énergie thermique) dans les deux cas. Ces calories sont transformées en électricité directement ou partiellement. [14]

1.1.4.3.1 Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique

Le principe est d'extraire l'énergie géothermique du sol pour la transformer en chauffage ou en électricité. La géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, la pluie et le vent). La chaleur du sol peut être utilisée pour chauffer de l'eau qui est envoyée dans les maisons ou pour convertir de l'eau en vapeur qui fait tourner une turbine.

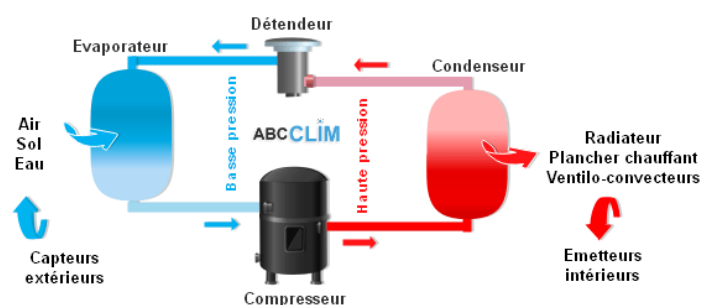


Figure I-5 : Fonctionnement d'énergie géométrique.

1.1.4.4 L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge

La plupart des utilisations de l'énergie solaire sont directes, comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau.

1.1.4.4.1 Potentiel solaire en Algérie

Le rayonnement solaire de la région près de la mer est influencé par les saisons, mais l'Algérie est l'un des pays avec le plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. Les zones sahariennes reçoivent une plus grande quantité d'énergie, mais elles sont caractérisées

par une plus de température de l'air. En tenant compte de cette diversité, la quantité totale d'énergie reçue est estimée à 169 400 TWh par an, soit 5000 fois la consommation annuelle d'énergie du pays. (Expliquer) La carte de l'irradiation solaire en Algérie est illustrée dans la figure suivante [17].

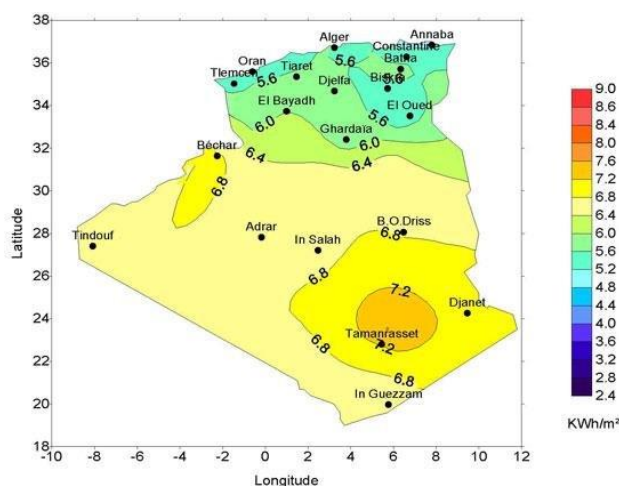


Figure I-6 : Carte d'éclairement solaire de l'Algérie.

1.1.4.4.2 Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes.

1.1.4.4.2.1 Mouvement de la terre

La terre est animée d'un mouvement de rotation direct et uniforme d'ouest en est, autour de son axe unissant ses deux pôles. En prenant le soleil comme point de référence, ce mouvement est appelé rotation de la terre sur elle-même. Ce mouvement s'accomplit en une période moyenne de 24 heures.

Si l'on distingue sur un papier les différentes positions de coordonnées équatoriales qu'occupe la terre durant toute l'année dans la sphère céleste, et qui joint ces points d'un trait continu, on obtient un cercle appelé l'écliptique.

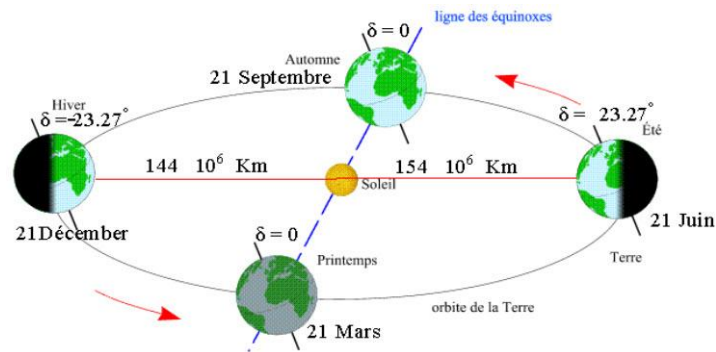


Figure I-7 : Mouvement de la terre autour du soleil.

I.1.4.4.2.2 Position du soleil par rapport à la terre

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

I.1.4.4.2.3 Coordonnées géographiques terrestres

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

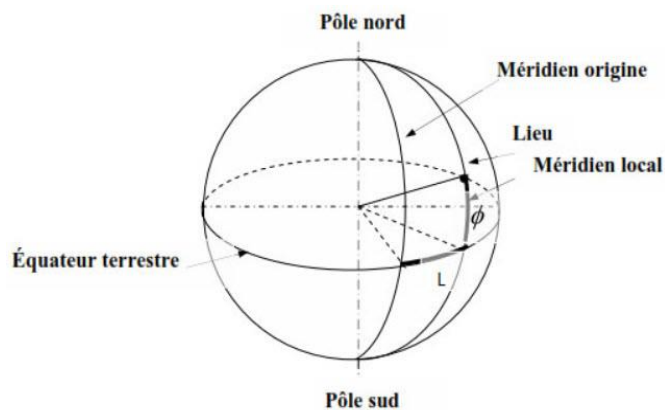


Figure I-8 : Cordonnée terrestre d'un milieu donné

(a) Latitude (ϕ)

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud.

(b) Longitude (L)

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète, est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et négative à l'est du méridien origine.

(c) Méridien

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude. Le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien.

I.1.4.4.2.4 Les coordonnées équatoriales

(a) Déclinaison (δ)

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année comme, elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'été ($+23^\circ,27'$) et au solstice d'hiver.

Son expression est donnée par :

$$\delta = 3,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (\text{I.1})$$

Où n est numéro de jours à partir du 1^{er} janvier

(b) L'angle horaire (ω)

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante

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

Où TSV est le temps solaire vrai

I.1.4.4.2.5 Coordonnées horizontales

Les coordonnées horizontales ou le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère les coordonnées du soleil sont :

(c) Hauteur du soleil γ

C'est l'angle formé par le plan horizontal du lieu d'observation avec la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0° (lever au coucher du soleil) à 90° (soleil au zénith). La hauteur angulaire du soleil γ est alors donnée par la formule suivante :

$$\sin\gamma = \sin\theta \cdot \sin\delta + \cos\theta \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (\text{I.3})$$

(d) L'azimut ψ

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné par la relation suivante :

$$\Psi = \sin^{-1}\left(\frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\gamma)}\right) \quad (\text{I.4})$$

(e) Angle d'incidence i

L'angle d'incidence i est l'angle formé par le vecteur directionnel du faisceau solaire et la normale sortante au plan. Pour une surface d'orientation quelconque par rapport au méridien local, la relation trigonométrique pour l'angle d'incidence a été donnée en détail par relation suivante :

$$\begin{aligned} \cos i = & \cos(\delta) \sin(\omega) \cos(\gamma) \sin(\alpha) + (\cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\varphi) + \sin(\delta) \cos(\alpha) \cos(\gamma \cos(\alpha))) \\ & + (\cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\varphi) \sin(\gamma)) \end{aligned} \quad \text{I.5}$$

I.1.4.4.2.6 Heures et temps

La terre subit deux types de déplacement : La rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la rotation de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de 15° . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai.

(a) Temps universel

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire. Pour en déduire le temps légal (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire.

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.7)$$

Où, ΔH est le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré

(b) Temps solaire local

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude et elle est définie comme suit :

$$TSL = \frac{TU + \varphi}{15} \quad (I.8)$$

(c) Temps solaire vrai (TSV)

$$TSV = TSL + ET \quad (I.9)$$

Où, ET est l'équation du temps

$$ET = (0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615\cos 2B - 0,04089\sin 2B)(229,18) \quad (I.10)$$

Où

$$B = (n - 1)360/365 \quad (I.11)$$

1.1.4.3 Rayonnement solaire au sol

Le rayonnement solaire est l'énergie émise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur, qui atteint la Terre après avoir traversé l'atmosphère. Cette énergie solaire est essentielle à de nombreux processus naturels et constitue une source d'énergie renouvelable majeure. Le rayonnement solaire se décompose en trois principales composantes : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi. Chacune de ces composantes joue un rôle important dans la quantité totale d'énergie solaire disponible pour les systèmes photovoltaïques et thermiques, ainsi que dans les études climatiques et météorologiques.

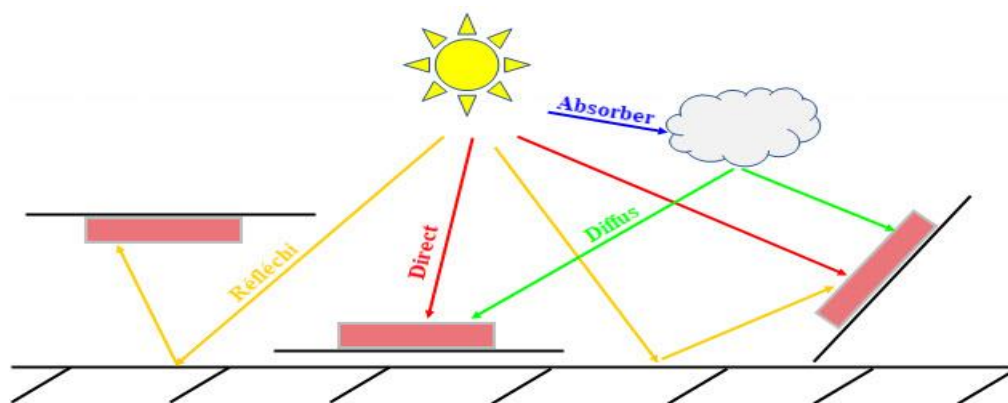


Figure I-9 : Rayonnement direct, diffus et réfléchi.

I.1.4.4.3.1 Rayonnement Direct

Le rayonnement direct est la portion du rayonnement solaire qui atteint directement la surface terrestre sans être diffusée ou déviée par l'atmosphère. Il voyage en ligne droite depuis le soleil et peut être fortement influencé par des facteurs comme la position du soleil, la transparence de l'atmosphère, et les conditions météorologiques (par exemple, la présence de nuages ou de brouillard).

I.1.4.4.3.2 Rayonnement Diffus

Le rayonnement diffus est la portion du rayonnement solaire qui a été dispersée dans différentes directions par les molécules d'air, les particules en suspension, les nuages, et d'autres éléments de l'atmosphère. Contrairement au rayonnement direct, il ne vient pas directement du soleil mais de l'ensemble du ciel.

I.1.4.4.3.3 Rayonnement Réfléchi (ou Albédo)

Le rayonnement global est donc l'addition du rayonnement direct, diffus et réfléchi. Il représente la totalité de l'énergie solaire disponible pour des systèmes solaires, qu'ils soient photovoltaïques ou thermiques.

I.1.4.4.4 Application de l'énergie solaire

L'éventail des applications de l'énergie solaire est relativement large. Il va de l'électrification à l'agriculture en passant par la climatisation, le chauffage, la production de l'eau chaude solaire et le pompage solaire.

I.1.4.4.4.1 L'électrification

- L'éclairage domestique : toutes vos ampoules domestiques peuvent utiliser l'énergie solaire. Un panneau de 100 w pourrait vous permettre d'utiliser jusqu'à 10 ampoules LED de 10 kWh dans votre maison.
- L'éclairage public, avec les lampadaires solaires.
- Les équipements électriques pour la maison : vos panneaux produisent du courant continu. Il sera transformé en courant alternatif par l'onduleur de votre installation, qui sera utilisé par tous vos appareils électriques, tels que le lave-linge, les micro-ondes, les télévisions, les ventilateurs, les climatiseurs, les réfrigérateurs, etc.

I.1.4.4.4.2 Climatisation

Les besoins en climatisation sont très importants aux différentes parts d'avril à mi-juin le besoin se fait sentir, de mi-juin à mi-décembre, la vie est quasiment impossible sans climatisation. Or, la climatisation coûte cher. L'énergie solaire vient ici à la rescousse en permettant de diviser par trois votre facture énergétique liée à la climatisation.

L'énergie solaire peut être utilisée pour la climatisation de 2 manières :

- En premier lieu, en produisant de l'électricité qui peut être utilisée pour faire fonctionner un climatiseur classique : cette option n'est pas recommandée car elle est très coûteuse. Cela est dû au fait que le climatiseur sera généralement très consommateur (plus de 2000 kWh) et qu'il fonctionnera avec du courant alternatif qui doit être converti par un onduleur avec une puissance conséquente.
- En faisant fonctionner directement les climatiseurs solaires : ces appareils ont généralement une meilleure efficacité énergétique (Coefficient SEER), ce qui leur permet d'avoir une consommation énergétique réelle de 600 kilowattheures pour les modèles 12 BTU.

I.1.4.4.4.3 Production d'eau chaude

Les panneaux solaires aérovoltaiques et les capteurs solaires thermiques utilisent la chaleur du soleil pour chauffer de l'eau. Cette eau peut être utilisée à des fins sanitaires, ce qui la dirige vers un ballon d'eau chaude, ou à des fins de chauffage, ce qui la dirige vers des radiateurs ou un plancher chauffant.

Un chauffe-eau solaire peut couvrir jusqu'à cent pour cent des besoins d'eau chaude du ménage. Les températures élevées permettent un excellent rendement et les besoins en eau chaude sont assez faibles. La plupart des ménages auront souvent suffisamment d'un chauffe-eau solaire de 150 litres. Une troisième utilisation est le chauffage des piscines.

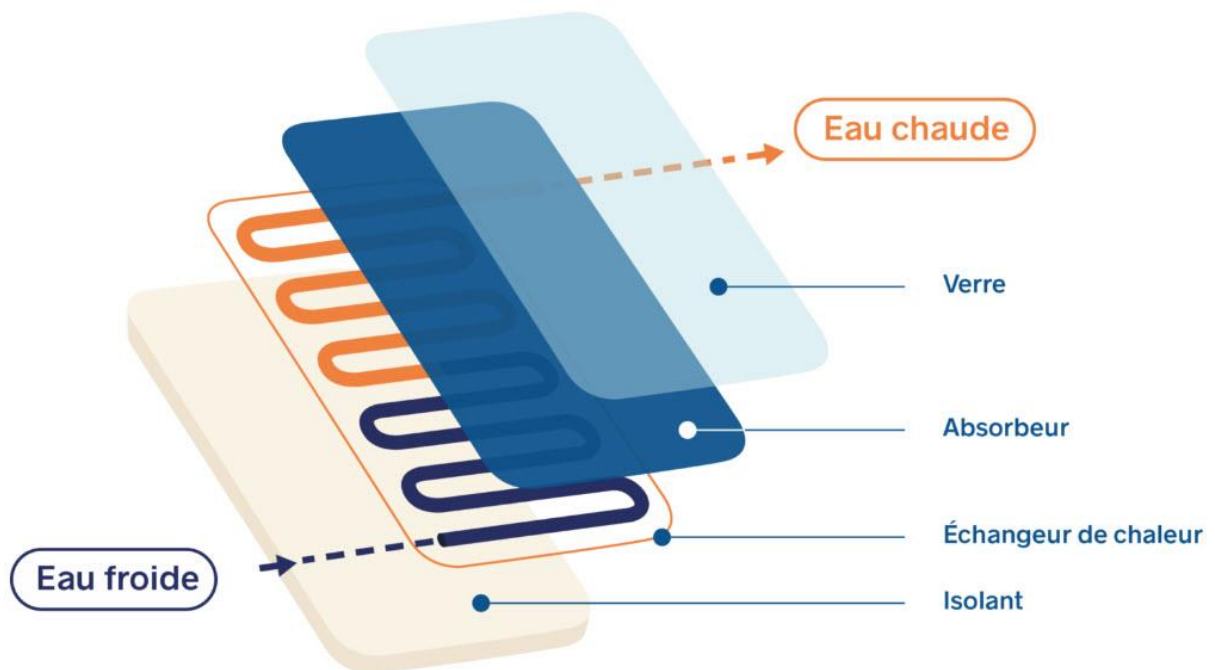
Conclusion

En conclusion, les énergies renouvelables représentent un pilier essentiel de la transition vers un avenir énergétique durable et respectueux de l'environnement. Leur adoption croissante est le résultat d'une prise de conscience accrue des défis posés par les combustibles fossiles, tels que le changement climatique, la pollution de l'air et la dépendance énergétique.

Les énergies renouvelables offrent de nombreux avantages, notamment une source d'énergie propre et inépuisable, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la création d'emplois locaux et la stimulation de l'innovation technologique. De plus, elles contribuent à la diversification des sources d'énergie et renforcent la sécurité énergétique des pays.

Cependant, malgré leur potentiel, les énergies renouvelables font face à des défis tels que la variabilité des ressources, les coûts initiaux élevés et les problèmes d'intégration dans les réseaux électriques existants. Pour surmonter ces obstacles, des investissements continus dans la recherche, le développement et le déploiement des technologies renouvelables sont nécessaires, ainsi que des politiques publiques favorables et des incitations financières.

II. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE



Introduction

Les capteurs solaires plans représentent une innovation clé dans la quête d'alternatives durables aux énergies fossiles. Au cours des dernières décennies, les scientifiques du monde entier ont intensifié leurs recherches sur ces technologies pour répondre aux besoins croissants en énergie tout en limitant l'impact environnemental. Dans ce chapitre, nous explorons les différents types de capteurs solaires plans et leur fonctionnement. Nous examinons comment la chaleur est transférée et quelles pertes thermiques peuvent survenir, et nous passons en revue les études les plus récentes visant à améliorer leur efficacité.

Ce chapitre explore les capteurs solaires plans et est divisé en trois sections. La première examine différents types de capteurs solaires plans, comme les capteurs à tubes sous vide et les capteurs à plaque plate, en décrivant leurs caractéristiques et applications. La deuxième section analyse les modes de transfert de chaleur, y compris la conduction, la convection et le rayonnement, tout en discutant des pertes thermiques et des stratégies pour les minimiser. Enfin, la troisième section propose une revue de la littérature sur les techniques innovantes pour optimiser les performances des capteurs solaires, en mettant l'accent sur les matériaux avancés, les designs améliorés et l'intégration de technologies nouvelles. Les tendances actuelles et les perspectives futures du domaine des capteurs solaires sont également abordées.

II.1 Capteur solaire

Les capteurs solaires thermiques, ou panneaux solaires héliothermiques, sont des dispositifs conçus pour capter l'énergie du rayonnement solaire et la convertir en chaleur, laquelle est ensuite transférée à un fluide caloporteur, liquide ou gaz. Cette chaleur peut être utilisée pour chauffer des bâtiments, produire de l'eau chaude sanitaire, ou servir à diverses opérations industrielles [15]. Contrairement aux échangeurs traditionnels, les capteurs solaires travaillent avec des densités d'irradiance relativement faibles et des longueurs d'onde de 0,3 à 3 μm [16]. Les capteurs solaires se divisent en deux grandes familles : les capteurs non concentration, fixes, et les capteurs à concentration, équipés de systèmes de suivi de la course du Soleil [17].

II.1.1 Capteurs à concentration

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans leur foyer ponctuel ou linéaire. Les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée se trouvent dans les foyers ponctuels ou le long des foyers linéaires. Ces concentrateurs doivent naturellement suivre le mouvement du soleil.

II.1.1.1 Capteur cylindro-parabolique

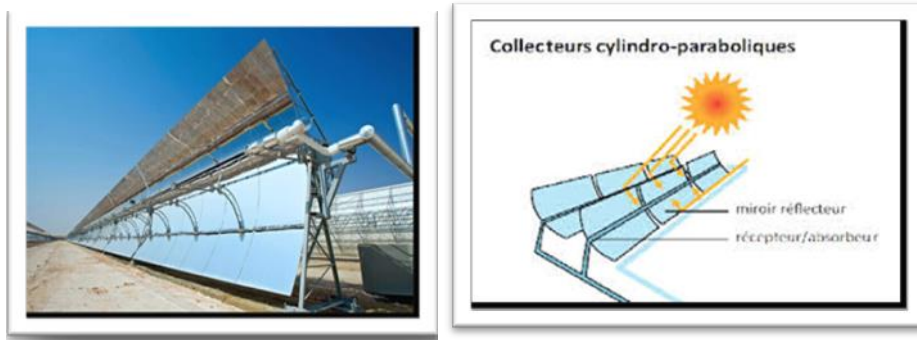


Figure II-1 : Capteur cylindro-parabolique.

II.1.1.2 Capteur parabolique

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur deux axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante.



Figure II-2 : Capteur parabolique

II.1.2 Capteurs non-concentration

II.1.2.1 Capteur a tube sous vide

Les tubes sous vide sont utilisés dans les capteurs solaires thermiques pour minimiser les pertes de chaleur par convection. Chaque tube comprend un absorbeur qui capte le rayonnement solaire et un échangeur qui transfère l'énergie thermique. Pour être efficace, le niveau de vide dans le tube doit être inférieur à 10-3Pa. Si le tube n'est pas totalement hermétique, il devient inutilisable et doit être remplacé. Les tubes comportent un indicateur à base de baryum qui devient blanc en cas de perte de vide, signalant ainsi qu'un remplacement est nécessaire.

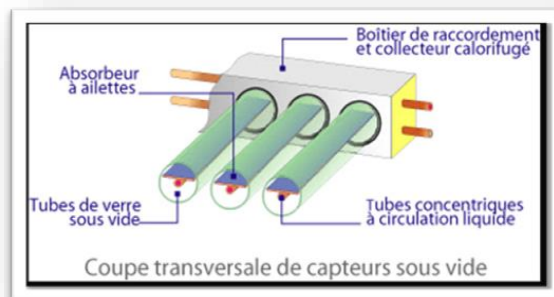


Figure II-3 : Capteur solaire sous vide.

II.1.2.2 Capteur solaire plan

Les capteurs solaires plans sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Sans concentration du rayonnement solaire, Les capteurs solaires plans captent le rayonnement solaire à l'aide d'une plaque peinte en noir dotée de petits tuyaux conçus pour transporter le fluide caloporteur. Lorsque ce fluide (liquide ou air) circule à travers ces tuyaux, sa température augmente grâce à la chaleur absorbée par la plaque noire, La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour [18].

- Chauffer les locaux et fournir l'eau chaude sanitaire.
- Activer la croissance des végétaux.
- Sécher les grains et les fourrages.
- Faire fonctionner des moteurs thermiques.
- Alimenter des machines de réfrigération.

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150° C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil. [19]

II.1.2.2.1 Composant d'un capteur plan

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

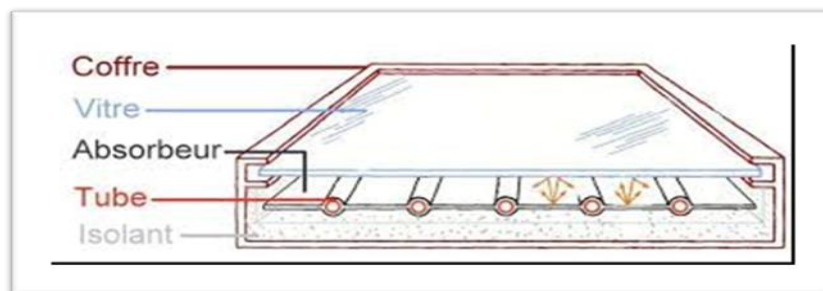


Figure II-4 : Composante d'un capteur plan

II.1.2.2.1.1 Couverture transparente

Les capteurs solaires plans sont généralement recouverts d'une ou deux plaques transparentes pour augmenter leur efficacité, car elles permettent au rayonnement solaire de passer tout en retenant les radiations infrarouges. Dans certains cas, comme le chauffage des piscines, il est possible d'utiliser des capteurs sans couverture. Les matériaux couramment utilisés pour ces plaques comprennent le verre et les plastiques renforcés.

II.1.2.2.1.2 Absorbeurs

Les absorbeurs des capteurs solaires transforment le rayonnement du soleil en chaleur, qui est ensuite transmise à un fluide caloporteur. Pour une efficacité optimale, ils doivent avoir une haute absorption du rayonnement solaire et une faible émissivité dans l'infrarouge pour limiter les pertes de chaleur. L'absorbeur, permet d'atteindre ces caractéristiques, maximisant ainsi l'efficacité énergétique des capteurs solaires.

II.1.2.2.1.3 Isolation

L'isolation est essentielle pour les applications thermiques de l'énergie solaire, car elle réduit les pertes de chaleur par conduction et convection. Pour être efficace, un isolant doit être opaque aux rayonnements infrarouges, avoir une faible conductivité thermique, une faible densité et une faible chaleur massique.

II.1.2.2.1.4 Fluide caloporteur

Le fluide caloporteur est utilisé pour transporter la chaleur entre différentes sources de température. Les principaux critères pour choisir ce fluide incluent une conductivité thermique élevée, une faible viscosité, et une capacité calorifique élevée. Dans les capteurs solaires plans, les fluides couramment utilisés sont l'eau avec un antigel (comme l'éthylène glycol) ou l'air.

II.1.2.2.1.5 Coffre

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques [20].

II.1.2.2.2 Orientation et inclinaison d'un capteur solaire plan

Les capteurs solaires sont orientés et inclinés suivant l'utilité que l'on désire donner au système. En général, l'orientation des capteurs dans l'hémisphère nord doit être plein sud, car le soleil suit chaque jour une trajectoire apparente Est-sud-ouest, à l'opposé dans l'hémisphère sud où l'orientation doit être vers le nord.

Beaucoup d'études ont été menées pour déterminer ou du moins estimer, le meilleur angle de l'inclinaison des capteurs solaires. En pratique, la règle générale pour une utilisation annuelle est $\varphi + 10^\circ$, tel que φ est la latitude du lieu, alors que certains chercheurs suggèrent deux valeurs pour l'angle optimal de l'inclinaison, une pour l'été ($\varphi - 20^\circ$) et l'autre pour l'hiver ($\varphi + 20^\circ$). Des programmes informatiques ont été utilisés et les résultats ont montré que l'angle optimum de l'inclinaison est presque égal à la latitude du lieu [21].

II.2 Modes de transfert de chaleur et pertes thermiques du capteur solaire plan

Le transfert de chaleur intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'intervient entre eux une différence de température, et cela quel que soit le milieu, même vide qui les sépare.

On distingue trois types de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement). Ces trois modes sont présents dans n'importe quelle conception d'énergie solaire dans le but d'augmenter son efficacité.

II.2.1 Différents modes de transfert de chaleur d'un capteur solaire plan

II.2.1.1 Conduction

La conduction thermique est un transfert de chaleur qui se produit au sein d'un matériau, à l'échelle microscopique, en raison des variations de température entre différentes parties d'un corps. Ce flux de chaleur se propage jusqu'à ce que la température s'uniformise, sans échange de matière, uniquement d'énergie. Dans les solides, ce transfert s'effectue par le mouvement des vibrations dans le réseau cristallin, dû à l'agitation thermique des atomes. Ce processus suit la loi de Fourier, qui relie le flux de chaleur au gradient de température. Jean-Baptiste Biot a développé l'équation en 1804, et Joseph Fourier l'a confirmée expérimentalement en 1822 [22].

$$q = -\lambda \cdot s \left(\frac{dt}{dx} \right) \quad (\text{II.1})$$

- q : Flux de chaleur transmis par conduction (W)
- λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)
- dt/dx : Gradient de température en x (K.m^{-1})

II.2.1.2 Rayonnement

Le rayonnement est un transfert thermique qui ne nécessite pas de milieu matériel par opposition aux deux autres. Effectivement, ce genre de transfert thermique est causé par l'émission des rayons électromagnétiques et transmet l'énergie. Ils sont émis par un corps chaud, tel que le soleil, et échauffent le corps qui les reçoit dans ce cas nous avons la relation suivante [14].

$$q (w) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot s (T_s - T_a) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- q : flux de chaleur transmis par rayonnement (w)
- σ : constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8}$)
- ε : facteur d'émission de la surface
- T_s : Température de la surface (K)
- T_a : Température du milieu environnant la surface (K)
- S : la surface (m^2)

II.2.1.3 Convection

La convection est un mécanisme de transport d'énergie qui combine la conduction, le stockage d'énergie et le mouvement du milieu, jouant un rôle clé dans le transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide (liquide ou gaz). Le processus commence par la conduction de la chaleur de la surface vers les molécules du fluide environnant, augmentant leur température. Ces molécules chaudes se mélangent avec d'autres molécules, transférant une partie de leur énergie par mouvement. Cette énergie est ensuite stockée dans le fluide et transportée par son mouvement, complétant ainsi le processus de convection [23].

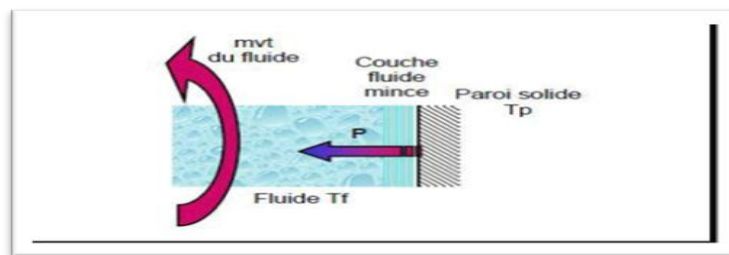


Figure II-5 : Action de fluide en mouvement avec le fluide.

La puissance transférée par convection est donnée par la relation :

$$q = hs (T_s - T_a) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- q : flux de chaleur transmis par convection (W)
- h : coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$)
- T_s : température de surface du solide (K)
- T_a : température de fluide loin de la surface du solide (K)
- S : Aire de la surface de contact solide /fluide (m^2)

La transmission de chaleur par convection est désignée selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre (naturelle) et convection forcée.

II.2.1.4 Convection forcée

La convection forcée est un mécanisme de transfert de chaleur où le mouvement du fluide est induit par des forces mécaniques externes, indépendamment des phénomènes thermiques. Un gradient de pression externe pousse les particules du fluide à se déplacer, générant un flux de convection. Ce type de convection est utilisé lorsque le mouvement du

fluide n'est pas provoqué par des variations de température, mais par des éléments mécaniques tels que des ventilateurs ou des pompes [24].

II.2.1.5 Convection naturelle

La convection naturelle se produit lorsque le mouvement du fluide résulte de variations de densité causées par des différences de température. Ces variations de densité entraînent des forces gravitationnelles qui influencent le mouvement des particules du fluide. La convection naturelle se produit généralement lorsque le fluide est en contact avec une paroi plus chaude ou plus froide, créant des différences de masse volumique et déclenchant le mouvement. Ce mécanisme de transfert de chaleur est utilisé dans diverses applications industrielles, notamment dans les échangeurs de chaleur, où deux fluides en mouvement échangent de l'énergie à travers une paroi solide [25].

II.2.1.6 Nombres adimensionnels

Les nombres adimensionnels jouent un rôle très important dans les phénomènes de transfert de chaleur par convection. Ci-dessous les nombres les plus importants [26] :

- **Le nombre de Reynolds** : C'est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses

$$Re = \rho U L / \mu = U L / \nu \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- ρ : la densité masse volumique du fluide (kg/m^3)
- U : la vitesse (m/s)
- L : la longueur caractéristique du système étudié
- μ et ν : les viscosités respectivement dynamiques ($Pa \cdot s$) et cinématique (m^2/s).
- **Nombre de Prandtl** : Le nombre Prandtl est un nombre sans dimension. C'est le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique [26].

$$Pr = \nu / \alpha \quad (\text{II.5})$$

- **Nombre de Rayleigh** : Le nombre de Rayleigh est un nombre sans dimension utilisé pour décrire le transfert de chaleur par convection naturelle, combinant les effets de

la flottabilité et de la viscosité dans un fluide. Il est étroitement lié au nombre de Grashof, qui mesure la relation entre la flottabilité et la viscosité, et au nombre de Prandtl, qui quantifie la relation entre la diffusivité Momentum et la diffusivité thermique. Le nombre de Rayleigh est simplement le produit du nombre de Grashof et du nombre de Prandtl, reflétant à la fois les aspects mécaniques et thermiques de la convection naturelle [26].

$$Ra = Gr Pr = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu \alpha} \quad (\text{II.6})$$

- **Nombre de Nusselt :** Représente le rapport entre le flux transmis réellement vers la plaque et le flux qui serait transmis en régime purement conductif

$$Nu = hl/\lambda \quad (\text{II.7})$$

II.3 Bilan thermique d'un capteur solaire

Le rendement η de la conversion de l'énergie du rayonnement solaire en chaleur utilisable dans le capteur solaire résulte du rapport du flux thermique utile transporté par le fluide caloporteur Q_{ut} à celui du rayonnement global incident I_G sur le capteur solaire

$$\eta = \frac{Q_{ut}}{I_G} \quad (\text{II.8})$$

Alors, pour calculer le rendement il faut d'abord déterminer l'énergie utile utiliser pour chauffer le fluide caloporteur et le rayonnement reçu par le capteur

II.3.1 Rayonnement reçu par le capteur solaire

Généralement, les collecteurs ne sont pas installés horizontalement mais selon un angle pour augmenter la quantité de rayonnement capter et réduire les pertes par réflexion. C'est-à-dire il est nécessaire de connaître la quantité du rayonnement reçu par cette surface incliné. Les données météorologiques constituent la meilleure source d'informations pour estimer le rayonnement incident moyen. En l'absence de ces données ou de données provenant d'endroits proches présentant un climat similaire, il est possible d'utiliser des relations empiriques pour estimer le rayonnement en fonction des heures d'ensoleillement ou de nébulosité.

Les modèles les plus utilisés pour estimer le rayonnement reçu par une surface inclinée sont :

- **Modèle isotrope** : Le modèle de ciel isotrope est le modèle le plus courant et le plus simple. Il suppose une distribution uniforme de l'irradiation solaire diffuse sur la voûte céleste. Les parties circumsolaire et brillance de l'horizon sont supposées égales à zéro. Une composante diffuse de tout le ciel qui est uniformément rayonnée sur la voûte céleste. On trouve plusieurs modèles isotropes les plus souvent sont : le modèle de Badescu, le modèle de Tian, le modèle de Korokanis et le modèle de Liu et Jordan ce dernier et le modèle le plus utilisé.
- **Modèles anisotropes** : Les modèles anisotropes d'estimation du rayonnement solaire sont des méthodes qui prennent en compte la distribution non uniforme du rayonnement diffus. Contrairement aux modèles isotropes, qui supposent une répartition égale dans toutes les directions, les modèles anisotropes considèrent les variations directionnelles du rayonnement diffus, souvent en intégrant des composantes comme le rayonnement circumsolaire et l'effet du ciel clair et des obstacles environnants, pour fournir des estimations plus précises du rayonnement reçu par une surface inclinée. Parmi ces modèles on trouve le modèle de Muneer, le modèle de Ma-Iqbal, le modèle de Willmot, le modèle de Bugler, le modèle de Reindel et le modèle de Perez. Ce dernier offre plusieurs avantages pour estimer le rayonnement solaire diffus sur des surfaces inclinées. Il est plus précis que les autres modèles, car il prend en compte les variations directionnelles du rayonnement diffus, y compris le rayonnement circumsolaire et l'effet de l'horizon. Adaptable à diverses conditions météorologiques, il est fiable dans différents environnements climatiques. De plus, il utilise des paramètres météorologiques disponibles, facilitant son intégration dans les bases de données climatiques et les simulations de systèmes solaires.

L'utilisation de ces modèles repose sur des connaissances sur la valeur de rayonnement reçu par la surface horizontale. Nous pouvons l'obtenir de cette valeur de rayonnement à partir des données météorologiques comme déjà mentionner. Ou, à partir des logiciels qui fournissent les données météorologiques et la valeur des trois composantes du rayonnement solaire pour n'importe quelle surface inclinée ou horizontale sur la surface de la terre. Parmi ces logiciels on trouve le logiciel PVGIS, le logiciel Solar GIS, le logiciel SAM et le logiciel Metéonorm ce dernier logiciel est celui que nous avons utilisé dans notre travail pour déterminer les données

météorologique et les trois composantes de rayonnement solaire reçu par la surface du capteur. [27].

II.3.2 Energie utile

II.3.2.1 Rayonnement reçu par l'absorbeur

Pour déterminer la valeur d'énergie utile il faut d'abord calculer la valeur de rayonnement reçu par l'absorbeur

L'énergie solaire incidente sur un capteur solaire plan incliné peut être déterminée par les modèles qui sont déjà mentionnés précédemment. A partir de cette énergie on peut calculer l'énergie solaire reçue par l'absorbeur du capteur en utilisant le modèle de diffusion isotrope qui est donné par la relation suivante :

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g I (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II.9})$$

Où :

- Les indices b, d et g représentent respectivement le rayonnement direct, diffus et réfléchi par le sol
- R_b Est le facteur de rapport de rayonnement. Il représente le rapport entre le rayonnement solaire direct incident sur un plan incliné et le rayonnement solaire direct incident sur un plan horizontal. Il est donné par la relation suivante :

$$R_b = \frac{\sin(L - \beta) \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega)}{\sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega)} \quad (\text{II.10})$$

- ρ_g L'albedo : c'est le rapport du rayonnement incident diffusé ou réfléchi sur le rayonnement incident. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albedo nul.
- $\tau\alpha$ Coefficient de transmissivité-absorptivités. C'est un paramètre utilisé pour déterminer la quantité d'énergie radiative qui traverse un matériau (comme le verre) et est ensuite absorbée par un autre matériau (comme l'absorbeur).

Pour déterminer l'énergie radiative reçu par l'absorbeur il faut calculer le coefficient de transmissivité-absorptivités $\tau\alpha$, où ce dernier est lié à d'autres paramètres optiques que nous allons discuter dans la suite.

II.3.2.2 Transmissivité d'un vitrage plan

Lorsqu'un faisceau de radiation frappe la surface d'une plaque transparente à un angle θ_1 , appelé angle d'incidence, comme illustré dans la Figure suivante, une partie de la radiation incidente est réfléchi et le reste est réfracté, ou dévié, à un angle θ_2 , appelé angle de réfraction, lorsqu'il traverse l'interface. L'angle θ_1 est également égal à l'angle auquel le faisceau est réfléchi de manière spéculaire par la surface. Les angles θ_1 et θ_2 ne sont pas égaux lorsque la densité du plan est différente de celle du milieu à travers lequel la radiation se déplace. Les deux angles sont liés par la loi de Snell :

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (\text{II.11})$$

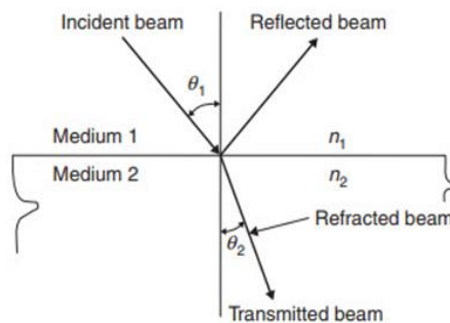


Figure II-6 : Réfraction et réflexion d'un rayon solaire dans un vitrage.

Où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction et n est le rapport des indices de réfraction des deux milieux formant l'interface. L'indice de réfraction est le facteur déterminant pour les pertes par réflexion à l'interface. Une valeur typique de l'indice de réfraction est de 1,000 pour l'air, 1,526 pour le verre et 1,33 pour l'eau. [28].

Les expressions des composantes perpendiculaires et parallèles du rayonnement pour les surfaces lisses ont été donné par Fresnel :

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (\text{II.12})$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (\text{II.13})$$

Les propriétés sont évaluées en calculant la moyenne de ces deux composantes (parallèle et perpendiculaire) :

$$r = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (\text{II.14})$$

De même, la transmission, τ_r (l'indice r indique que seules les pertes par réflexion sont prises en compte), calculée à partir de la transmission moyenne des deux composants comme suit :

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + (2N - 1)r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + (2N - 1)r_{\perp}} \right) \quad (\text{II.15})$$

Où N le nombre de vitrage. On note que cette relation est valable si les vitres sont identiques.

La transmittance τ_{α} (l'indice α indique que seules les pertes d'absorption sont prises en compte), calculée à partir de la relation suivante :

$$\tau_{\alpha} = e^{\left(-\frac{KL}{\cos \theta_2}\right)} \quad (\text{II.16})$$

Où K est le coefficient d'extinction, qui peut varier de 4 m^{-1} (pour le verre de haute qualité) à 32 m^{-1} (pour le verre de basse qualité), et L est l'épaisseur du vitrage.

La transmittance, la réflectance et l'absorbance d'un simple vitrage (en tenant compte des pertes par réflexion et par absorption) sont données par les expressions suivantes. Ces expressions concernent les composantes perpendiculaires de la polarisation, bien que les mêmes relations puissent être utilisées pour les composantes parallèles :

$$\tau_{\perp} = \frac{\tau_{\alpha}(1 - r_{\perp})^2}{1 - (r_{\perp}\tau_{\alpha})^2} = \tau_{\alpha} \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \left(\frac{1 - r_{\perp}^2}{1 - (r_{\perp}\tau_{\alpha})^2} \right) \quad (\text{II.17})$$

$$\rho_{\perp} = r_{\perp} + \frac{(1 - r_{\perp})^2 \tau_{\alpha}^2 r_{\perp}}{1 - (r_{\perp}\tau_{\alpha})^2} = r_{\perp}(1 + \tau_{\alpha}\tau_{\perp}) \quad (\text{II.18})$$

$$\alpha_{\perp} = (1 - \tau_{\alpha}) \left(\frac{1 - r_{\perp}}{1 - r_{\perp} \tau_{\alpha}} \right) \quad (\text{II.19})$$

Les propriétés sont évaluées en calculant la moyenne de ces deux composantes (parallèle et perpendiculaire) :

$$\tau = \frac{1}{2} (\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}) \quad (\text{II.20})$$

$$\rho = \frac{1}{2} (\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) \quad (\text{II.21})$$

$$\alpha = \frac{1}{2} (\alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel}) \quad (\text{II.22})$$

La combinaison du vitrage avec l'absorbeur est illustrée dans la Figure (II.7) à partir de cette figure on remarque que l'énergie radiative incidente tombant sur le capteur se divise en trois parties. Une partie réfléchiée par le vitrage vers l'ambiante, une deuxième partie absorber par l'absorbeur $\tau\alpha$ et une troisième partie réfléchiée par l'absorbeur vers le vitrage $(1-\alpha)\tau$. La réflexion de la plaque absorbeur est supposée diffuse, donc la fraction $(1-\alpha)\tau$ qui frappe le couvercle en verre est une radiation diffuse et $(1-\alpha)\tau\rho_D$ est réfléchiée vers l'absorbeur. La réflexion multiple de la radiation diffuse continue de sorte que la fraction de l'énergie solaire incidente finalement absorbée est :

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=1}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_D]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_D} \quad (\text{II.23})$$

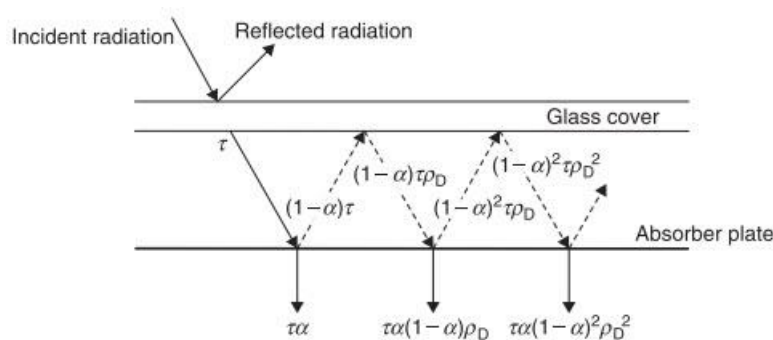


Figure II-7 :Ttransfert de rayonnement solaire entre le vitrage et l'absorbeur d'un capteur solaire pan.

Pour un angle d'inclinaison donné du capteur, β , les relations empiriques suivantes, donné par Brandemuehl et Beckman (1980), peuvent être utilisées pour trouver l'angle d'incidence effectif pour la radiation diffuse provenant du ciel, $\theta_{e,D}$, et la radiation réfléchié par le sol, $\theta_{e,G}$

$$\theta_{e,D} = 59,68 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2 \quad (\text{II.24})$$

$$\theta_{e,G} = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2 \quad (\text{II.25})$$

Après avoir calculé le coefficient de transmissivité-absorptivités on peut calculer l'énergie reçu par l'absorbeur.

A partir de l'énergie reçu par l'absorbeur l'énergie utile est calculé avec la relation suivante:

$$q_u = F_R A_P [S - U_t (T_{fe} - T_a)] \quad (\text{II.26})$$

Où :

F_R est le facteur de récupération de chaleur du capteur. Il est représenté le rapport du taux de gain de chaleur utile réel au gain qui se produirait si l'absorbeur était à la température d'entrée du fluide caloporteur partout. Il est donné par la relation suivante :

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{U_t A_P} \left[1 - \exp\left(\frac{F' U_t A_P}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (\text{II.27})$$

- \dot{m} débit massique
- U_t coefficient des pertes thermique totale du capteur.
- A_P surface de l'absorbeur
- F' représente le rapport entre la résistance thermique de la plaque absorbante et le milieu ambiant sur la résistance thermique entre le fluide et le milieu ambiant. Il est donné avec la relation suivantes :

$$F' = \frac{\frac{1}{U_t}}{W \left\{ \frac{1}{U_t [D + (W - D_{ex})F]} + \frac{\delta_l}{D_{ex} \lambda_l} + \frac{1}{\pi D_{in} h_f} \right\}} \quad (\text{II.28})$$

- W : La distance entre les tubes
- D_{ex} : Diamètre extérieur du tube
- D_{in} : Diamètre intérieure du tube

- δ_l : L'épaisseur moyenne de la liaison entre le tube et l'absorbeur
- λ_l : La conductivité thermique de la liaison
- h_f : Coefficient d'échange entre le tube et le fluide caloporteur
- T_{fe} : La température d'entrée du fluide
- T_a : La température ambiante
- F : Est l'efficacité des ailettes pour les ailettes droites avec un profil rectangulaire

$$F = \frac{\tanh[m(W - D_{ex})/2]}{m(W - D)/2} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$m = \sqrt{\frac{U_t}{\lambda_{abs}\delta_{abs}}} \quad (\text{II.30})$$

Où

λ_{abs} : la conductivité thermique de l'absorbeur

δ_{abs} : l'épaisseur de l'absorbeur

II.3.3 Expression du coefficient global de pertes

La Figure II.8 montre une représentation schématique des différentes pertes thermiques d'un capteur solaire plan. Ces pertes vers l'environnement sont une caractéristique importante pour un capteur solaire plan [19]. Lorsqu'une certaine quantité de rayonnement solaire tombe sur la surface d'un capteur, la plus grande partie est absorbée et livrée au fluide caloporteur et elle est emportée comme énergie utile. Cependant, comme dans tous les systèmes thermiques, les pertes de chaleur à l'environnement par différents modes de transfert de chaleur sont inévitables. Le réseau thermique d'un capteur plan à simple vitrage en termes de conduction, convection et rayonnement est montré par la Figure II.9 (a), et en termes de résistances entre la plaque et l'environnement par la Figure II.9 (b). D'une façon plus simple, les diverses pertes de chaleur d'un capteur peuvent être combinées en une seule résistance, R_t , comme montré sur la Figure II.9(c) et les pertes d'énergie par le capteur peuvent être écrites comme suit

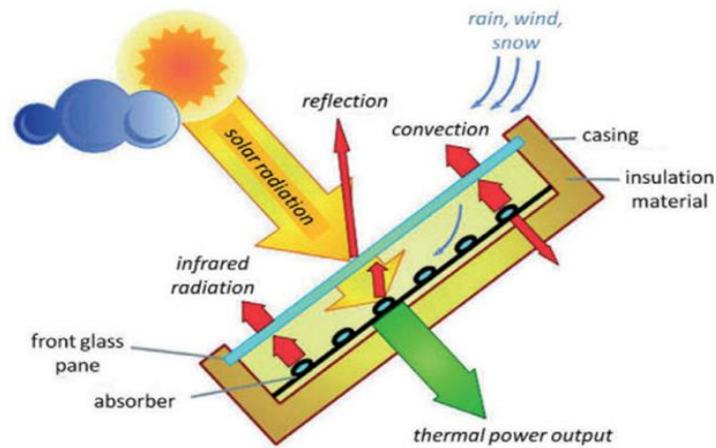


Figure II-8 : Différents types de pertes thermique dans un capteur solaire plan.

$$q_t = \frac{T_{abs} - T_{amb}}{R_t} = U_t(T_{abs} - T_{amb}) \quad (II.31)$$

Où :

- T_{abs} : la température de l'absorbeur
- T_{amb} : la température ambiante
- R_t : la résistance du transfert thermique du capteur vers l'environnement.
- U_t : est le coefficient global des pertes thermiques

Le coefficient des pertes thermiques globales est donné par l'expression suivante

$$U_t = U_{av} + U_{ar} + U_{lat} \quad (II.32)$$

Où :

- U_{av} : est le coefficient des pertes thermiques vers l'avant du capteur.
- U_{ar} : est le coefficient des pertes thermique vers l'arrière du capteur.
- U_{lat} : est le coefficient des pertes thermique aux parois latérales.

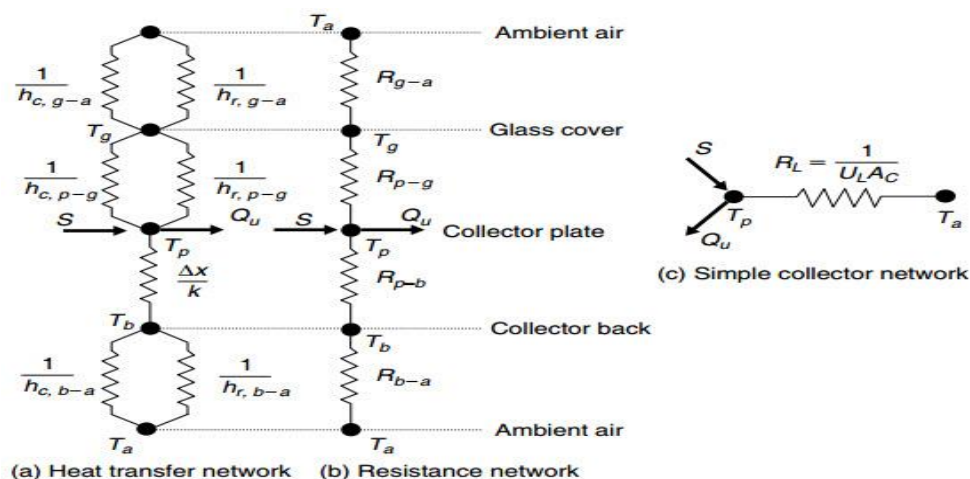


Figure II-9 : réseaux thermiques d'un capteur à simple vitrage en termes de (a) conduction, convection et rayonnement ; (b) résistance entre la plaque et l'environnement ; et (c) le réseau d'un capteur simple vitrage.

II.3.3.1 Pertes thermiques vers l'avant du capteur

Les pertes thermiques les plus importantes dans un capteur solaire plan sont les pertes vers l'avant. Les composantes essentielles de ces pertes sont :

- Les pertes convectives (naturelles) et radiatives entre l'absorbeur et la vitre.
- Les pertes convectives (forcées) et radiatives entre la vitre et l'environnement.

II.3.3.1.1 Pertes thermiques entre l'absorbeur et la vitre

Dans la lame d'air située entre l'absorbeur et la vitre, les pertes thermiques sont issues de transferts radiatif et convectif (convection naturelle). Ces pertes sont représentées par l'expression suivante :

$$q_{p,abs-vit} = (h_{rad,abs-vit} + h_{conv,abs-vit})(T_{abs} - T_{vit}) \quad (II.33)$$

II.3.3.1.1.1 Pertes radiatives

Les pertes radiatives entre l'absorbeur et la vitre sont données par :

$$q_{rad,abs-vit} = h_{rad,abs-vit}(T_{abs} - T_{vit}) \quad (II.34)$$

Pour deux plaques parallèles le coefficient d'échange radiatif $h_{rad,abs-vit}$ est donné par la relation suivante :

$$h_{rad,abs-vit} = \frac{\sigma(T_{abs} + T_{vit})(T_{abs}^2 + T_{vit}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1}{\varepsilon_{vit}} - 1} \quad (II.35)$$

II.3.3.1.1.2 Pertes convectives

La densité du flux convectif entre l'absorbeur et la vitre est donnée par l'expression suivante:

$$q_{conv,abs-vit} = h_{conv,abs-vit}(T_{abs} - T_{vit}) \quad (II.36)$$

Pour estimer les pertes convectives entre l'absorbeur et la vitre, il est nécessaire de déterminer le coefficient d'échange convectif dans la lame d'air du capteur. Si les effets de l'inclinaison du collecteur doivent être inclus, il est conseillé d'utiliser la corrélation de (Hollands), cette dernière est donnée comme suit :

$$Nu = \frac{h_{conv,abs-vit}}{\lambda} = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right]^* \left[1 - \frac{1708(\sin 1,8\theta)^{1,6}}{Ra \cos \theta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos \theta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^* \quad (II.37)$$

Cette relation est valable pour :

$$\left[\begin{array}{l} 0 < Ra \leq 10^5 \\ 0 \leq \theta \leq 75 \end{array} \right] \quad (II.38)$$

Où le signe (*) signifie que le terme entre parenthèses est pris égal à zéro quand il est négatif.

Dans laquelle la résistance thermique entre l'absorbeur et la vitre est exprimée par :

$$R_{abs-vit} = \frac{1}{h_{conv,abs-vit} + h_{rad,abs-vit}} \quad (II.39)$$

II.3.3.1.2 Pertes thermiques entre la vitre et l'environnement

Les pertes thermiques entre la vitre et l'environnement est la somme des pertes radiatives et convectives (convection forcée). La densité du flux de chaleur perdu à l'environnement à travers la vitre est donnée par l'expression suivante :

$$q_{p,vit-amb} = (h_{rad,vit-amb} + h_v)(T_{vit} - T_c) \quad (II.40)$$

Où :

h_v : est le coefficient de la convection du vent.

T_c : est la température du ciel.

II.3.3.1.2.1 Pertes radiatives

Pour prédire les performances des capteurs solaires, il est nécessaire d'évaluer l'échange radiatif entre la surface de la vitre et le ciel. Le ciel peut être considéré comme un corps noir pour certaines températures équivalentes du ciel, T_c de sorte que le transfert radiatif entre une plaque et le ciel soit donné par l'équation suivante [29] :

$$q_{rad,vit-amb} = h_{rad,vit-amb}(T_{vit} - T_{amb}) \quad (II.41)$$

Pour une petite surface, (vitrage), entourée par une très grande surface (environnement) le coefficient d'échange radiatif est donné par l'expression suivante :

$$h_{rad,vit-amb} = \frac{\sigma \varepsilon_{vit} (T_{vit} + T_c)(T_{vit}^2 + T_c^2)(T_{vit} - T_c)}{T_{vit} - T_{amb}} \quad (II.42)$$

La température du ciel est généralement calculée à partir de la relation empirique suivante dans laquelle la température est exprimée par Kelvin

$$T_c = T_a - 6 \quad (II.43)$$

II.3.3.1.2.2 Pertes convectives

Les capteurs solaires plans sont toujours exposés au vent et par conséquent les pertes convectives par le vitrage au milieu ambiant sont importantes dans l'étude des capteurs solaires plans. Ce type de pertes est exprimé par l'équation suivante :

$$q_{conv,vit-amb} = h_v(T_{vit} - T_{amb}) \quad (II.44)$$

La corrélation qui a été largement utilisée dans les capteurs solaires plans est celle suggérée par Sparrow. Sa forme est :

$$h_v = j \rho C_p V P_r^{-2/3} \quad (II.45)$$

Avec :

$$j = 0.86(R_e^*)^{-1/2} \quad (II.46)$$

Où :

R_e^* Nombre de Reynolds VL^*/ν

L^* Longueur caractéristique $4 A_c/P_c$

A_c Section du capteur

P_c Périmètre du capteur

A partir des équations (II.33), (II.34) et (II.36) les pertes thermiques entre la vitre et l'environnement sont données comme suit :

$$q_{p,vit-amb} = \frac{T_{vit} - T_{amb}}{R_{vit-amb}} \quad (II.47)$$

Où

$$R_{vit-amb} = \frac{1}{h_{rad,vit-amb} + h_V} \quad (II.48)$$

A partir de (II.39) et (II.48) le coefficient global des pertes avant U_{av} sera alors donné par :

$$U_{av} = \frac{1}{R_{av}} = \frac{1}{R_{abs-vit} + R_{vit-amb}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{conv,abs-vit} + h_{rad,abs-vit}} + \frac{1}{h_{rad,vit-amb} + h_V}} \quad (II.49)$$

II.4 Analyse bibliographique

Le faible rendement des capteurs plans conventionnels à des températures élevées (environ 100°C) est principalement dû aux pertes de chaleur élevées à travers le couvercle du capteur. Ces pertes thermiques peuvent être réduites en interposant un isolant transparent sous forme d'une structure en nid d'abeille à paroi mince entre la plaque absorbante et le couvercle. La structure en nid d'abeille est réalisée à partir de verre ou de matériaux plastiques comme le polyméthacrylate de méthyle, le polycarbonate ou le polyéthylène. Les deux principaux types de structures sont les réseaux de tubes capillaires et les cellules à section carrée (ou rectangulaire). Généralement, le diamètre hydraulique des ouvertures est de 3 ou 4 mm, l'épaisseur des parois est d'environ 100 µm pour le verre et 20 µm pour le plastique, et l'épaisseur de la structure est d'environ 10 cm. Un espace de 1 ou 2 cm sépare le nid d'abeille de la plaque absorbante. La présence du nid d'abeilles supprime efficacement à la fois les pertes par convection entre l'absorbante et l'environnement.

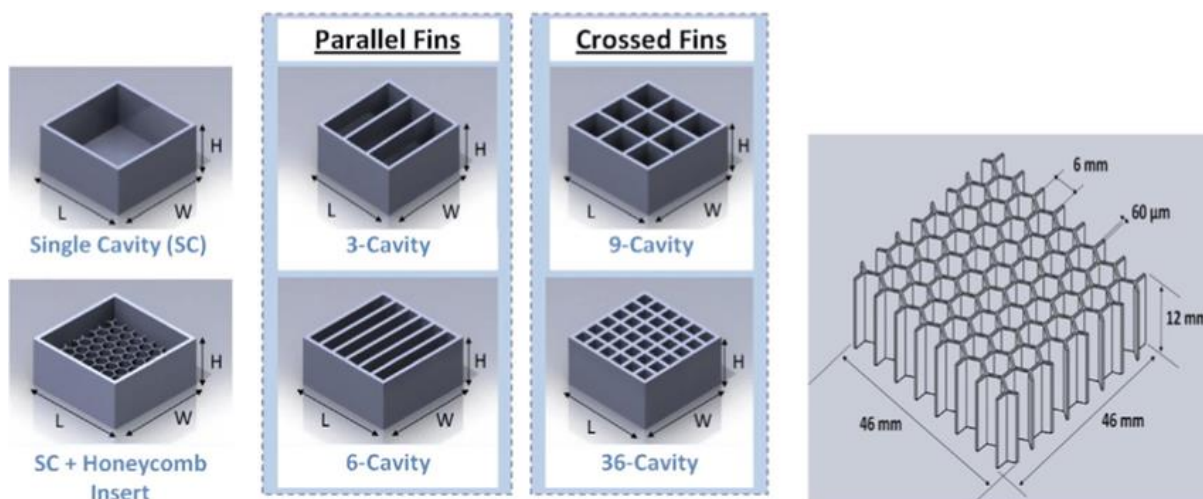


Figure II-10 : Différentes forme de nid d'abeilles.

Plusieurs chercheurs ont étudié l'efficacité des capteurs solaires plans, constatant que le faible rendement est principalement dû aux pertes de chaleur importantes à travers le couvercle du capteur. Pour réduire ces pertes, une solution consiste à insérer un isolant transparent en forme de structure en nid d'abeille entre la plaque absorbante et le couvercle. Cette structure, qui peut être fabriquée en verre ou en plastiques comme le polyméthacrylate de méthyle, le polycarbonate ou le polyéthylène, diminue les pertes par convection. Les réseaux de tubes capillaires et les cellules carrées ou rectangulaires sont les deux principaux types de structures en nid d'abeille utilisés, avec des ouvertures de 3 à 4 mm de diamètre hydraulique et des parois d'environ 100 μm pour le verre et 20 μm pour le plastique. La structure fait environ 10 cm d'épaisseur et est séparée de la plaque absorbante par un entrefer de 1 à 2 cm.

Des études menées par Esen, Y. (2004) et Esen, M. et al. (2017) ont montré que l'ajout de barrières convectives dans les collecteurs solaires plats réduit les pertes de chaleur sans affecter l'efficacité d'absorption du rayonnement solaire. Ces barrières peuvent diminuer le coefficient de perte de chaleur global jusqu'à 5,25%, améliorant ainsi les performances des systèmes solaires dans des environnements froids ou confinés.

Adel Laaraba et Abderrahmane Khechekhouche (2018) ont exploré l'effet du nombre et de la longueur des cloisons sur le transfert de chaleur dans un collecteur solaire plat vertical. Leurs résultats indiquent que l'ajout de cloisons peut réduire les pertes de chaleur par convection jusqu'à 60%. Ils recommandent d'utiliser plus de 10 cloisons avec une longueur optimale de

0,4, ce qui réduit le transfert de chaleur par convection et améliore l'efficacité thermique des collecteurs.

Mozumder et Singh (2014) ont examiné un collecteur solaire cylindrique en nid d'abeilles fabriqué en polymère transparent. Ils ont trouvé que l'écart optimal entre le nid d'abeilles et la plaque d'absorption est de 3,3 mm, ce qui réduit le coefficient de transfert de chaleur à 3,06 W/m²/K. Des essais sur le terrain à Delhi ont révélé que ce collecteur était plus efficace avec un angle d'incidence du soleil inférieur à 20 degrés, augmentant la température de 9 à 12°C entre midi et 14 heures. L'efficacité globale du collecteur était d'environ 33%, soit 18% de plus que celle du collecteur de référence, suggérant une amélioration notable pour des applications telles que les cuiseurs solaires.

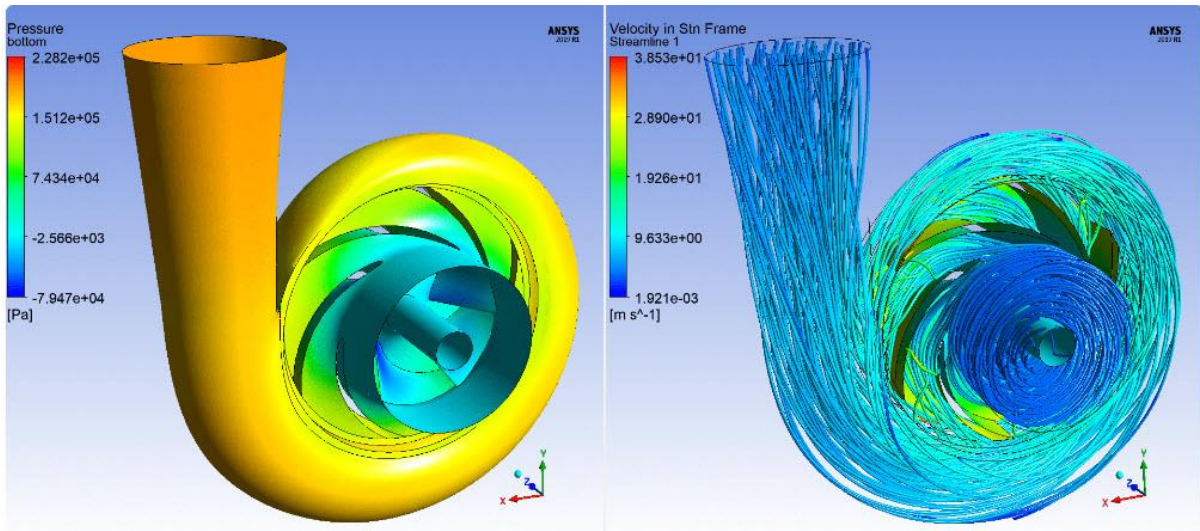
Enfin, Marwa Ammar, Ameni Mokni et leurs collègues (2021) ont proposé un nouveau design de collecteur solaire à plaque plate avec des lattes parallèles en matériau isolant transparent (TIM-PS). Grâce à une modélisation numérique, ils ont étudié diverses configurations de ces lattes. Les résultats montrent que l'inclusion de TIM-PS réduit les pertes thermiques, augmentant ainsi l'efficacité thermique. Une configuration inclinée à 45° avec six lattes TIM-PS à un angle de -45° a atteint une efficacité thermique de 81%, la plus élevée parmi celles testées. Ces collecteurs sont également légers et peu coûteux, les rendant adaptables à des applications industrielles et domestiques.

En résumé, l'insertion de structures en nid d'abeille ou de cloisons dans les capteurs solaires peut considérablement améliorer leur efficacité thermique en réduisant les pertes de chaleur. Ces innovations rendent les systèmes solaires plus performants et adaptables à diverses applications.

Conclusion

Ce chapitre a exploré les diverses technologies de capteurs solaires, avec un accent sur les capteurs solaires plans et leur bilan thermique. Nous avons mis en évidence l'importance de la stratégie des nids d'abeilles pour réduire les pertes convectives entre l'absorbeur et la vitre. Cette approche innovante, en recréant une structure hexagonale similaire aux nids d'abeilles, s'avère efficace pour améliorer l'efficacité thermique en limitant les mouvements convectifs de l'air. En somme, l'application de cette stratégie promet d'optimiser les performances des capteurs solaires plans, ouvrant la voie à des systèmes plus efficaces et plus durables.

III. APPROCHE NUMERIQUE



Introduction

La dynamique des fluides numérique (CFD) est devenue un outil crucial pour la recherche et l'industrie, permettant l'étude des écoulements de fluides par le biais de la résolution numérique des équations qui les régissent. Ce chapitre commence par une présentation des équations fondamentales, avec des explications détaillées pour chacune d'entre elles, et se termine par une brève introduction à la CFD et son utilisation comme outil de conception dans diverses applications d'ingénierie. En outre, il couvre les éléments clés d'un code CFD, y compris les algorithmes et les méthodes numériques les plus fréquemment employés.

III.1 Les équations gouvernantes :

Les équations de base de la dynamique des fluides s'appuient sur les lois universelles de conservation et de bilan

- Conservation de la masse
- Bilan de la quantité de mouvement
- Conservation de l'énergie

L'équation de continuité est le résultat de l'application de la loi de la conservation de la masse à un écoulement de fluide. L'équation du bilan de la quantité de mouvement n'est rien que la deuxième loi de Newton. L'application de cette loi à un écoulement de fluide donne une équation vectorielle appelée équation du mouvement. La loi de la conservation de l'énergie est identique à la première loi de la thermodynamique et l'équation de la quantité de mouvement qui en résulte est connue sous le nom de l'équation de l'énergie [30].

Ces équations s'écrivent comme suit :

III.1.1 L'équation de continuité

L'application de la loi de conservation de la masse à un fluide qui traverse un volume de contrôle fixé et infinitésimal donne l'équation de continuité qui s'écrit comme suit : [30]

$$\frac{a\rho}{at} + \nabla (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{III.1})$$

III.1.2 L'équation de la quantité de mouvement

L'application de la seconde loi de Newton à un fluide qui traverse un volume de contrôle fixé et infinitésimal donne l'équation de la quantité de mouvement suivante [30].:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = - \nabla(\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (\text{III.2})$$

Où

- p : la pression statique
- $\bar{\tau}$: le tenseur des contraintes de viscosité du fluide
- $\rho \vec{g}$ et \vec{F} : sont respectivement la force de gravité et autres forces volumiques externes.

III.1.3 L'équation de l'énergie

L'application de la première loi de la thermodynamique sur un fluide qui traverse un volume de contrôle fixé et infinitésimal donne l'équation de l'énergie interne sous la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \vec{v})) + s_h \quad (\text{III.3})$$

Où :

- λ_{eff} est la conductivité effective et \vec{J}_j est la diffusion du flux des espèces j .
- $\partial(\rho E) \partial t$ est le terme temporel
- $\nabla(\vec{v}(\rho E + p))$ est la variation de l'énergie par convection
- $\lambda_{eff} \nabla T$ est la variation de l'énergie par conduction
- $\sum_j h_j \vec{J}_j$ est la diffusion des espèces
- $(\bar{\tau}_{eff} \vec{v})$ est la dissipation visqueuse

- S_h est la source d'enthalpie

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (\text{III.4})$$

Où h est l'enthalpie.

III.2 CFD

CFD est l'abréviation de Computational Fluid Dynamics qui est la mécanique des fluides numérique. C'est l'analyse du système comprenant l'écoulement des fluides, le transfert de chaleur et les phénomènes liés tel que les réactions chimiques. Ces analyses sont effectuées avec des simulations numériques basées sur l'outil informatique. La technique est puissante et couvre une large gamme de domaines et d'applications industrielles ou non industrielles comme l'aérodynamique des avions et des véhicules, les turbomachines, l'ingénierie électrique et électronique...etc. A partir des années 60, l'industrie aérospatiale a intégré la technique du CFD dans la conception, la recherche, et la fabrication d'avions et des moteurs à propulsion. Récemment, la CFD est appliquée à divers problèmes d'ingénierie tel que : la conception des moteurs à combustion interne, chambres de combustion des turbines à gaz, capteurs solaires...etc. La CFD devient de plus en plus un élément essentiel dans la conception des produits et des procédés industriels. On estime le coût minimum du matériel utilisé pour la CFD entre 5.000 £ et 10.000 £ (plus le coût de la maintenance annuelle). Les frais de licence permanente pour les logiciels commerciaux varient généralement de 10.000 £ à 50.000 £. Les maisons du logiciel CFD peuvent organiser des licences annuelles renouvelables. Evidemment, les coûts d'investissement d'une capacité CFD ne sont pas minimes, mais le coût total n'est pas aussi élevé qu'une installation expérimentale de haute qualité. Par ailleurs, la CFD a des avantages et des inconvénients en la comparant avec l'approche expérimentale comme représenté dans le tableau suivant [31]:

Tableau III-1 : Avantages et inconvénients de l'approche expérimentale et numérique.

Approche	Avantages	Inconvénients
Expérimentale	<ul style="list-style-type: none"> • Etude réelle des Phénomènes 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériel requis • Problèmes de mise à L'échelle • Difficultés de mesure

CFD		<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé de la Conception
	<ul style="list-style-type: none"> • Permet au concepteur de Simuler différentes Conditions • Les phénomènes physiques Compliqués peuvent être Résolus • Évaluation rapide des Variations de conception 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé des outils Informatiques • Des erreurs peuvent Survenir en raison de Modèles d'écoulements Simples ou de conditions Aux limites simplifiées • Le temps de calcul peut S'étendre pour les Phénomènes compliqués

Le but ultime des développements dans le domaine de la CFD est de fournir une capacité comparable avec d'autres CAO (Conception Assistée par Ordinateur) [32]. La principale raison pourquoi la CFD est retardée est la complexité des équations qui nécessitent d'être résolues ; à leur tête, l'équation de Navier-stokes qui modélise incroyablement avec précision tout un ensemble de phénomènes tels que : l'écoulement incompressible, compressible, turbulent ou laminaire.

III.2.1 Comment fonctionne un code CFD

Les codes CFD se composent d'algorithmes numériques qui peuvent résoudre les problèmes d'écoulements des fluides. Pour fournir un accès facile à leurs pouvoirs de résolution tous les logiciels CFD commerciaux incluent des interfaces utilisateur sophistiquées pour entrer les paramètres du problème et pour examiner les résultats. Par conséquent, tous les codes contiennent trois principaux éléments : (i) un préprocesseur, (ii) un solveur et (iii) un post-processeur. Voici les étapes les plus importantes de la simulation numérique :

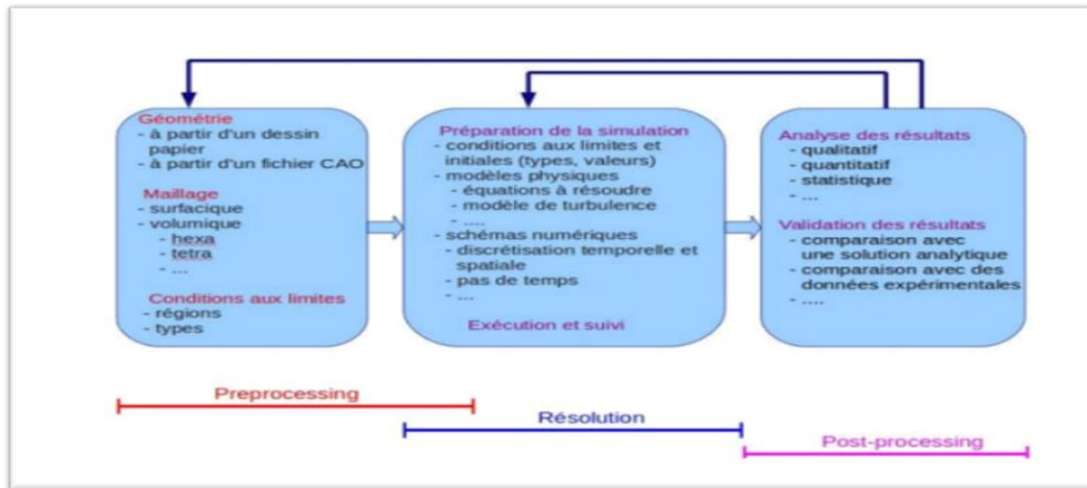


Figure III-1 Etapes de la simulation numérique

III.2.1.1 Préprocesseur

Le préprocesseur consiste en l'entrée d'un problème dans un programme CFD au moyen d'une interface conviviale et la transformation ultérieure de cette entrée en une forme adaptée à l'utilisation par le solveur. Les activités au stage préprocesseur contiennent :

- La définition de la géométrie : le domaine de calcul.
- La subdivision du domaine en un certain nombre de sous-domaines plus petits : une grille (ou un maillage) de cellules.
- Définition des conditions aux limites appropriées au niveau des cellules dans les limites du domaine.



Figure III-2 Méthodologie générale de la génération de maillage

La solution à un problème du mouvement du fluide (vitesse, pression, température etc.) est définie aux nœuds à l'intérieur de chaque cellule. La précision d'une solution CFD est régie par le nombre de cellules de la grille. En général, pour une solution précise avec un maillage de nombre de cellules raisonnable, il est nécessaire de créer un maillage non uniforme qui soit

plus fin dans les zones de fort gradient des variables (P, V, T ...etc.) et plus grossier dans les régions où la variation des variables est faible ou constante [31].

Plusieurs logiciels sont utilisés pour la génération des maillages tels que PATRAN, IDEAS, POINTWISE et le logiciel Gambit que nous avons utilisé dans notre étude. Gambit est un meilleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD.

Gambit regroupe trois fonctions : définition de la géométrie du problème (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie CAO), le maillage et sa vérification, la définition des frontières (type de conditions aux limites) et définition du domaine de calcul

III.2.1.1.1 Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul

Le maillage est composé d'une grille structurée ou non-structurée, ou la combinaison des deux types de grilles (Maillage hybride).

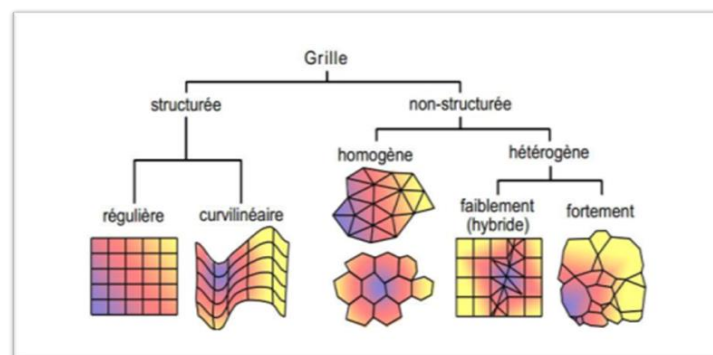


Figure III-3 Différent type de maillage

III.2.1.1.1.1 Maillage structuré

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie multi-bloc, il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent.

- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage. Ses inconvénients :

- Difficile de le générer dans le cas d'une géométrie complexe
- En effet, il est difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes

III.2.1.1.1.2 Maillage non structuré

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

Ses avantages :

- Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si on le compare avec le maillage structuré

III.2.1.1.1.3 Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Il combine les avantages des maillages structuré et non structuré [31].

III.2.1.1.2 Technique générale de génération du maillage

En pratique, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne qualité des éléments,
- Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient,

- Assurer un bon lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier,
- Minimiser le nombre total des éléments (temps de calcul raisonnable).

III.2.1.1.2.1 Coefficient de distorsion

Le facteur de distorsion est nul pour des éléments « parfaits » (carrés, triangles équilatéraux). Notons que les grandes valeurs du facteur de distorsion induisent des erreurs de calcul et ralentissent considérablement le processus de convergence. Quelques distorsions peuvent être tolérées si elles sont situées dans des régions à faible gradient. Le tableau III.2 illustre la variation de la qualité des éléments de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion F_d [3] :

Tableau III-2 : Coefficient de distorsion.

F_d	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
Qualité	Excellente	Bonne	Acceptable	Pauvre	Très Pauvre	Mauvaise

Le facteur de distorsion F_d (skewness) peut être défini de deux façons différentes. Pour des éléments triangulaires ou tétraédriques, le calcul est basé sur le volume équilatéral [31] .

$$F_d = \frac{\text{Taille element optimale} - \text{Taille element généré}}{\text{Taille element optimal}} \tag{III.5}$$

L'autre formulation, applicable pour tout élément, est basée sur la déviation angulaire, avec θ l'angle de l'élément :

$$F_d = \max \{ \theta_{max} - 90, 90 - \theta_{min} \} \tag{III.6}$$

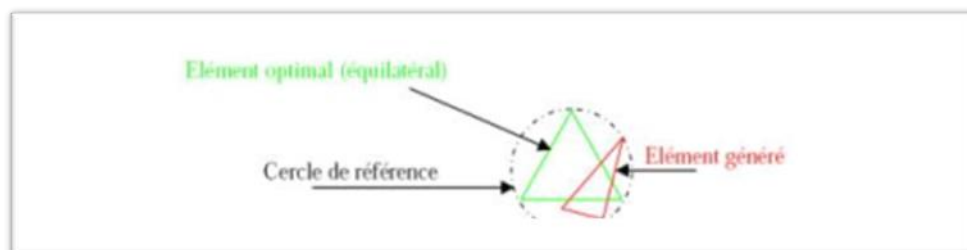


Figure III-4 Définition de skewness sur un volume triangulaire.

III.2.1.1.2.2 Raffinement

La notion de raffinement ou résolution concerne plus particulièrement les zones qui présentent un fort gradient, ainsi un bon raffinement d'un maillage localement plus fin permet de mieux décrire les phénomènes physiques qui existent dans ces zones telles que les ondes de choc, ou les phénomènes liés à la couche limite. La plupart des maillages proposent des méthodes de maillage particulières pour réaliser en proche paroi des maillages structurés dont on maîtrise la taille [3].

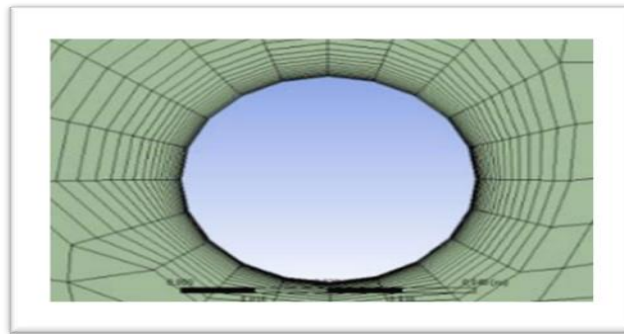


Figure III-5 Exemple de maillage en proche paroi de type maillage de couche limite.

III.2.1.1.2.3 Lissage

Le changement dans la taille des éléments du maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit idéalement pas dépasser 20% à 30%.



Figure III-6 évolution de la taille des éléments.

III.2.1.1.3 Convergence de maillage

Dans une modélisation CFD, la solution doit être indépendante de la densité du maillage pour être sûr du réalisme de la solution que donne le solveur après convergence. De manière systématique, pour tout calcul par CFD on se doit de réaliser et de présenter un test de convergence en maillage, en reportant l'évolution d'une grandeur, tant qu'à faire que l'on souhaite mesurer par la simulation en cours (le coefficient de frottement à une paroi, la différence de charge hydraulique aux bornes d'une pompe, un coefficient de transfert thermique) en fonction de la taille du maillage que l'on raffine successivement.

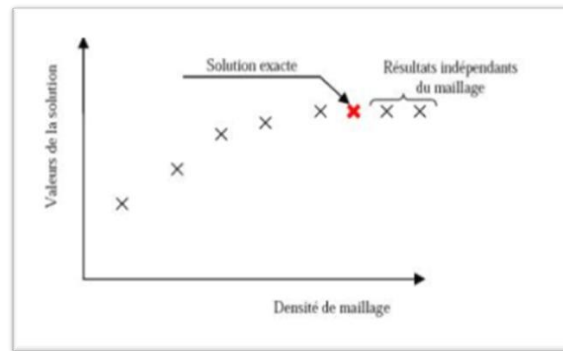


Figure III-7 Test de convergence en maillage.

III.2.1.2 Solveur

III.2.1.2.1 Les méthodes numériques utilisées

En mécanique des fluides, la résolution numérique des équations de conservation s'effectue par différentes méthodes numériques. Les principales méthodes de résolution numérique utilisées en CFD sont : la méthode de différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis.

Une discrétisation par la méthode des différences finies est basée sur la forme différentielle de l'EDP (Équations aux Dérivées Partielles) à résoudre. Chaque dérivée est remplacée par une formule de différence approximative (qui peut généralement être dérivée d'une extension de la série Taylor). Le domaine de calcul est divisé en cellules hexaédriques (la grille) et la solution sera obtenue à chaque point nodal. Cette méthode est plus facile à comprendre lorsque la grille physique est cartésienne. La discrétisation se traduit par un système d'équations de la variable aux points nodaux, et une fois la solution trouvée, une solution discrète est obtenue. Par contre, pour la méthode des éléments finis, le domaine sur lequel l'équation différentielle partielle s'applique est divisé en un nombre fini de sous-domaines appelés éléments. Sur chaque élément une simple variation des variables dépendantes est supposée et cette description par morceaux est utilisée pour construire une image de la façon dont la variable varie sur l'ensemble du domaine. Par ailleurs, c'est une méthode de discrétisation qui convient bien à la simulation numérique de différents types (elliptique, parabolique ou hyperbolique, par exemple) des lois de conservation. Elle a été largement utilisée dans plusieurs domaines de l'ingénierie, tels que la mécanique des fluides, le transfert de chaleur et de masse ou l'ingénierie pétrolière. Au début, la méthode a été

développée comme une formulation spéciale de la méthode des différences finies. L'algorithme numérique de la méthode des volumes finis contient les principales étapes suivantes :

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

- La résolution du système d'équations algébriques par l'utilisation d'une méthode itérative.

La première étape qui est l'intégration sur le volume de contrôle, fait la distinction entre la méthode des volumes finis et toutes les autres techniques numériques. Le résultat de l'intégration exprime la conservation exacte de la grandeur physique, Φ , sur chaque volume de contrôle. Cette relation claire entre l'algorithme numérique et le principe de conservation physique détermine la principale attraction de la méthode des volumes finis et son concept devient plus facile à comprendre que le concept de la méthode des éléments finis. La conservation de la variable générale d'écoulement, Φ , qui peut être par exemple une composante de la vitesse ou de l'enthalpie, sur le volume de contrôle peut être exprimée comme un bilan entre les différents processus qui tendent de l'augmenter ou bien de la baisser, c'est-à-dire [Le taux de changement, dans le temps, de Φ sur le volume de Contrôle]

= [Le flux net de Φ dû à la convection dans le volume de Contrôle]

+ [Le flux net de Φ dû à la diffusion dans le volume de Contrôle]

+ [Le taux net de création de Φ dans le volume de Contrôle]

La méthode des volumes finis est la plus utilisée dans les logiciels CFD les plus connus tels que Open FOAM, StarCCM+, ANSYS Fluent ...etc. Ce dernier est le logiciel que nous avons utilisé [31].

III.2.1.2.2 ANSYS Fluent

ANSYS fluent est très utilisé dans l'industrie et la recherche à travers le monde. Il est généralement considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation des fluides.

Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. ANSYS fluent dispose d'un nombre relativement important de modèles, pour simuler les différents phénomènes de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, solidification), turbulence (LES KE, KW, SA, Reynolds stress...) combustion (pré-mélangée et non pré-mélangée) et l'écoulement en milieux poreux

ANSYS fluent fournit deux approches numériques pour son utilisation :

- solveur basé sur la pression (presseur-based solver)
- solveur basé sur la densité (density-based solver)

Le solveur basé sur la pression est développé pour les écoulements incompressibles à faible vitesse. Par contre, le deuxième solveur est utilisé pour les écoulements compressibles à grande vitesse

Résolutions ou simulation :

Cette section s'intéresse en générale à expliquer les étapes nécessaires pour réussir une simulation numérique d'un problème en mécanique des fluides. Selon le code commerciale ANSYS Fluent.

Les principales étapes d'une simulation sont dans l'ordre suivant

- Le paramétrage du solveur
- La modélisation (éventuelle) de la turbulence :
- La définition des caractéristiques du fluide
- le réglage des "Operating conditions"
- Le paramétrage des conditions aux limites
- Le choix des critères De convergence
- L'initialisation des calculs
- Le paramétrage d. sauvegardes automatiques en cours de simulation
- Le lancement de la simulation.

III.2.2 Choix des équations résolues par le solveur

Selon le problème, on peut être amené à considérer :

- La dimension du problème, 2D, 3D, ou axisymétrique
- Le caractère stationnaire ou instationnaire
- Le besoin ou non de prendre en compte le bilan d'énergie, et dans ce cas, on pourra alors avoir accès à des équations d'état, à des modèles de type Boussinesq pour la convection naturelle...etc.
- La prise en compte de forces extérieures (gravité).

III.2.2.1 Conditions aux limites

On dispose d'un certain nombre de conditions, parmi lesquelles on distinguera des conditions d'entrée, de sortie ; aux frontières solides, de périodicité ou de symétrie. Il faut garder à l'esprit que par défaut, les conditions imposées de type entrée / sortie correspondent à des profils uniformes sur la frontière, ce qui ne représente pas toujours la réalité physique.

Dans la suite on trouve quelques conditions aux limites à l'entrée et sortie pour le logiciel Fluent :

➤ A l'entrée :

- Velocity Inlet : Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles ; la vitesse d'entrée est imposée.
- Pressure Inlet Utilisée pour les écoulements compressibles et incompressibles. On fixe alors la pression totale en entrée.
- Mass Flow Inlet On impose un débit massique connu à l'entrée

➤ A la sortie :

- Pressure Outlet : Spécifie la pression statique de sortie.
- Outflow : Cette condition est utilisée pour modéliser les sorties de fluide dont on ne connaît pas les propriétés et les détails de la vitesse et de la pression à la sortie.

III.2.2.2 Choix des critères de convergence

Un solveur itératif cherche à équilibrer les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Partant d'une solution initiale, le solveur la fait évoluer vers une solution finale qui respecte au mieux ces diverses équations. On définit les résidus comme une mesure de l'écart à une solution parfaite

Remarque importante : les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables pression, vitesse. Température du problème entre la présente itération et l'itération précédente. Le critère de convergence par défaut dans Fluent (résidus tous sous 10^{-3}) est sous-évalué. Il vaut mieux pousser les calculs à 10^{-4} voire le 10^{-6} Il n'y a pas de règle universelle.

Dans la CFD les résidus est un critère de convergence très important mais il ne suffit pas pour assurer que le problème est convergé. Alors il faut choisir au moins deux autres critères de convergence par exemple :

- **Conservation de la masse :** Un critère révélateur de la convergence est de vérifier la conservation de masse. Il faut que la différence entre les débits entrants et sortants soit nulle (infiniment petite).

- **Evolution d'une Intégrale :** L'affichage de l'évolution de l'intégrale (surfaique ou volumique) d'une variable pendant les calculs est un autre moyen de vérifier que la solution est bien stable. Sur l'exemple ci-dessous. Issu d'une simulation d'un problème de convection forcée sur un réseau de cylindres chauffants (Fig. 8). On peut voir que la température moyenne en sortie converge beaucoup plus rapidement que le nombre de Nusselt sur les éléments chauffants

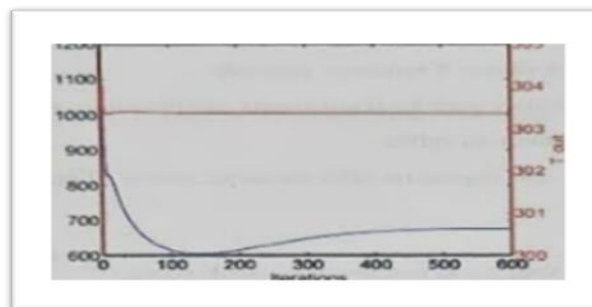


Figure III-8 évolution du nombre de Nusselt moyenne sur le cœur (courbe du bas, échelle de gauche) et de la température moyenne en sortie (courbe du haut, échelle de droite).

III.2.3 Post processeur

Le postprocesseur permet de visualiser et interpréter les résultats avec une :

- Visualisation de la géométrie et du maillage
- Visualisation des vecteurs de grandeurs calculées
- Visualisation des isolignes de différentes grandeurs
- Visualisation des surfaces 2D et 3D
- Possibilité d'exporter les différentes grandeurs sous forme de fichiers
- Facilité d'animation.

Les logiciels CFD fournissent souvent des outils intégrés de post-traitement. Toutefois, rien n'interdit d'exporter les données dans divers formats afin de les traiter sous d'autres logiciels pour une analyse plus poussée comme le logiciel Tecplot ou Origin

III.3 Méthode numérique

L'objectif des méthodes numériques est de proposer une approche de résolution reflétant le comportement réel des phénomènes physiques. Parmi les techniques les plus couramment utilisées pour résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles, on peut citer :

- la méthode des différences finies (MDF).
- la méthode des éléments finis (MEF).
- la méthode des volumes finis (MVF).

□ La méthode des différences finies présente une technique pour résoudre les équations aux dérivées partielles, en approximant les dérivées par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherchée dans chacun des nœuds du domaine par une expansion en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en une équation algébrique pour chaque nœud. D'autre part, la méthode des différences finies (FDM) est simple et efficace sur des grilles structurées et ne conserve pas la quantité de mouvement, l'énergie et la masse sur des grilles grossières.

□ La méthode des éléments finis consiste à transformer les équations différentielles en formes intégrales, basées sur le principe de minimisation d'une quantité comme l'énergie, afin d'obtenir une solution précise. En d'autres termes, elle permet de représenter mathématiquement un modèle global dans un domaine d'étude donné. Son principe fondamental réside dans la subdivision du domaine en régions élémentaires, appelées éléments finis, où les formes intégrales sont établies et minimisées. Ensuite, les calculs sont organisés sous forme matricielle, suivis de la résolution du système algébrique correspondant. Cette méthode est particulièrement utile pour résoudre les équations aux dérivées partielles dans des géométries complexes. Bien que largement utilisée dans l'analyse structurelle des solides, elle peut également s'appliquer aux fluides, offrant une grande précision sur des grilles grossières. Toutefois, elle peut être lente à exécuter pour des problèmes de grande envergure et n'est pas idéale pour les écoulements turbulents.

□ En ce qui concerne la méthode du volume fini, elle est largement utilisée et convient bien à la résolution des lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie). De plus, c'est une approche courante utilisée dans les codes de CFD. Un de ses avantages est que les équations sont calculées de manière itérative en imposant des conditions initiales et des conditions limites du domaine. Le solveur cherche alors une solution des champs de pression, de vitesse, de température, Cette méthode sera discutée dans le titre suivant [32] :

III.3.1 Principe de la méthode de volume finis

Les formulations conservatrices des équations aux dérivées partielles sont précieuses car elles peuvent être reformulées de manière intégrale en utilisant le théorème de la divergence. Le principe de conservation constitue le fondement de la méthode des volumes finis, énonçant que toute variation d'une propriété est liée au flux net traversant la frontière S qui encercle le volume Ω . La méthode des volumes de contrôle représente ainsi une approche de discrétisation essentielle pour résoudre les équations formulées de manière conservatrice. Ce principe, initialement élaboré pour les écoulements compressibles par Godunov et Glimm(citation), puis largement diffusé dans la communauté scientifique des mécaniciens par Patankar et Spalding(citation) dans les années 70, a été abondamment discuté par Patankar(citation) en 1980. Fondamentalement, la méthode des volumes finis implique l'intégration de l'équation à résoudre sur chaque volume de contrôle.

Pour illustrer, comme le montre la figure (III-9), le domaine est discrétisé à l'aide d'une grille dimensionnelle (qu'elle soit uniforme ou non) dans les deux directions, orientée de manière positive vers la droite (Est) et vers le haut (Nord), respectivement. Lors de l'écriture du schéma de discrétisation en un point P, une nomenclature adaptée au principe de la méthode des volumes finis est choisie pour organiser le stockage des variables dans notre maillage, dans le but de faciliter les étapes ultérieures de la discrétisation. Ainsi, l'élément P, comme défini dans la figure III-10, utilise des indices majuscules (E, W, N, S) pour représenter les variables associées aux centroïdes voisins de P, tandis que des indices minuscules (e, w, n, s) sont utilisés pour désigner les faces correspondantes [33].

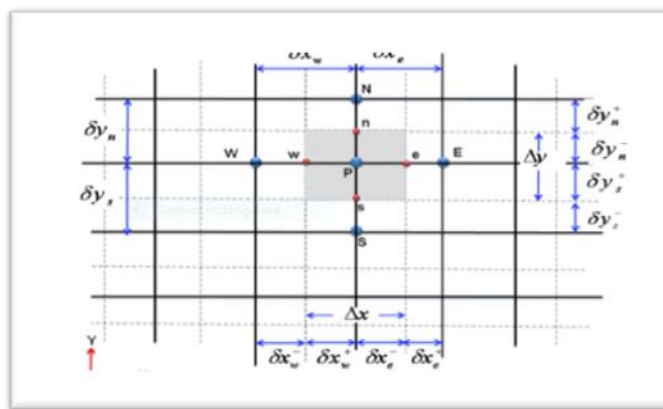


Figure III-11 : Volume de contrôle dans le cas 2D.

Conclusion

Ce chapitre a abordé les équations gouvernantes essentielles pour la modélisation de phénomènes physiques complexes et a introduit l'outil de dynamique des fluides numérique (CFD). L'application de ces équations, combinée avec les méthodes numériques de la CFD, permet de simuler efficacement des problèmes variés, offrant des perspectives robustes pour l'analyse et l'optimisation dans divers domaines de recherche.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS



Introduction

Dans ce chapitre, nous évaluons l'effet de la stratégie des nids d'abeilles sur les performances thermiques d'un capteur solaire plan. En combinant un code de calcul pour estimer les valeurs thermiques de référence avec une analyse des pertes thermiques modifiées par les nids d'abeilles, nous cherchons à déterminer comment cette stratégie influence la réduction des pertes convectives et l'amélioration globale de l'efficacité du capteur. L'objectif est de démontrer l'impact positif des nids d'abeilles sur l'isolation thermique et l'optimisation des performances énergétiques des capteurs solaires plans.

IV.1 Cas d'étude

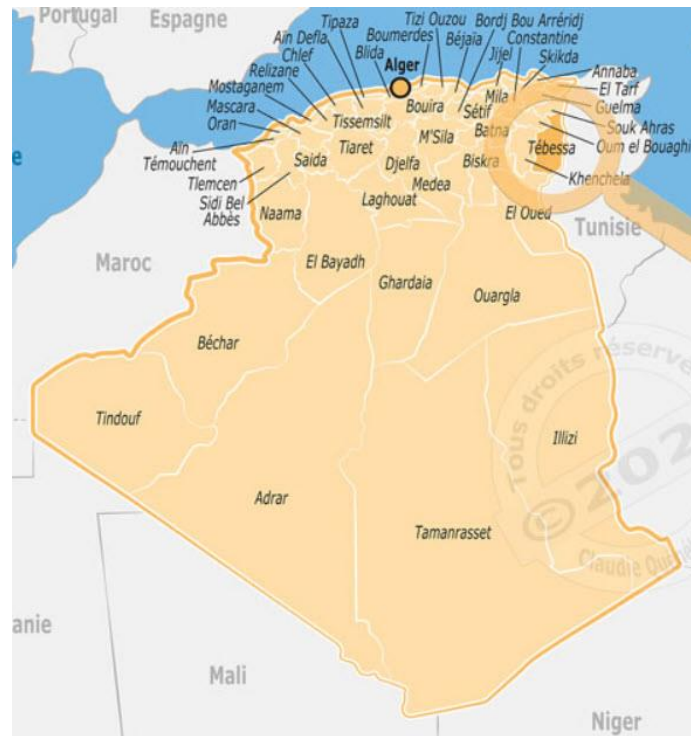


Figure IV-1 : Localisation de la wilaya de Tébessa en Algérie.

Avant de commencer l'analyse des résultats de notre travail, il est nécessaire de préalablement sélectionner le cas d'étude ou le site à partir duquel les données météorologiques ont été exploitées afin de déterminer le rendement instantané du capteur. À cet effet, nous avons opté pour la wilaya de Tébessa pour mener à bien notre travail. La wilaya de Tébessa, localisée dans l'est de l'Algérie, est positionnée à une latitude de $35,4042^\circ$ N et une longitude de $8,1242^\circ$ E. Elle profite d'un ensoleillement abondant, totalisant plus de 3 000 heures d'ensoleillement

annuel, ce qui en fait une zone propice au développement de l'énergie solaire. Le climat semi-aride et la stabilité des conditions météorologiques à Tébessa garantissent une production continue et efficace d'énergie solaire, ce qui ouvre des perspectives importantes pour le développement de projets utilisant des capteurs solaires et d'autres technologies d'énergie renouvelable.

La figure IV-1 illustre la localisation de la wilaya de Tébessa en Algérie.

IV.2 Données météorologiques

Pour la sélection des données météorologiques, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel Meteonorm, tel que mentionné précédemment. Meteonorm est un logiciel professionnel utilisé pour fournir des données météorologiques précises à partir de mesures historiques et de modèles climatiques. Il permet de générer des données sur le rayonnement solaire, la température, et d'autres paramètres météorologiques pour des emplacements spécifiques à travers le monde. Ces données sont essentielles pour la simulation et l'évaluation de la performance des systèmes d'énergie solaire, ainsi que pour d'autres applications en ingénierie, agriculture, et recherche environnementale. Meteonorm est réputé pour son vaste ensemble de données et sa capacité à fournir des informations fiables pour des études de performance énergétique.

Ainsi, nous avons sélectionné les données météorologiques du 30 avril 2023 à partir du logiciel Meteonorm afin de calculer le rendement du capteur. Le tableau suivant expose les différentes données météorologiques en fonction des heures clés de la journée (6 h à 20 h), ce qui est essentiel pour notre étude.

Tableau IV-1 : Diverses données météorologiques de la wilaya de Tébessa pour le 30 avril 2023.

Wilaya de Tébessa ($\varphi = 35,4^\circ\text{N}$, $L = 8,1^\circ\text{E}$), le 30 Avril 2023 ($n = 120$)					
Heurs	$I_d (W/m^2)$	$I_b (W/m^2)$	$T_{amb} (^\circ\text{C})$	$V_{ven} (m/s)$	Albédo
6	1	0	4,2	1,1	0,2
7	46	6	5,3	1,5	0,2
8	100	135	7	1,8	0,2
9	148	310	8,9	2,3	0,2
10	200	485	11	3,2	0,2
11	240	613	12,8	2,9	0,2

12	313	622	14,3	3,2	0,2
13	309	668	15,6	3,5	0,2
14	284	653	16,4	3	0,2
15	269	542	16,8	2,5	0,2
16	211	410	16,8	1,8	0,2
17	155	251	16,3	2,5	0,2
18	97	93	15,2	2	0,2
19	35	0	13,8	2,5	0,2
20	0	0	12,4	2	0,2

IV.3 Caractéristiques géométriques, physiques et optiques du capteur

IV.3.1 Caractéristiques géométriques

Les diverses caractéristiques géométriques du capteur sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV-2 : Caractéristiques géométriques du capteur

Longueur du capteur	1 m
Largeur du collecteur	0,5 m
Longueur de l'absorbeur	1 m
Largeur de l'absorbeur	0,5 m
Espacement entre l'absorbeur et le vitrage	1,8 cm
Épaisseur de l'absorbeur	1,3 mm
Diamètre extérieur du tube	18 mm
Diamètre intérieur du tube	14 mm
Distance entre les tubes	12 mm
Inclinaison du capteur	35°
Angle d'azimut du capteur	0°
Résistance adhésive	Négligeable
Débit du fluide	70 kg/h

IV.3.2 Caractéristiques physiques et optiques

Les caractéristiques physiques de l'air et des parois solides du capteur sont sélectionnées à la température de fonctionnement moyenne du capteur, $T = 313$ K. Les caractéristiques physiques de divers composants du capteur sont fournies dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV-3 : Caractéristiques physiques de divers composants du capteur

Parois solides et fluide	$\rho(kg/m^3)$	$C_p(J/kg.K)$	$\lambda(W/m.K)$	Pr	$\mu(kg/m.s)$
L'air	1,0596	1008	0,02852	0.708	$20,03 \cdot 10^{-6}$
L'absorbeur (aluminium)	2707	905	237	-	-
Les parois latérales (l'aine de verre)	24	700	0,038	-	-
La vitre (verre)	2700	840	0,93	-	-

Les caractéristiques physiques du fluide caloporteur sont sélectionnées pour une température d'entrée de 333 K. Le tableau ci-dessous présente les propriétés physiques de l'eau que nous avons utilisée en tant que fluide caloporteur.

Tableau IV-4 : Caractéristiques physiques du fluide caloporteur, en l'occurrence l'eau.

Propriétés physiques de l'eau				
$\rho(kg/m^3)$	$C_p(J/kg.K)$	$\lambda(W/m.K)$	Pr	$\mu(kg/m.s)$
983.1	4186	0,6507	3	$0,4668 \cdot 10^{-3}$

Pour évaluer le coefficient d'échange convectif entre la paroi interne du tube et le fluide caloporteur, nous utiliserons la formule suivante.

$$h_f = \frac{Nu_f \lambda_f}{D_{in}} \quad (IV.1)$$

Où le nombre de Nusselt est calculé à l'aide de la formule empirique suivante :

$$Nu_f = Nu_{\infty} + \frac{a(Re_f Pr_f (D_{in}/L))^{n_1}}{1 + b(Re_f Pr_f (D_{in}/L))^{n_2}} \quad (IV.2)$$

Pour $1 < Re_f Pr_f \frac{D_{in}}{L} \leq 1000$ avec L la longueur du tube, avec $Re_f = 40,8897$

En supposant que l'écoulement à l'intérieur des tubes est pleinement développé, les valeurs de Nu_{∞} , a , b , n_1 et n_2 sont respectivement de 4,4, 0,00398, 0,0114, 1,66 et 1,12 pour la condition aux limites de flux de chaleur constant.

En se basant sur cette corrélation, le coefficient d'échange de chaleur h est de 205 W/m²K.

Les propriétés optiques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV-5 : Propriétés optique

Parois solides	ε	α	K	n
La vitre (verre)	0,812	0,188	17,46	1,526
L'absorbeur (aluminium)	0,2	0,8	-	-

IV.4 Calcul du bilan thermique

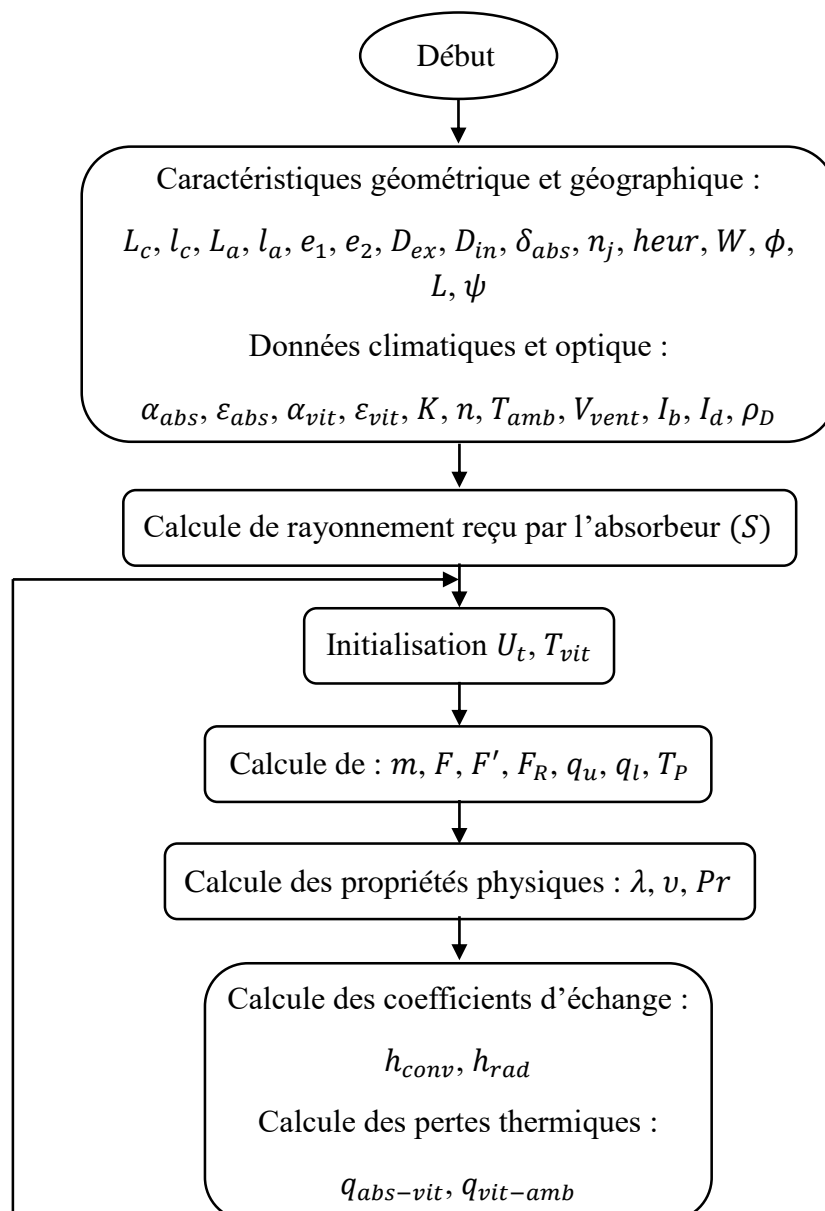
En se basant sur les données métrologiques obtenues à l'aide du logiciel Metenorm et les équations du bilan thermique discutées dans le deuxième chapitre, un code de calcul a été développé pour l'évaluation des diverses variables telles que la température de l'absorbeur, l'énergie utile et l'énergie perdue. Ce code repose sur la méthode de résolution de problèmes connue sous le nom d'essai-erreur, ou "Trial and error" en anglais. La méthode d'essai et d'erreur est une approche itérative fréquemment employée afin de déterminer une solution approximative à un problème pour lequel les valeurs exactes ne sont pas disponibles. Cette approche implique de formuler des hypothèses initiales, de procéder au calcul des résultats en se basant sur ces hypothèses, puis d'ajuster ces dernières en fonction des écarts constatés par rapport aux valeurs anticipées ou mesurées, et de réitérer le processus jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants.

Le code de calcul est subdivisé en trois parties fondamentales :

- La première section de notre étude consistera à déterminer la déclinaison, l'équation du temps, l'angle horaire et l'angle d'incidence, ce dernier étant calculé pour les trois composantes du rayonnement.
- La deuxième partie de l'étude est dédiée à l'évaluation du produit $\tau\alpha$, ce qui permet de calculer le rayonnement reçu par l'absorbeur.
- Dans la troisième partie, les diverses variables ont été identifiées, telles que l'énergie utile, l'énergie perdue à l'avant du capteur et la température de l'absorbeur. De plus, les divers coefficients d'échange convectif, radiatif et global ont été déterminés.

IV.4.1 Principe de fonctionnement de la méthode essai-erreur

La figure ci-dessous illustre l'organigramme du calcul, mettant en évidence les différentes étapes du processus de calcul.



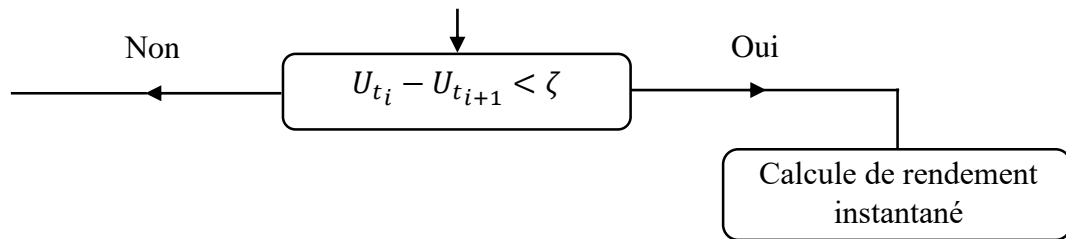


Figure IV-2 : Organigramme du modèle de code calcule

Le principe de fonctionnement de la méthode essai-erreur peut être résumé par les points suivants :

- **Faire une supposition initiale** : On commence par faire une première estimation ou supposition de la valeur inconnue (dans notre cas U_t).
- **Calculer le résultat avec cette supposition** : On utilise la supposition initiale pour effectuer les calculs nécessaires et obtenir un résultat.
- **Comparer le résultat calculé avec la valeur mesurée ou attendue** : On compare le résultat obtenu avec la valeur mesurée ou attendue. Si le résultat calculé est proche de la valeur attendue, on considère que la supposition est correcte. Sinon, on passe à l'étape suivante.
- **Ajuster la supposition** : Si le résultat calculé n'est pas suffisamment proche de la valeur attendue, on ajuste la supposition initiale. Si le résultat est trop élevé, on diminue la supposition ; si le résultat est trop bas, on augmente la supposition.
- **Répéter le processus** : On répète les étapes 2 à 4 fois jusqu'à ce que la différence entre le résultat calculé et la valeur attendue soit minimisée et acceptablement petite.

IV.4.2 Résultats

Le tableau suivant montre les différents résultats obtenus par le code de calcul. On note que les pertes à l'arrière du capteur et par les parois latérales Ils ne sont pas pris en compte.

Tableau IV-6 : Divers résultats obtenus par l'exécution du code de calcul.

Wilaya de Tébessa ($\varphi = 35.4^\circ\text{N}$, $L = 8.1^\circ\text{E}$), le 30 Avril 2023 ($n = 120$)						
Heurs	$S (W/m^2)$	$q_u(W/m^2)$	$q_t(W/m^2)$	$U_t(W/m^2K)$	$h_{conv}(W/m^2K)$	Rendement
6	0,60	-	-	-	-	-

7	28,59	-	-	-	-	-
8	124,42	-	-	-	-	-
9	286,69	76,9	210	3,95	3,92	26,8
10	461,18	234	227	4,11	3,97	50,08
11	592,17	359	233	4,11	3,98	60,7
12	649,65	414	236	4,16	3,99	63,7
13	658,65	425	233	4,20	3,97	64,6
14	648,80	422	226	4,14	3,94	65,1
15	657,50	435	223	4,08	3,93	63,7
16	391,35	203	189	3,89	3,94	51,8
17	217,12	33,4	184	4,09	3,79	15,4
18	73,04	-	-	-		-
19	21,19	-	-	-		-
20	0	-	-	-		-

IV.5 Simulation numérique

Dans cette partie nous avons examiné l'effet de la stratégie des nids d'abeilles sur les pertes convectives entre l'absorbeur et la vitre, pour cela et à partir des résultats obtenus par le code de calcul on a fait une simulation numérique avec le logiciel ANSYS Fluent.

IV.5.1 Hypothèses simplificatrices

Pour élaborer un modèle mathématique simplifié, nous avons adopté quelques hypothèses et approximations qui sont souvent retenues dans l'étude de la convection naturelle.

- Le fluide est newtonien et incompressible ;
- L'écoulement est laminaire ;
- On néglige l'apport de l'énergie interne dû à la dissipation visqueuse ;
- Toutes les propriétés thermo physiques sont des constantes sauf la masse volumique qui varie linéairement avec la température selon l'approximation de Boussinesq;

IV.5.1.1 L'approximation de Boussinesq

Le mouvement du fluide dans la convection naturelle est dû aux variations de la masse volumique et à la gravité. Ainsi, l'hypothèse de masse volumique constante ne peut être faite dans l'analyse des problèmes de convection naturelle. A la place, une simplification alternative appelée approximation de Boussinesq est faite. L'approche fondamentale dans cette approximation est de traiter la masse volumique comme constante dans l'équation de continuité et le terme d'inertie de l'équation de la quantité de mouvement, par ailleurs, dans le terme de gravité la masse volumique varie avec la température.

Avec cette simplification, les équations gouvernantes régissant le problème de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire inclinée d'un angle θ , sont données ci-dessous pour le cas bidimensionnel :

✓ Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

✓ Equations du bilan de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g\beta(T - T_0) \cos \theta \quad (\text{IV.4})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g\beta(T - T_0) \sin \theta \quad (\text{IV.5})$$

✓ Equation de conservation de la quantité d'énergie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{IV.6})$$

IV.5.2 Configurations du problème

Dans notre travail deux configurations sont étudiées. Pour les deux cas, la géométrie est une cavité rectangulaire fermée inclinée avec un angle $\theta = 35^\circ$. Elle est composée d'une paroi inférieure représentée par l'absorbeur chauffée avec une densité de flux constante qui représente les pertes thermiques à l'avant du capteur, qui sont obtenu à partir du code de calcul, des parois latérales isolantes et une paroi supérieure qui représente la vitre ayant une épaisseur égale à 3 mm. Cette dernière échange avec le milieu ambiant vers le haut par des flux convectif et radiatif (condition mixte).

La première configuration est le cas sans partition. Alors que, dans la deuxième configuration nous avons ajouté des partitions en verre fixer dans la lame d'air entre l'absorbteur et la vitre de tel sorte qu'ils ne s'attachent pas à la vitre ou à l'absorbteur. L'étude a été faite sur différents nombres, longueurs et positions des partitions qui varient respectivement de 1 à 20 partitions, 1 à 17 mm et 0,5 à 8,5 mm.

La Figure IV.3 montre les dimensions et les conditions au limites pour les deux cas sans et avec partitions.

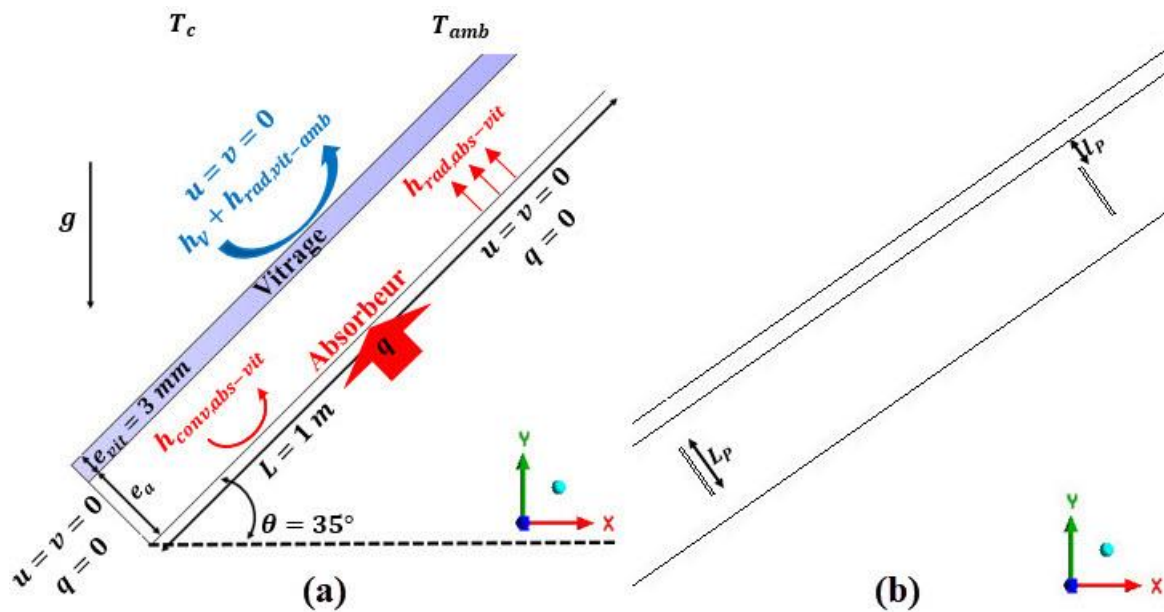


Figure IV-3 : Différentes dimensions et conditions aux limites (a) sans nids d'abeilles (b) avec la stratégie des nids d'abeilles

IV.5.3 Simulation numérique

La simulation numérique a été faite avec l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) de Patankar (Patanckar, 1980) pour le couplage pression vitesse ; alors que pour la discrétisation du terme de pression, il est conseillé d'utiliser le schéma PRESTO. Par ailleurs, le schéma de deuxième ordre amont (second order upwind) a été utilisé pour les autres termes.

IV.5.4 Indépendance de maillage

Afin de choisir de meilleures grilles, des maillages affinés au voisinage des parois solides ont été créés avec le logiciel Gambit pour une bonne observation des profils de température et

de vitesse. De même, pour réduire les temps des calculs et en même temps de s'assurer de leurs précisions, un test de convergence a été fait comme représenté dans la Figure suivante.

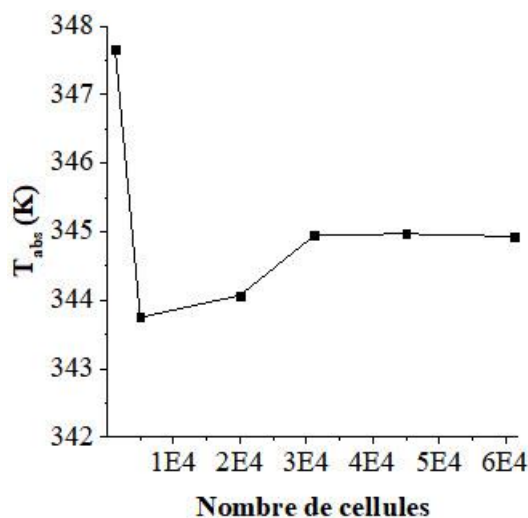


Figure IV-4 : Evolutions de la température moyenne de l'absorbeur en fonction du nombre de cellules

D'après cette figure qui représente l'évolution de la température moyenne de l'absorbeur pour différentes grilles, on remarque que la stabilisation de la température moyenne de l'absorbeur apparait à la grille 31250. Pour cette raison, et afin d'assurer une bonne précision des résultats et réduire le temps de calcul, on a choisi la grille 45000.

IV.5.5 Résultats et discussion

Cette étude numérique a été faite pour un angle d'inclinaison de 35° . On note que tous les résultats moyens ont été calculés avec la moyenne pondérée surfacique. Aussi on a négligé les pertes thermiques entre les parois latérales et la surface inférieure du capteur. l'étude de différents paramètres a été faite pour le cas où l'heure est égale à 13h

IV.5.5.1 Validation

Pour valider le modèle mathématique on a comparé le coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre obtenu numériquement avec le coefficient obtenu par le code de calcul (calculé par la corrélation de Hollands, Equation II.37). Aussi on a comparé le coefficient d'échange global entre l'absorbeur et l'environnement obtenu numériquement avec celle issue par le code de calcul.

Le coefficient d'échange convectif a été calculé avec la relation suivante :

$$h_{conv,abs-vit} = \frac{q_{conv}}{T_{abs} - T_{vit}} \quad (IV.7)$$

Où :

$$q_{conv} = q_t - q_{rad} \quad (IV.8)$$

Alors que le coefficient d'échange total est calculé avec l'équation II.49

La comparaison a été faite pour le jour 30 avril 2023 comme représente dans la figure suivante qui représente l'évolution des coefficients d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre et le coefficient d'échange total entre l'absorbeur et l'environnement.

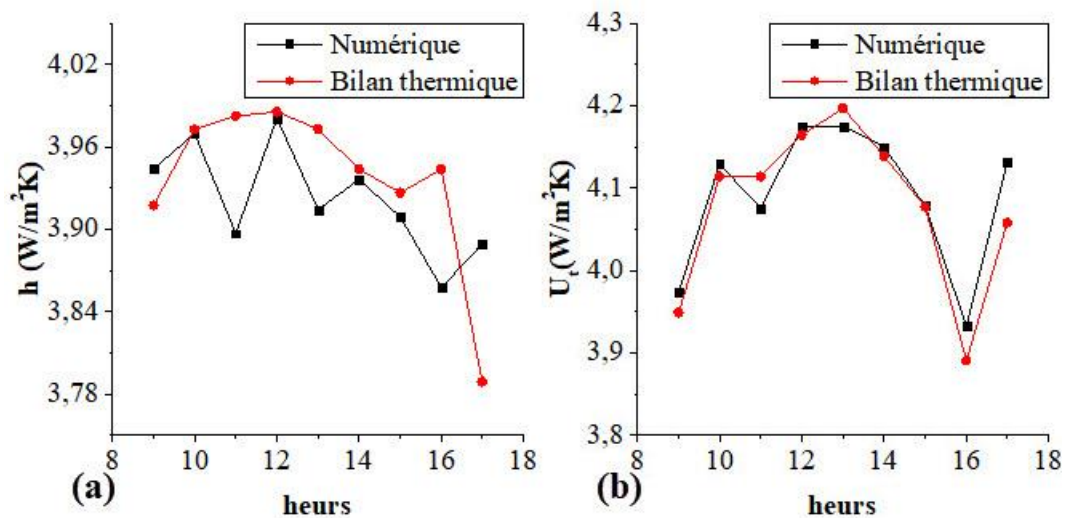


Figure IV-5 : Comparaison des résultats numériques et du bilan thermique (a) Coefficients d'échanges convectif entre l'absorbeur et la vitre en fonction des heures de la journée (b) Coefficient des pertes thermiques globales en fonction des heures de la journée

La Figure IV.5 (a) et (b) montre un bon accord entre les résultats numériques et les résultats obtenus par le bilan thermique, concernant le coefficient de transfert de chaleur convectif, on trouve une différence moyenne entre les résultats numériques et du bilan égale à 1,11 %. Alors que, pour le coefficient d'échange global une différence de 0,64 % entre les résultats numériques et du bilan thermique a été trouvée.

IV.5.5.2 Effet du nombre de partitions

Dans cette partie nous avons étudié l'effet du nombre de partitions sur les pertes convective. Pour cela nous avons varié le nombre de partitions de 1 jusqu'à 20 partitions pour une longueur fix égale à 50 % de l'épaisseur de la lame d'air ($l_p = 9 \text{ mm}$) et une distance entre la vitre et l'absorbeur est égale à 0,5 mm. A partir de la figure suivante qui représente l'évolution de la

température de l'absorbeur en fonction du nombre de partitions, on remarque pour la gamme de 1 à 5 partitions la température oscille légèrement autour de la valeur de la température de l'absorbeur dans le cas sans partitions. Lorsque le nombre de partitions augmente (6 à 16 partitions) on remarque une chute de la température comparée avec le cas sans partitions et cela dû premièrement a l'augmentation de la surface d'échange ce qui mène a augmenté le transfert de chaleur entre l'absorbeur et la vitre, et deuxièmement l'utilisation des partitions mène a créé des rouleaux contre rotatif ce qui augmente le transfert de chaleur entre la surface chaude et froide. La figure IV-7 montre les lignes de courant pour les cas sans et avec partitions. A partir de cette figure on remarque dans le cas avec partitions une augmentation de nombre des rouleaux contre rotatif comparée avec le cas sans partitions. Alors que, à partir de 16 partitions on remarque une augmentation de la température de l'absorbeur

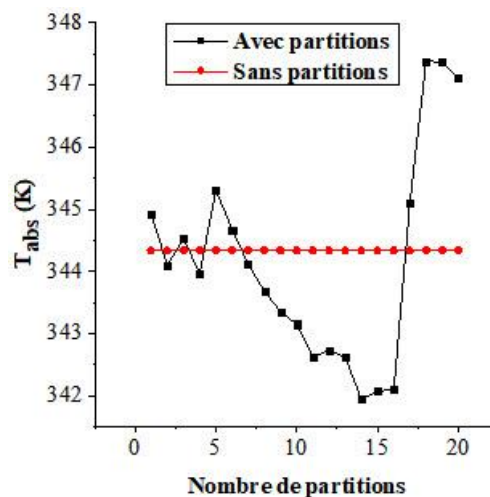


Figure IV-6 : Evolution de la température de l'absorbeur en fonction de nombre de partitions.

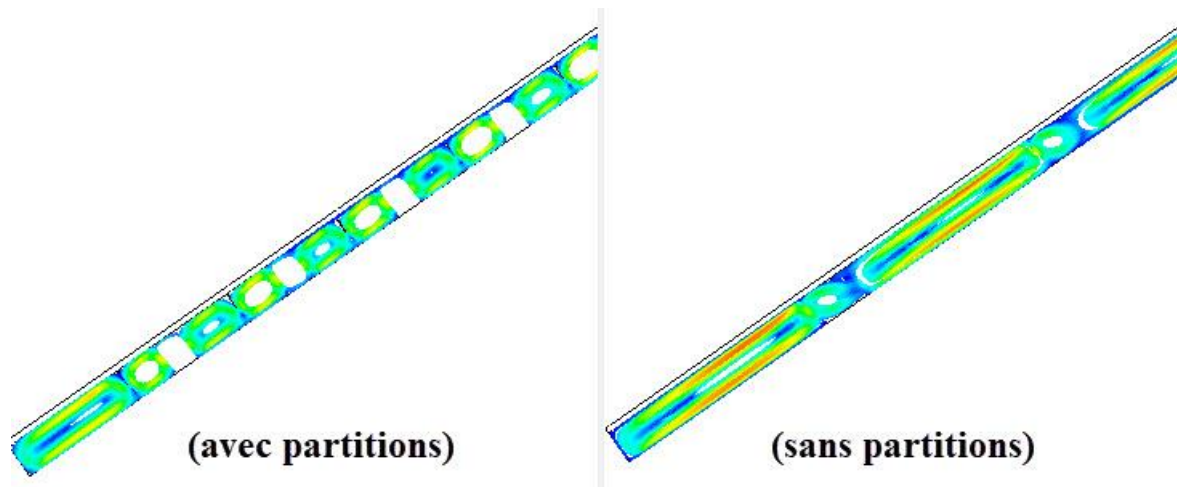


Figure IV-7 : Lignes de courant pour les deux cas sans et avec partitions (14 partitions).

Alors que, à partir de 16 partitions on remarque l'effet positif de la stratégie des nids d'abeilles sur la réduction des pertes convectives ou la température de l'absorbeur augmente avec une valeur maximale égale à 347,3799 K pour le cas de 18 partitions, cette augmentation est dû à la réduction de vitesse de l'écoulement comme représenté dans la figure iV-8 qui représente les lignes de courant pour le cas sans partitions et avec partitions (18 partitions). A partir de cette figure on remarque pour le cas avec partitions la disparition des rouleaux contre rotatif et la réduction de la vitesse de l'écoulement et que ce dernier devient régulier est prend la structure de Raleigh Bénard ce qui conduit à réduire les pertes convectives.

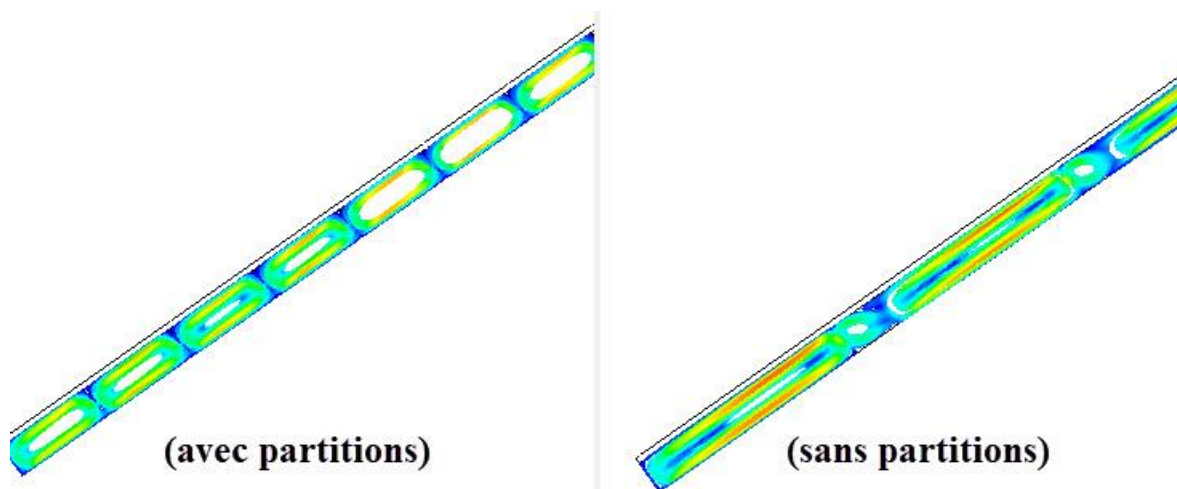


Figure IV-8 : Lignes de courant pour les deux cas sans et avec partitions (18 partitions).

Ont conclu à partir de ces résultats que l'utilisation de la stratégie des nids d'abeilles mène à réduire les pertes convectives entre l'absorbeur et la vitre d'un capteur solaire plan, mais aussi cette stratégie peut augmenter les pertes convectives.

IV.5.5.3 Effet de la longueur de partitions

Après avoir étudiée l'effet du nombre de partitions nous avons examiné dans cette partie l'effet de la longueur de partitions, où on fixe le nombre pour à 18 partitions (cas optimale) et on varie la longueur de 1 à 17 mm. La figure IV-9 montre l'évolution de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de la longueur de partitions. A partir de cette figure on remarque que dans la gamme des longueurs entre 1 à 6 mm une diminution sur la température de l'absorbeur dû à l'effet négatif de la stratégie qui crée des rouleaux contre rotatif comme montré précédemment. Alors que, dans la gamme de 7 à 14 mm on remarque une augmentation sur la température de l'absorbeur avec une valeur maximal pour le cas 9 mm. Dans cette gamme de longueur l'effet positif sur la réduction de la vitesse de l'écoulement et l'augmentation de la température de l'absorbeur est apparait. Dans la même gamme des épaisseurs (7 à 14 mm) et à partir de la longueur 10 mm on remarque une diminution de la température de l'absorbeur malgré que l'écoulement prend une structure régulière et sa vitesse diminue a chaque fois que la longueur augmente comme montré dans la figure IV-10 qui représente les lignes de courant dans le cas sans partitions et pour différentes longueurs des partitions. Cette diminution est dû à l'augmentation des pertes conductives entre l'absorbeur et la vitre où les partitions prennent le rôle des ailettes.

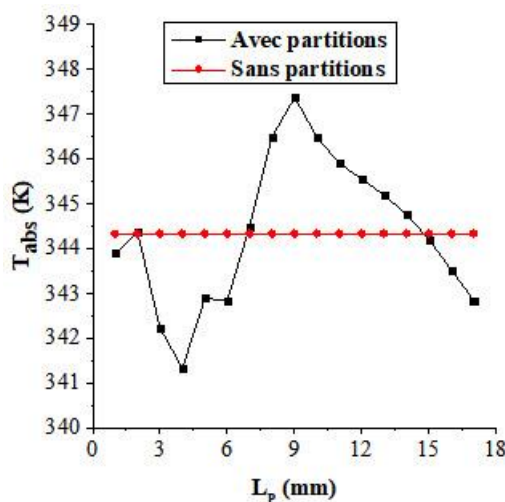


Figure IV-9 : Evolution de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de la longueur de partitions pour un nombre de partitions égale 18 et $l_p = 0,5$ mm

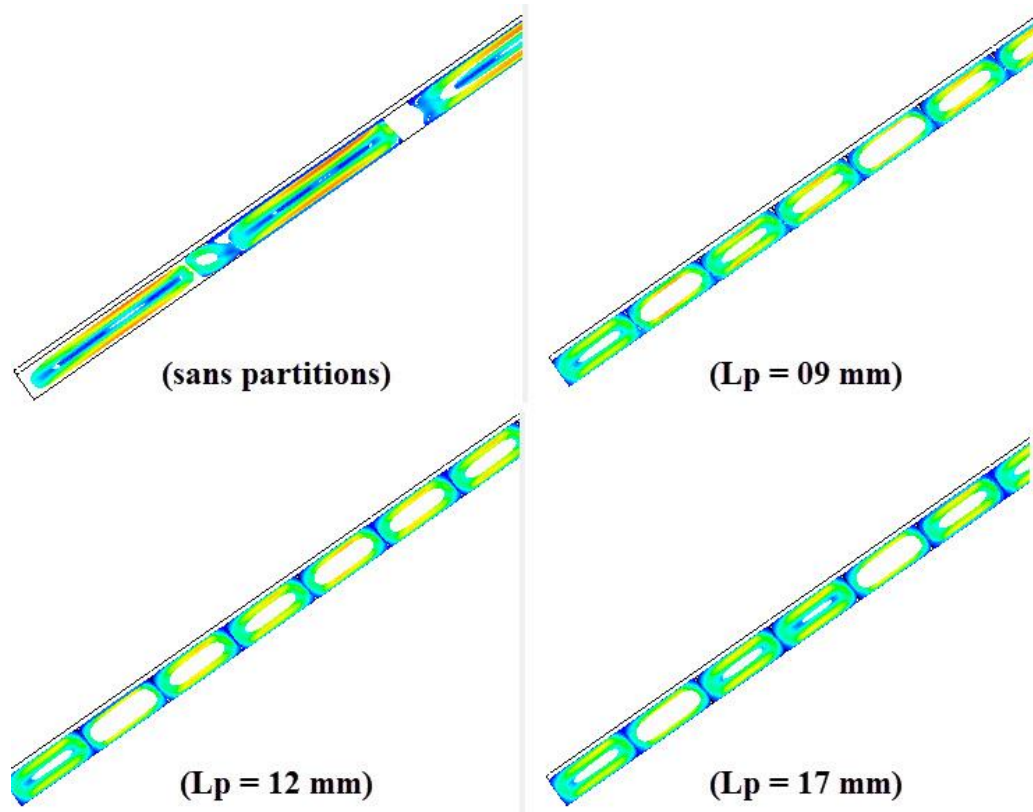


Figure IV-10 : Lignes de courant dans le cas sans partitions et avec partitions pour différentes longueurs de partitions.

On conclut d'après ces résultats que l'augmentations de la longueur des partitions dans des certain longueur mène augmenter les pertes thermiques entre l'absorbeur et la vitre et que la meilleure longueur pour notre étude est égale à 9 mm c'est-à-dire 50 % de l'épaisseur de la lame d'air.

IV.5.5.4 Effet de la position de partitions

Pour montrer l'effet de la position des partitions sur les pertes thermiques nous avons varier la longueur entre la vitre et l partition de 0,5 mm à 8,5 mm pour un nombre de partions égale à 18 partitions et une longueur égale à 9 mm. A partir de la figure IV-11 qui représente l'évolution de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de la distance entre la vitre et les partitions on remarque qu'à chaque fois que la distance augmente la température diminuer jusqu'à $l_p = 6$ mm. Pour cette gamme de distance on remarque que l'écoulement devient irrégulier est les rouleaux contre rotatif apparaissent autour des partitions, ce qui mène a augmenté les pertes convectives entre l'absorbeur est la vitre comme montré dans la figure IV-12 qui représente les lignes de courant pour le cas sans partitions et avec partions pour différentes distances entre la vitre et les partitions, où en remarque pour les cas 4 mm la

formation des rouleaux autour des partitions. Tandis que, à partir de la distance $l_p = 7$ mm on remarque une augmentation de la température de l'absorbeur qui reste inférieur par rapport au cas sans partition malgré que les rouleaux contre rotatif disparaissent. Cet effet négatif est comme montré déjà ou dans le cas où les partions see rapprochent à l'absorbeur. Elle prennent le rôle des ailettes.

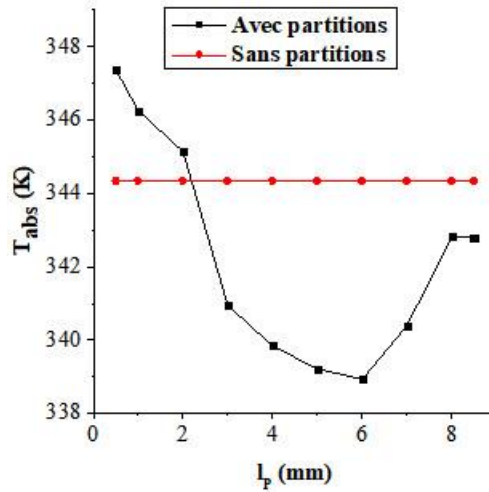


Figure IV-11 : Evolution de la température moyenne de l'absorbeur pour les deux cas sans et avec partitions en fonction de la distance entre la vitre et les partitions ($L_P = 9$ mm, nombre de partitions = 18).

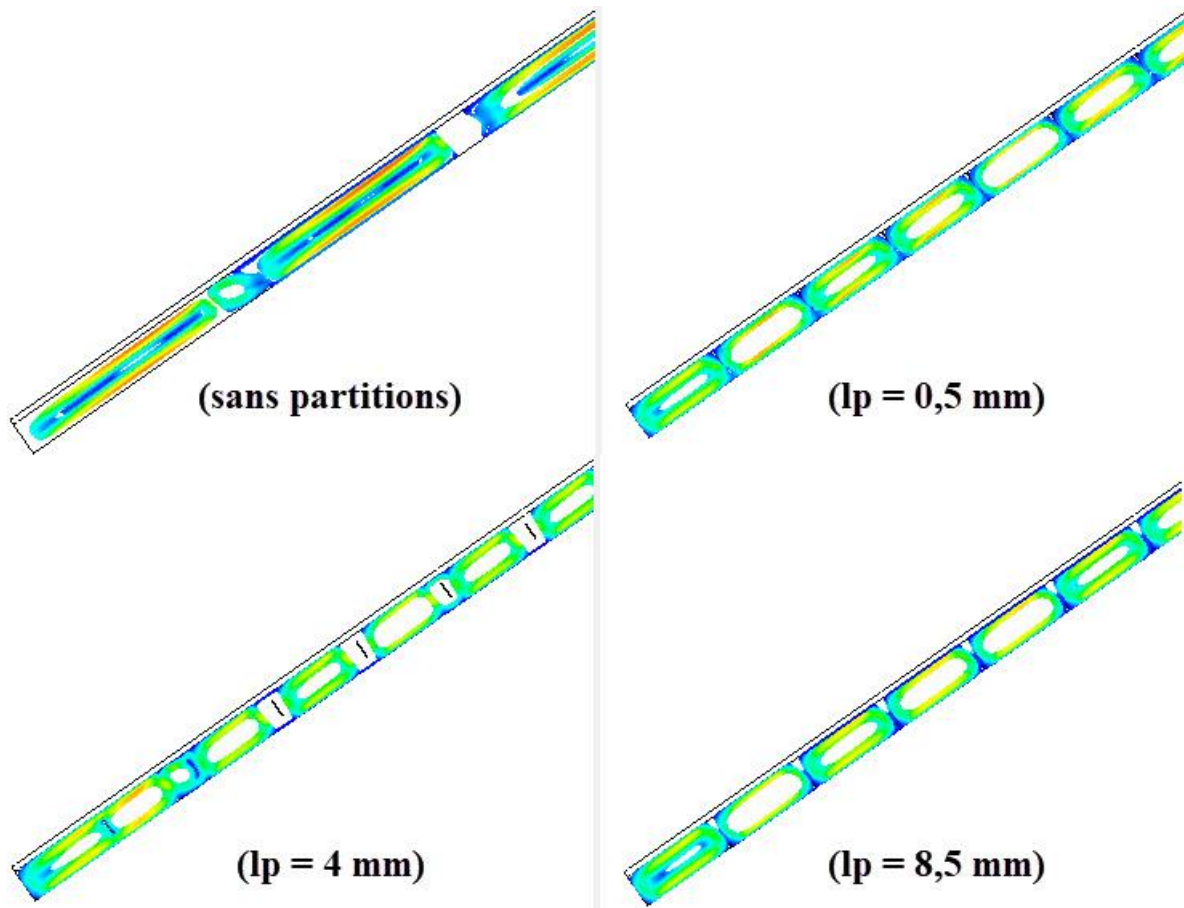


Figure IV-12 : Lignes de courant pour le cas sans partitions et avec partitions pour différente distance entre la vitre et les partitions

On conclut d'après ces résultats que la meilleure position des partitions est loin le plus possible de l'absorbeur sans laisser un espace entre la vitre et les partitions ce qui mène à la création des rouleaux autour des partitions.

IV.5.5.5 Effet de la stratégie des nids d'abeilles sur toute la journée

Pour montrer l'effet de la stratégie des nids d'abeilles sur toute la journée nous avons utilisé le cas optimal qui est une structure de 18 partitions avec une longueur de 9 mm et une distance entre la vitre et les partition égale à 0,5 mm. C'est-à-dire nous avons varié les différentes conditions aux limites pour chaque heure de la journée. Pour cela on utilise les valeurs du tableau IV-6

La figure suivante représente le coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre et le coefficient d'échange globale pour les deux cas sans et avec partitions en fonction des heures du jour. A partir de cette figure on remarque l'effet positif de la structure utilisé sur toute le jour où, le coefficient d'échange convectif a été diminuer avec une valeur moyenne de

6,28 % par rapport au cas sans partitions. Tandis que, les pertes totales sont réduite de 4,12 % par rapport au cas sans partitions

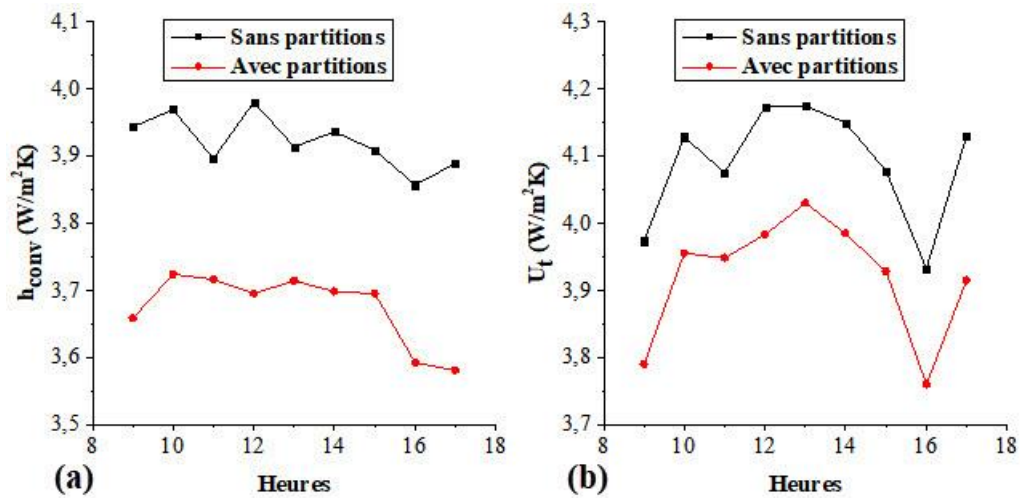


Figure IV-13 : Coefficient d'échange (a) totale (b) convectif en fonction des heures de la journée étudié pour les deux cas sans et avec partitions

On conclut à partir de ces résultats que la structure obtenue donne une bonne réduction sur les pertes thermiques entre l'absorbeur et la vitre sur toute la journée de fonctionnement.

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que l'intégration de la stratégie des nids d'abeilles dans un capteur solaire plan réduit les pertes convectives entre l'absorbeur et la vitre de 6,28 % et diminue les pertes thermiques totales de 4,12 % par rapport à un capteur sans cette stratégie. Cette réduction confirme l'efficacité des nids d'abeilles dans l'amélioration de l'isolation thermique et l'optimisation des performances du capteur solaire, offrant ainsi une approche prometteuse pour accroître l'efficacité énergétique des systèmes de captation solaire.

V. CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a exploré l'optimisation des performances des capteurs solaires plans en se concentrant sur la réduction des pertes thermiques grâce à l'intégration de la stratégie des nids d'abeilles. À travers une analyse méthodique, nous avons examiné l'importance des énergies renouvelables, les caractéristiques des capteurs solaires plans, et les approches numériques pour améliorer leur efficacité.

Le premier chapitre a présenté une vue d'ensemble des énergies renouvelables, soulignant leur rôle crucial dans la transition énergétique mondiale et l'importance des capteurs solaires plans pour la conversion efficace de l'énergie solaire en chaleur utilisable.

Le deuxième chapitre a offert une analyse bibliographique des capteurs solaires plans, abordant leur bilan thermique et optique et l'effet des nids d'abeilles sur la réduction des pertes thermiques. Cette revue a mis en lumière les progrès et les défis dans l'optimisation des capteurs solaires, indiquant le potentiel des nids d'abeilles pour améliorer l'isolation thermique.

Le troisième chapitre a détaillé les équations gouvernantes et les méthodes de simulation numérique CFD pour modéliser les performances thermiques des capteurs solaires. Cette approche numérique a permis d'évaluer avec précision l'impact des modifications structurelles sur l'efficacité du capteur.

Le quatrième chapitre a présenté les résultats de l'étude numérique, montrant que la stratégie des nids d'abeilles réduit les pertes convectives de 6,28 % et les pertes thermiques totales de 4,12 %. Ces résultats confirment l'efficacité de cette stratégie pour améliorer l'isolation thermique et l'efficacité énergétique des capteurs solaires plans.

En conclusion, l'intégration de la stratégie des nids d'abeilles dans les capteurs solaires plans se révèle être une solution efficace pour réduire les pertes thermiques et augmenter l'efficacité globale. Cette étude ouvre des perspectives intéressantes pour l'amélioration continue des capteurs solaires. Parmi les pistes futures, nous recommandons :

Optimisation des Matériaux : Explorer de nouveaux matériaux pour les structures en nid d'abeilles afin de maximiser les performances thermiques tout en réduisant les coûts de production.

Études Expérimentales : Réaliser des études expérimentales complémentaires pour valider les résultats de la simulation et évaluer les performances des capteurs solaires en conditions réelles d'utilisation.

Ces perspectives offrent un cadre pour des recherches futures visant à améliorer les technologies de captation solaire et à contribuer à une transition énergétique plus efficace et durable.

VI. REFERENCES

- [1] BONAL Jean. ROSSETTI Pierre : Energie alternative, Edition omniscience, France 2007
- [2] ROBERT Jérôme, FABAS Laurent : Guide de la maison économe, Edition Eyrolle, paris 2008
- [3] <https://biblio.univ-annaba.dz> › TRAORE-Massitan
- [4] S. Hamza, Cours « Energie Renouvelables, 2017 ». <https://www.univ-chlef.dz>
- [5] <http://jeunes.edf.com/> Consulter le 03/05/2022
- [6] K. Belmokhtar, “Contribution à l'intégration d'un parc éolien à un réseau électrique autonome, avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène” Doctorat en génie électrique, université du Québec, 2015.
- [7] rapport journalier de la production de la centrale TG kaberten
- [8] le site web <http://www.accesmad.org>
- [9] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_\(énergie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(énergie)) Consulter Le 03/05/022
- [10] H. Kanchev, “Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable” Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain Hal Id école centrale de lille, 2015
- [11] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [12] soteris A.kalogirou,El sevier-Academic press 2014
- [13] ZIDANI, C., Conception et modélisation des systèmes photo thermiques. Applications aux systèmes photo thermiques alimentés par fibres optiques, thèse de doctorat, Université Abou Berk Belkaid de Tlemcen, 2012
- [14] By Ibrahima Ndir. (2021) « <https://senegrid.sn/le-blog/applications-de-l-energie-solaire> »
- [15] ISO, Énergie solaire – Vocabulaire (ISO 9488 :1999), Comité Européen de Normalisation, mars 2001, 34 p

- [16] Duffie, John A. et Beckman, William A., *Solar engineering of thermal processes*, Wiley, 2013
- [17] Soteris A. Kalogirou, « Solar thermal collectors and applications », *Progress in Energy and Combustion Science*
- [18] h. ben cheikch.M.ould sidi med et y.draoui .Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif, mémoire d'ingénieur université de kasdi merbah ouargla.
- [19] F.A. Peuser, K.H. Remmers, M. schanauss, *installations solaires thermiques conception et mise en œuvre*, 2005.
- [20] Daguene, M., 1985. *Les sechoirs solaires, théorie et pratique*. Paris: Unesco.
- [21] Edwards, D, K., *Capteurs solaires*, Edition SCM, paris, 1979.
- [22] Bernard, J., *énergie solaire calculs et optimisation*, nouvelle Edition, 2011.
- [23] Mozumder, A., Singh, A. K. & Sharma, P., 2014. Study of Cylindrical Honeycomb Solar Collector. *Journal of Solar Energy*, p. 7.
- [24] Iqbal, M., 1983. *An introduction to solar radiation*. Toronto: ACADEMIC PRESS
- [25] Parry, M. et al., 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- [26] Mozumder, A., Singh, A. K. & Sharma, P., 2014. Study of Cylindrical Honeycomb Solar Collector. *Journal of Solar Energy*, p. 7.
- [27] Onur, N., 1993. Forced convection heat transfer from a flat-plate model collector on roof of a model house. *Wärme - und Stoffübertragung*, Volume 28, pp. 141-145.
- [28] Versteeg, H. K. & Malalasekera, W., 2007. *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method*. 2 éd. Glasgow: Pearson Education.
- [29] D. Eckert 25.11.1987, Université de Genève, Section de Physique
- [30] Diane DUVAL, *Ailettes thermique*, Institut National Des Sciences Appliquées de Rouen, Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur. 2013.
- [31] *Cour de convection et rayonnement-4*, plateforme TTE-C.E.S.I.R.E, Université Joseph Fourier-Grenoble.pdf.

[32] Soteris A. Kalogirou, « Solar thermal collectors and applications », Progress in Energy and Combustion Science

[33] Nguyen, K.-B., Yoon, S.-H. & Choi, J. H., 2012. Effect of working-fluid filling ratio and cooling-water flow rate on the performance of solar collector with closed-loop oscillating heat pipe. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(1), pp. 251- 258.