



RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Amar Telidji Laghouat

FACULTE DE THECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN DE CYCLE

Pour l'obtention du diplôme de Master II

Domaine Sciences et Technologie

Filière Génie mécanique

Spécialité Energie renouvelable

THÈME

Etude et simulation de transfert thermique d'un capteur thermique photovoltaïque (PV/T)

Par

- 1- Adjalat Mohammed Ziad
- 2- Messaoud Allaoua

Pr. Sahel Djamel

Dr. Ben houia Amine Touik

Dr. Bellahcene Lahcene

Président

Examineur

Encadreur

2022 / 2023

Remerciements

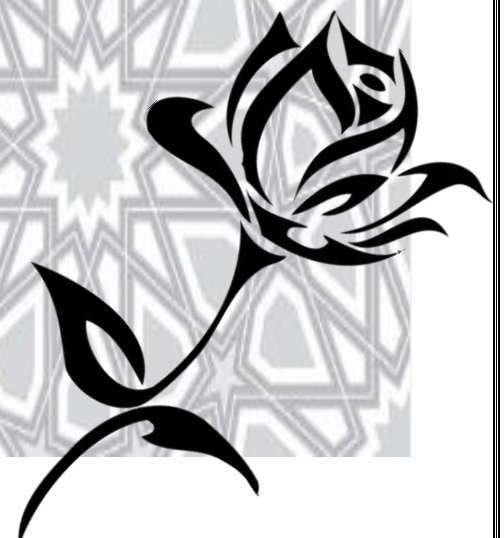
Avant toute chose, nous remercions Allah pour nous guider et aidé à persévérer dans notre études et rencontré des enseignants attentifs.

Tout d'abord ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr Bellahcene Lahcene, nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce modeste mémoire.

Nous voudrions remercier Pr. Sahel Djamel en étant président du jury et Dr. Ben houia Amine Touik d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Nos remerciements s'adresse également à tous notre professeurs et pour leur générosité ainsi que leur grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin.



Dédicace

Je rends grâce à dieu de m'avoir donné la santé, et la volonté ainsi que la conscience d'avoir terminé mes études.

Je dédié cette thèse :

A mes très chères parents mon père , la personne la plus chère dans ma vie , ma raison de vivre,

il m'a encouragé et il m'a aidé à accomplir ce mémoire , pour me faire réussir et Ma chère mère,

la lumière de ma vie, la source de tendresse, qui m'a soutenu et encouragé durant ces années

d'études .que dieu vous garde, Je vous aime de tout mon cœur.

A toutes mes connaissances et tous mes amours ; A toutes mes connaissances et tous mes

amours A mes très chers frères en reconnaissances de leurs amour, encouragements, que dieu me

les garde.

A cousin Melik Ahmed Fathi pour son aide,

Qui m'a supporté et m'a fait confiance tout au long de ce travail.



Résumé

Cette étude fait l'analyse des performances thermiques d'un capteur solaire hybride photovoltaïque-thermiques (PV/T) soumis aux conditions climatiques de la région de Laghouat. Des simulations numériques tridimensionnelles ont été effectuées pour analyser le transfert thermique dans les composants du capteur solaire hybride PV/T. L'investigation numérique est effectuée en utilisant un code de calcul CFD (ANSYS Fluent 16.0) qui basé sur la méthode des volumes finis. Le modèle de turbulence K-epsilon et le modèle Rossel and sont utilisés pour notre cas de calcul. Quatre vitesses d'écoulement d'air à l'entrée ($V_{in} = 0.1 \text{ m/s}, 0.075 \text{ m/s}, 0.050 \text{ m/s}, 0.025 \text{ m/s}$) sont utilisées. Les résultats numériques donnent une bonne performance thermique provoquée par le changement de vitesse de circulation d'air dans le capteur solaire hybride PV/T. Cette étude nous a permis de déterminer l'importance de l'utilisation le code de calcul ANSYS 16 d'étudier le transfert thermique par rayonnement dans un capteur solaire hybride PV/T.

Mots clés : Capteurs solaire hybride, transfert thermique, ANSYS Fluent, performance thermique.

Abstract:

This study analyzes the thermal performance of a photovoltaic-thermal hybrid solar collector (PV/T) subjected to the climatic conditions of the Laghouat region. Three-dimensional numerical simulations were carried out to analyze the heat transfer in the components of the PV/T hybrid solar collector. The numerical investigation is carried out using a Computational fluid dynamics (CFD) code (ANSYS Fluent 16.0) which is based on the finite volume method. The K-epsilon turbulence model and the Rossel and model are used for our calculation case. Four inlet airflow velocities ($V_{in} = 0.1 \text{ m/s}, 0.075 \text{ m/s}, 0.050 \text{ m/s}, 0.025 \text{ m/s}$) are used. The numerical results give a good thermal performance caused by the change in of air velocity movement in the hybrid solar collector PV/T. This study allowed us to determine the importance of using the ANSYS 16 simulation code to study the heat transfer by radiation in a hybrid PV/T solar collector.

Keywords: Hybrid solar capture, heat transfer, ANSYS Fluent, thermal performance.

المخلص:

تحليل أداء الحرارة لجهاز تجميع الطاقة الشمسية المركبة الفوتو فولتية الحرارية (PV/T) تحت ظروف منطقة الأغواط. تم إجراء محاكاة عددية ثلاثية الأبعاد لتحليل نقل الحرارة في مكونات جهاز التجميع الشمسي المركب PV/T. تم إجراء التحقيق العددي باستخدام برنامج الديناميكا السوائل الحاسوبية (ANSYS Fluent) (CFD) (16.0) الذي يعتمد على طريقة الحجم المحدود. تم استخدام نموذج التشويش K-epsilon ونموذج Rosseland

في حالة الحساب لدينا. تم استخدام أربع سرعات لتدفق الهواء ($V_{in} = 0.1$ م/ث، 0.075 م/ث، 0.050 م/ث، 0.025 م/ث). الواصلة تعطي النتائج العددية أداءً حراريًا جيدًا ناتج عن تغير حركة سرعة الهواء في جهاز التجميع الشمسي المركب PV/T. هذه الدراسة سمحت لنا بتحديد أهمية استخدام برنامج المحاكاة ANSYS 16 لدراسة نقل الحرارة عن طريق الإشعاع في جهاز التجميع الشمسي المركب PV/T.

الكلمات الدالة: جمع شمسي مركب، نقل حرارة، ANSYS Fluent، أداء حراري.

RESUME	III
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLAEUX	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITREI :GENERALITE SUR LES CAPTEURS SOLAIRES	4
I.1 Introduction	5
I.2 Capteurs Solaire Photovoltaïque	5
I.2.1 Principe d'une cellule photovoltaïque	5
I.3 Les différents types de technologies de cellules photovoltaïque	6
I.3.1 Silicium monocristallin	6
I.3.2 Silicium poly-cristallin	6
I.3.3 Silicium amorphe	7
I.4 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	7
I.5 Composante de système PV	8
I.5.1 Générateurs	9
I.5.2 Batteries	10
I.5.3 Onduleur	11
I.5.4 Régulateur	12
I.6 Avantage et inconvénients du système PV	12
I.7 Capteurs Solaire Thermique	13
I.7.1 Principes de capteur solaire thermique	13
I.7.2 Composants des capteurs solaires thermiques	14
I.8 Les différents modèles des capteurs solaires thermiques	15
I.8.1 Types des capteurs solaires plans	15
I.9 Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré	17
I.9.1 La couverture transparente	17
I.9.2 L'absorbeur	18
I.9.3 Le fluide caloporteur	19
I.9.4 L'isolant	20
I.10 Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré	20

Liste des Figure

I.12 Inclinaison optimale d'un capteur	21
I.13 Conclusion	22
CHAPITRE II : GISEMENT SOLAIRE	23
II.1 Introduction	24
II.2 Source de l'énergie solaire	24
II.3 Aspects géométriques	25
II.3.1 Mouvements de la Terre autour du Soleil	25
II.3.2 Mouvement apparent du soleil	26
II.4 Aspects énergétiques	27
II.4.1 L'atmosphère terrestre	27
II.4.1.1 Rayonnement du ciel et de l'atmosphère	28
II.4.2 Masse d'air	29
II.4.3 Direction des rayons solaires	29
II.5 Les coordonnées célestes	31
II.6 Les temps solaires	32
II.6.1 Heures et temps	34
II.7 Les paramètres externes d'une installation	35
II.7.1 La puissance du rayonnement solaire	36
II.7.2 L'angle d'incidence sur un plan	37
II.8 Rayonnement solaire reçu au niveau du sol	38
II.9 Conclusion	39
CHAPITRE III : BILANS THERMIQUES D'UN CAPTEUR SOLAIRE PV/T	40
III.1 Introduction	41
III.2 Généralités sur les transferts de chaleur	41
III.3 Théories de transfert de chaleur	41
A. Transfert de chaleur par conduction	42
B. Transfert de chaleur par convection	42
C. Transfert de chaleur par rayonnement	44
III.4 Modélisation énergétiques du capteur PV/T	45
III.5 Bilan thermique	49

Liste des Figure

III.6 Bilan énergétique du capteur hybride PVT	50
III.7 Le rendement d'un capteur solaire	56
III.7.1 Rendement instantané du capteur	56
III.7.2 Rendement journalier du capteur	57
III.8 Les paramètres influant le rendement d'un capteur solaire	57
III.8.a Les paramètres externes	57
III.8.b Les paramètres internes	58
III.9 Conclusion	59
CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE	1
IV.2 Présentation de logiciel ANSYS Fluent	61
IV.3 Géométrie du modèle	64
IV.4 Résultats et discussions	67
IV.5 Conclusion	74
CONCLUSION GENERALE	73
BIBLIOGRAPHIE	77

Liste des Figures

Chapitre I : Généralité sur les capteurs solaires PV/T

Figure I.1 : Panneaux photovoltaïque	5
Figure I.2 : Principe photovoltaïque	6
Figure I.3 : Silicium monocristallin	6
Figure I.4 : silicium poly-cristallin	7
Figure I.5 : silicium amorphe	7
Figure I.6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	8
Figure I.7 : Composante de système PV	9
Figure I.8 : De la cellule au champ photovoltaïque	10
Figure I.9 : Exemple d'un panneau solaire	10
Figure I.10 : Symbole d'onduleur	11
Figure I.11: Régulateur autonome	12
Figure I.12 : Processus dans un capteur solaire plan	13
Figure I.13 : La capteur stockeur en béton	14
Figure I.14: Capteurs plans sans vitrage	15
Figure I.15 : Capteur plans vitré	16
Figure I.16 : Capteur sous vide	16
Figure I.17 : Coupe schématique d'un capteur plan vitré	17
Figure I.18 : Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré	21

CHAPITRE II : GISEMENT SOLAIRE

Figure II.1: Spectre du rayonnement solaire	25
Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du soleil	26
Figure II.3 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L	27
Figure II 4 : Répartition spectrale du rayonnement solaire du sol terrestre	28
Figure II : 5 Spectre du rayonnement atmosphérique	29
Figure II.6 : Représentation des vecteurs unitaires	30
Figure II.7 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich	35
Figure II.8 : Rayonnement solaire global quotidien moyen en kWh/m ² pendant l'année	36
Figure II.9 : Mesure de rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque	37
Figure II.10 : Inclinaison de 90° par rapport aux rayons du soleil (au centre) = production	38
Figure II.11 : Composantes du rayonnement solaires	39

CHAPITRE III : BILANS THERMIQUES D'UN CAPTEUR SOLAIRE PV/T

Figure III.1 : écoulement d'un fluide en régime laminaire	43
Figure III.2: écoulement d'un fluide en régime turbulent	43
Figure III.3 : Schéma synoptique d'un système à base du capteur PV/T hybride	45
Figure III.4 : Représentation d'état capteur PV/T hybride	46
Figure III.5 : Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds	50
Figure III.6 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face extérieure	51
Figure III.7 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face intérieure	52
Figure III.8 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la Cellule photovoltaïque	53
Figure III.9 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar	53

Liste des Figure

Figure III.10 : Ecoulement du fluide dans un tube	55
Figure III.11 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de L'isolant ; face intérieure	56
Figure III.12 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face, extérieur	56
CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE	
Figure IV.1 : La géométrie du capteur solaire PV/T étudié.	65
Figure IV.2 : le modèle du maillage du capteur solaire hybride PV/T utilise dans la simulation numérique.	66
Figure IV.3 : la variation de la température d'air à la sortie du PV/T pour le mois de Septembre.	68
Figure IV.4 : la variation de la température moyenne des cellules photovoltaïques pour le mois de Septembre.	69
Figure IV.5 : la variation de la température de l'air à la sortie pour le mois d'Octobre.	70
Figure IV.6 : la variation de la température moyenne des cellules photovoltaïques pour le mois d'Octobre.	70
Figure IV.7 : la distribution du champ thermique au niveau les cellules photovoltaïques pour de le mois de Septembre et $V_{in}=0.025\text{m/s}$.	72
Figure IV.8 : la distribution du champ thermique au niveau les cellules photovoltaïques pour de le mois de Septembre et $V_{in}=0.1\text{m/s}$.	73

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralité sur les capteurs solaires PV/T

Tableau I.1 : La différence entre les batteries PV	11
Tableau I.2 : Des avantage et inconvénients	13
Tableau I.3 : Caractéristiques optiques de quelques verres	18
Tableau I.4 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur	18
Tableau I.5 : Revêtements des surfaces d'absorbeur	19
Tableau I.6 : Quelques propriétés des isolants	20

Chapitre IV : Simulation Numérique

Tableau IV.1 : Propriétés thermophysiques de différentes composantes du capteur solaire.	65
--	----

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
G	Rayonnement global incident	W/m^2
ei	Épaisseur d'un corps d'indice i	m
A	Surface d'échange	W
q	Flux de chaleur	W
k	Coefficient de conductivité thermique	W
mi	Masse d'un corps d'indice i	Kg
Ti	Température d'un corps d'indice i	$^{\circ}C$
V	Vitesse du vent	m/s
θ	Angle d'incidence des rayons solaires	degré
c	Vitesse de la lumière	m/s
TSV	Temps solaire vrai	Heure
TSM	Temps solaire moyen	Heure
TU	Temps universel	Heure
TL	Temps légal	Heure
ΔH	Décalage horaire	Heure
$qcdia$	Quantité de chaleur échangée par conduction	W
Tab	Température de l'absorbeur	$^{\circ}C$
Tii	Température de la face intérieure de l'isolant	$^{\circ}C$
Til	Température de la face latérale de l'isolant	$^{\circ}C$
eab	Épaisseur de l'absorbeur	mm
ei	Épaisseur de l'isolant horizontal	mm

Nomenclature

s	Surface de la paroi solide en contact avec le fluide	m^2
T_p	Température de la paroi solide	$^{\circ}C$
T_f	Température du fluide	$^{\circ}C$
T_{ext}	Température ambiante	$^{\circ}C$
P_{abs}	La puissance absorbée à la surface de l'absorbeur.	W
P_u	La puissance utile	W
P_a	La puissance perdue	W
P_s	Puissance stockée sous forme de chaleur	W
A_v	Surface de la vitre	m^2
m	Débit massique	Kg/m^2
T_{fs}	Température de sortie du fluide	$^{\circ}C$
T_{fs}	Température d'entrée du fluide	$^{\circ}C$
$\Delta T_{fld,xt}$	La différence de température entre le fluide caloporteur, et l'air ambiant	
a	Air ambiant	
a_b	Absorbeur	
c	Ciel	
f	Fluide	
e_i	Isolant extérieur	
i_i	Isolant intérieur	
v_e	Vitre extérieur	
v_i	Vitre intérieur	
α	Coefficient d'absorption	-
β	Facteur optique du capteur	$^{\circ}$
ε	Émissivité thermique du matériau	-
η	Rendement instantané	%

Nomenclature

η_0	Rendement optique	%
K	Conductivité thermique	W/m. °C
μ	Viscosité dynamique	Kg/m. s
ρ	Masse volumique d'un corps d'indice i	Kg/m ³
h	Constante de Planck	J.s
ν	La fréquence	S ⁻¹
w	L'angle horaire	°/h
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/(m ² .k ²)



Introduction Générale

Le monde s'est développé et les besoins en énergie s'augmentent de façon exponentielle. De part, l'épuisement progressif des réserves des énergies fossiles (pétroles et de gaz) et la lutte contre le changement climatique (limitation des émissions des gaz à effet de serre) constituent des défis majeurs à relever. A l'instar de ce qui précède, il est nécessaire de découvrir de nouvelles sources d'énergie alternatives. Aujourd'hui, les énergies renouvelables permettent de préparer et de développer l'énergétique de l'avenir.

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui utilisent des ressources naturelles considérées comme inépuisables : vent, soleil, marées, chutes d'eau, terre, végétaux... Ces énergies ne produisent pas de gaz à effet de serre, de rejets polluants, et n'engendrent pas ou peu de déchets. Ils n'utilisent pas les ressources fossiles de la planète, comme le gaz naturel ou le pétrole. L'énergie solaire thermique qui est l'une des solutions énergies renouvelables les plus facilement exploitables, a connu ces dernières années un grand essor de par la diversité de ses applications et l'intérêt qu'elle suscite à travers le monde. Cependant, le prix élevé de l'exploitation de l'énergie solaire thermique par rapport à celui des sources d'énergie fossiles représente un obstacle face à l'expansion tant attendue de l'utilisation de l'énergie solaire. L'optimisation des dispositifs solaires thermiques est parmi les solutions recommandées afin de renverser la tendance actuelle et voir l'utilisation de l'énergie solaire se répandre davantage dans le monde.

A présent, on s'intéresse à l'utilisation de l'énergie solaire qui est un immense gisement d'énergie naturelle gratuite. Les applications de l'énergie solaire sont très diversifiées. Quelle que soit l'application, le principe de captation de l'énergie solaire est toujours utilisé. Dans l'utilisation de l'énergie solaire, la faible densité de l'énergie et la fourniture instable de cette dernière est due aux variations des conditions atmosphériques. La plus grande part de recherche est consacrée au développement des capteurs solaires du point de vue rendement thermique en général, mais rares sont les études sur les capteurs solaires hybride PV/T, car ce dernier a des avantages de fournir la chaleur et d'électricité au même temps. Le rendement d'un capteur solaire hybride PV/T, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique et électrique dépend de sa forme, de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci.

Dans le cadre d'une étude des performances énergétiques d'un capteur solaire hybride PV/T soumis aux conditions climatiques de la région de Laghouat, une simulation numérique en régime transitoire est utilisée pour analyser et étudier la production énergétique d'un capteur solaire hybride PV/T. L'objectif principal de ce travail est de calculer la température d'air à la sortie du capteur solaire, la

Introduction Générale

variation de la température des cellules photovoltaïques et distribution de champ thermique dans la façade exposée directement au soleil.

Notre travail mené dans ce mémoire de fin d'étude a été enchaîné de la façon suivante :

Le premier chapitre est consisté à une présentation générale sur les capteurs solaire hybride PV/T ainsi que leurs critères de classification.

Le second chapitre est consacré une présentation détaillée sur le gisement solaire qui est nécessaire pour toutes études des systèmes solaires. Nous avons donné un aspect général par des généralités sur les lois concernant le mouvement de la terre et le calcul des grandeurs qui influencent le gisement solaire.

Dans le troisième chapitre, nous présentons un rappel sur les différents modes de transfert thermique. Nous nous sommes intéressés, dans cette partie de mémoire sur les bilans thermiques et énergétiques d'un capteur solaire thermique plan à air.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numérique et l'exposé des résultats obtenus.



**Chapitre I: Généralité sur les capteurs
solaires PV/T**

I.1 Introduction

Un capteur solaire est un appareil qui convertit l'énergie solaire en énergie. Cette énergie peut être délivrée sous forme d'énergie électrique, on parle de capteurs solaires photovoltaïques, ou de capteurs solaires thermiques. Les capteurs solaires se présentent sous la forme de panneaux plats d'environ 1 mètre carré, également appelés panneaux solaires. En 1839, Antoine Becquerel a découvert le phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque, ce principe a été introduit et exploité qu'un siècle plus tard [1].

I.2 Capteurs Solaire Photovoltaïque

C'est un appareil transformant l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Il compose des cellules solaires photovoltaïques. [2]

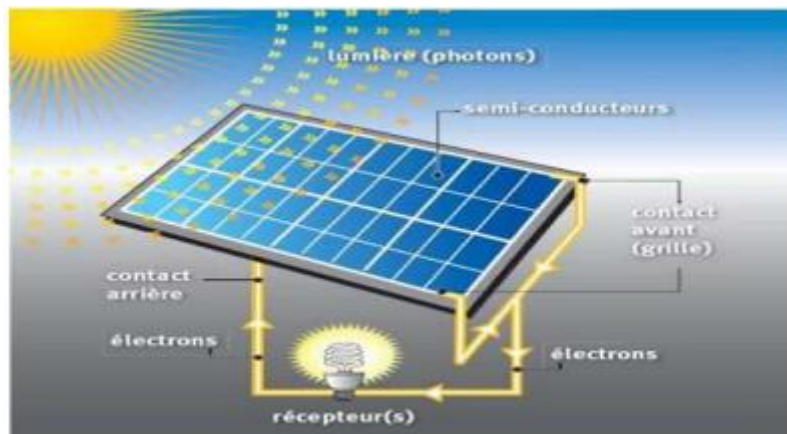


Figure I.1 : Panneaux photovoltaïque

I.2.1 Principe d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fém.) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

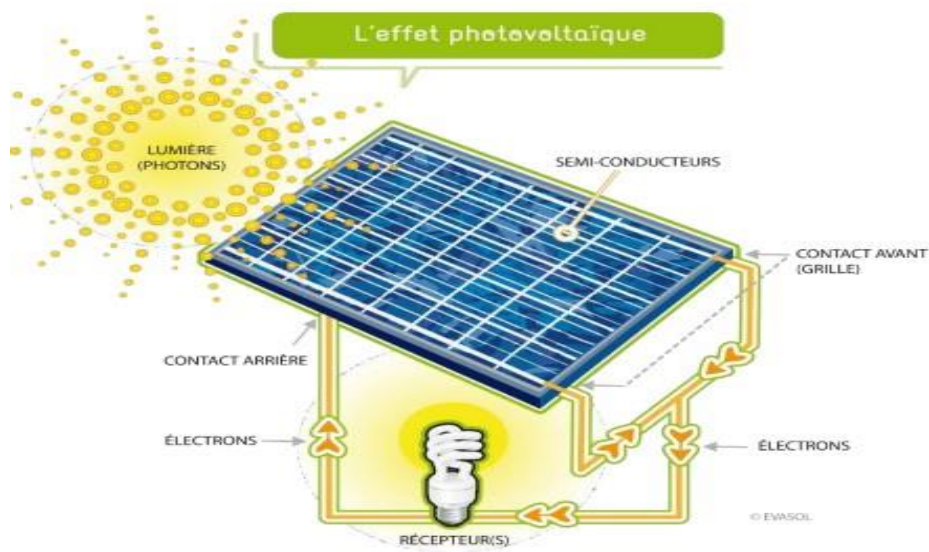


Figure I.2 : Principe photovoltaïque

I.3 Les différents types de technologies de cellules photovoltaïque

I.3.1 Silicium monocristallin

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.



Figure I.3 : Silicium monocristallin

I.3.2 Silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.

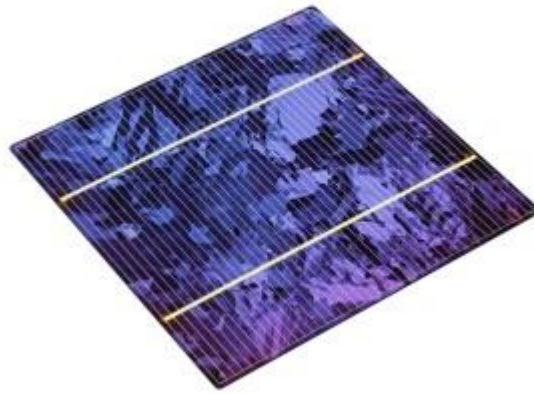


Figure I.4 : silicium poly-cristallin

I.3.3 Silicium amorphe

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces.



Figure I.5 : silicium amorphe

I.4 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances.

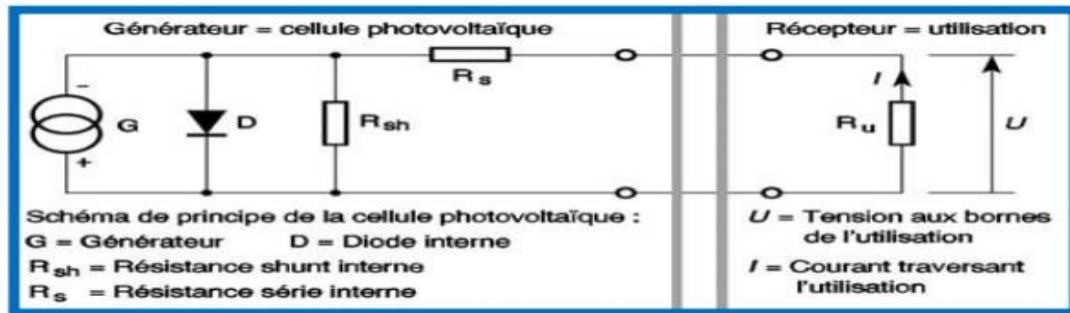


Figure I.6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

G_{est} une source de courant parfaite.

D_{est} une diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un sens.

R_{sh} est une résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une photopile (micro court-circuit dans le silicium en particulier).

R_s est une résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts).

R_u est l'impédance du récepteur qui impose le point de fonctionnement sur la photopile en fonction de sa caractéristique courant tension à l'éclairement considéré (dans le cas où le récepteur est assimilable à un résistor) [3].

I.5 Composante de système PV

Un system PV est un ensemble complet d'équipement permettant de transformer la lumière du soleil en électricité et l'utiliser pour alimenter des équipements tels que des lampes, des petits appareils...

En général les installations photovoltaïques comprennent cinq éléments essentiels et qui sont générateur, onduleur, régulateur, batterie, stockage.

(Voir la Figure (I. 7))



Figure I.7 : Composante de système PV

I.5.1 Générateurs

Les générateurs sont l'une des principales composantes d'un système photovoltaïque (PV). Ils sont responsables de la conversion de l'énergie solaire en électricité utilisable. Les générateurs solaires sont généralement composés de panneaux solaires, également appelés modules photovoltaïques. Ces panneaux sont constitués de cellules photovoltaïques qui captent la lumière du soleil et la transforment en courant continu (DC). Les générateurs peuvent être de différentes tailles et configurations, en fonction des besoins énergétiques spécifiques. Ils peuvent être installés sur des toits, des terrains ou des structures spéciales telles que des centrales solaires. Les panneaux solaires sont fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, qui ont la capacité de libérer des électrons lorsqu'ils sont exposés à la lumière solaire. Pour optimiser la production d'électricité, les générateurs solaires sont souvent équipés de dispositifs de suivi solaire, qui ajustent automatiquement l'orientation des panneaux pour maximiser l'exposition au soleil tout au long de la journée. En outre, les générateurs peuvent être connectés en série ou en parallèle pour former des chaînes ou des tableaux, afin d'augmenter la tension ou le courant produit.

C'est le champ photovoltaïque

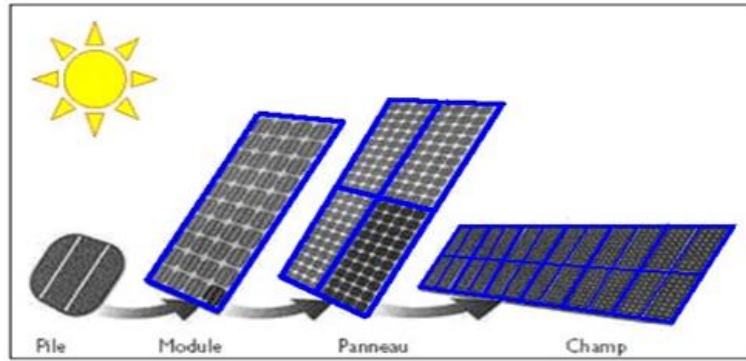


Figure I.8 : De la cellule au champ photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique.



Figure I.9 : Exemple d'un panneau solaire

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des systèmes PV dépend de

- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

I.5.2 Batteries

Les batteries Utilisé pour le stockage d'énergie

Les batteries solaires sont adaptées au cyclage quotidien et à la charge lente par panneaux

Solaires. Leur durée de vie est considérablement augmentée si la profondeur de décharge quotidienne est inférieure à 30% de la capacité totale pour les batteries plomb et jusqu'à 70% pour les batteries lithium.

Tableau I.1 : La différence entre les batteries PV

Type de batterie (decharge de 30% /temp. 25°C)	Nombre de Cycles Cycle = 1x (decharge + charge)	Duree de vie
Batterie AGM	1500 cycles (600 cycles à 50%)	≈ 4 ans
Batterie AGM Plomb-Carbone	1500 cycles (1000 cycles à 50)	≈ 4 ans
Batterie GEL	1800 cycles (750 cycles à 50%)	≈ 5 ans
Batterie GEL Plomb-Carbone	2500 cycles (1750 cycles à 50%)	≈ 7 ans
Batterie OPzV / OPzS	5000 cycles (3000 cycles à 50%)	≈ 13 ans
Batterie Lithium	6000 cycles (5000 cycles à 50%)	≈ 15 ans

I.5.3 Onduleur

Un onduleur est un appareil électrique permettant de transformer la tension / courant continué issue des modules photovoltaïques ou des batteries en tension/courant alternatif.il dit autonome s'il assure de lui-même sa Fréquence et sa forme d'onde

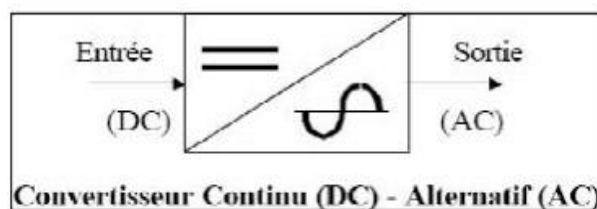


Figure I.10 : Symbole d'onduleur

Les principales caractéristiques des onduleurs sont

- Puissance nominale.
- Puissance de point ou surcharge.
- Consommation à vide où
- Tension d'entrée et de sortie.
- Rendement et la durée de vie.

I.5.4 Régulateur

Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome. Il se place entre les panneaux et les batteries. Son objectif est de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes pour lui assurer une meilleure durée de vie, pour que l'application autonome le soit pendant longtemps.



Figure I.11: Régulateur autonome

I.6 Avantage et inconvénients du système PV

Le système photovoltaïque (PV) présente plusieurs avantages et inconvénients. Parmi les avantages, on peut citer la production d'énergie propre et renouvelable. Les panneaux solaires convertissent la lumière du soleil en électricité, ce qui réduit la dépendance aux combustibles fossiles et contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. De plus, une fois installé, le système PV nécessite peu d'entretien et peut avoir une durée de vie de plusieurs décennies.

Cependant, il existe également des inconvénients associés aux systèmes PV. Tout d'abord, l'installation initiale peut être coûteuse, ce qui peut rendre l'accès à cette technologie difficile pour certaines personnes. De plus, la quantité d'énergie produite dépend de la disponibilité du soleil, ce qui signifie que la production peut fluctuer en fonction des conditions météorologiques et des saisons. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir un système de stockage d'énergie ou d'être connecté au réseau électrique pour garantir un approvisionnement continu en électricité.

En conclusion, le système PV présente de nombreux avantages en termes de production d'énergie propre et renouvelable, mais il peut également être coûteux à installer et sa production d'énergie peut être variable. Malgré ces inconvénients, les progrès technologiques continuent d'améliorer l'efficacité

et la rentabilité des systèmes photovoltaïques, ce qui en fait une option attrayante pour de nombreuses applications énergétiques [4].

Tableau I.2 : Des avantage et inconvénients

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Technologie sûre et sans risque. ➤ Énergie propre, non-polluante. ➤ Pas de combustion <p>Des systèmes fiables et stables.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le rendement des cellules PV reste assez faible. ➤ Le coût d'investissement est relativement élevé. ➤ Il n'y a aucune production d'électricité le soir et lanuit

I.7 Capteurs Solaire Thermique

Les capteurs solaires transforment le rayonnement solaire en chaleur grâce à un absorbeur (un corps noir caractérisé par des propriétés d'absorption très élevées et d'émissivité très basse). L'absorbeur transfère la chaleur à un fluide caloporteur (généralement de l'eau glycolée) circulant au travers de chacun des capteurs.

I.7.1 Principes de capteur solaire thermique

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur. Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son lieu d'utilisation ou de stockage. Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction.

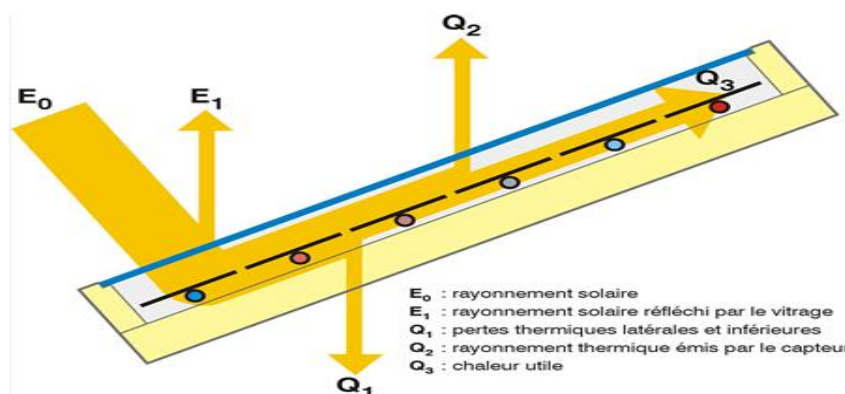


Figure I.12 : Processus dans un capteur solaire plan

I.7.2 Composants des capteurs solaires thermiques

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants

- 1- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- 2- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories), les fluides utilisés généralement comme fluide **caloporteur** **sont** l'eau et l'air.
- 3- Un stockage thermique.
- 4- Un réseau de distribution.

a) Le transfert de l'énergie

Le transfert de l'énergie d'un capteur solaire thermique vers le ballon de stockage s'effectue de deux façons différentes

- Soit par circulation avec une pompe commandée par un dispositif de régulation.
- Soit par circulation naturelle ou thermosiphon et qu'est basé sur le principe de la dilatation causée par une augmentation de la température. En effet l'augmentation de la température du fluide conduit à une diminution de la masse volumique. De ce fait un liquide chaud est plus léger qu'un liquide froid et aura donc la première force qui va mettre le liquide caloporteur en mouvement pour assurer le fonctionnement de chauffe eau solaire.

b) Le stockage

Afin d'assurer le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire, il est nécessaire de pouvoir stocker l'eau chaude dans un réservoir, ceci afin de pouvoir l'utiliser pendant la nuit ou pendant les journées sans soleil. Le ballon de stockage doit être calorifugé. Le calorifugeage devra être disposé de façon à permettre la manœuvre et le démontage pour l'entretien des appareils

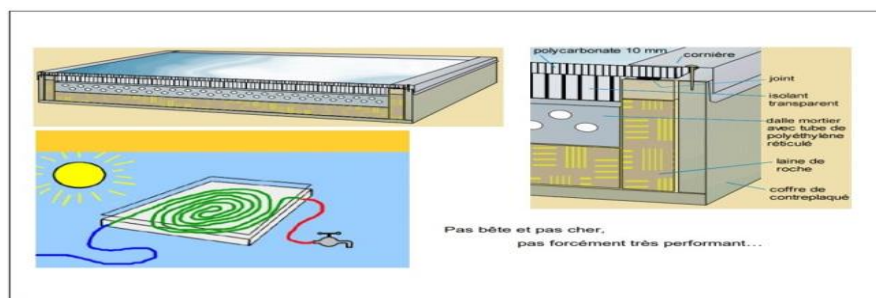


Figure I.13 : La capteur stockeur en béton

Le stockage de l'énergie captée permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire. L'accumulation de l'énergie dans le stockage se traduit par une élévation de sa température. Pour apprécier l'efficacité d'un système de stockage, il faut rappeler que le rendement d'un capteur dépend essentiellement de la température moyenne du fluide qui le traverse, donc de la température de fluide au retour du stockage.

I.8 Les différents modèles des capteurs solaires thermiques

Afin d'intercepter l'énergie provenant du rayonnement solaire, il existe plusieurs sortes de capteurs solaires.

I.8.1 Types des capteurs solaires plans

➤ Les capteurs plans sans vitrage

C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins performant. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur. Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse températures (inférieure à 30°C). Le domaine d'utilisation principal de ce type de capteurs est le chauffage des piscines extérieures. Parce qu'ils n'ont pas de vitrage, ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, parce qu'ils ne sont pas isolés sur leur face avant, la grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a notamment du vent et que la température extérieure n'est pas assez élevée, (fig.I.14). La typique intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surface plus grande, pour compenser la différence d'efficacité avec les capteurs plans vitrés, en particulier pendant l'hiver [5].



Figure I.14: Capteurs plans sans vitrage

➤ Les capteurs plans vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus. Ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air.

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel, ainsi que pour les piscines intérieures, (Fig.I.15).

Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage, pour le chauffage des locaux aussi l'air de ventilation.

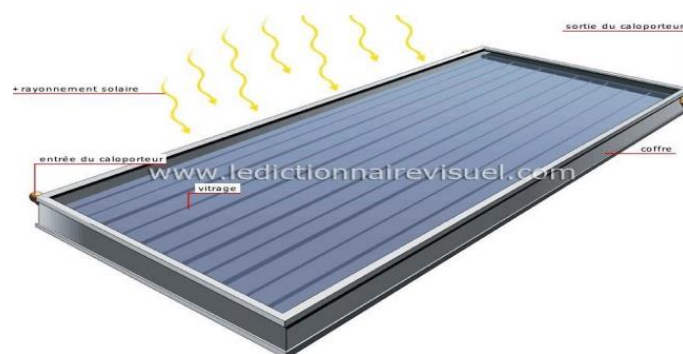


Figure I.15 : Capteur plans vitré

➤ Les capteurs sous vide

Les capteurs solaires "sous vide" (Fig.1.16). Sont composés d'une série de tubes en verre transparents. Dans chaque tube il y a une plaque absorbante pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour favoriser le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de la plaque absorbante et la plaque absorbante reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement à se dissiper sous forme de grande longueur d'onde. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection.



Figure I.16 : Capteur sous vide

I.9 Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré

Un capteur plan vitré est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur et d'une isolation thermique figure (I.17)

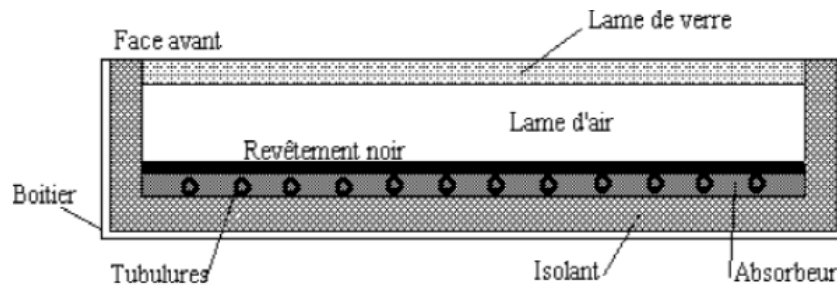


Figure I.17 : Coupe schématique d'un capteur plan vitré

I.9.1 La couverture transparente

Du fait de sa résistance aux agressions mécaniques (chocs, grêle, neige, ...etc.) et aux agressions thermiques (brusque refroidissement, ...etc.), le verre sécurisé est spécialement utilisé comme couverture transparente. Afin d'être le plus possiblement transparent et transmettant du rayonnement solaire, il est de préférence que le vitrage soit pauvre en oxyde de fer.

Pour les capteurs intégrés en toiture, des matériaux synthétiques sont parfois utilisés.

Ils sont plus légers, moins chers et plus facile à mettre en place, mais leurs durées de vie sont moins que celle du verre ordinaire

Plus souvent, le vitrage est légèrement structuré, ainsi, il répand la fraction réfléchiée du rayonnement solaire incident, pour diminuer un éventuel éblouissement.

Les principales caractéristiques d'un vitrage sont :

- ✓ Son coefficient de transmission (τ)
- ✓ Son coefficient d'émission (ε)

Le coefficient de transmission (τ) est essentiellement déterminé par la structure du vitrage (double ou triple, l'épaisseur des vitres, des espaces et la nature du gaz de remplissage entre l'absorbeur et le vitrage).

Le tableau (I.3) récapitule les divers types de verre utilisés.

Tableau I.3 : Caractéristiques optiques de quelques verres

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre clair	8%	9%	83%
Verre basse teneur en Fe ₂ O ₃	8%	2%	90%

La particularité d'un bon vitrage est sa faible absorption du rayonnement solaire d'où sa transmission maximale d'énergie vers l'absorbeur. Actuellement le verre le plus souvent adopté pour le capteur plan est le **verre prisme**. Sa spécificité est sa faible réflexion du rayonnement (1.5%). Il peut transmettre jusqu'à 96% du rayonnement.

I.9.2 L'absorbeur

Le rôle principal d'un absorbeur est le captage du rayonnement solaire et sa conversion en énergie calorifique. Il est généralement peint en noir pour absorber tous les rayonnements dans le spectre du visible, du l'ultraviolet et une faible quantité dans l'infrarouge.

L'absorbeur est choisi selon les caractéristiques suivantes :

- ✓ Un bon coefficient d'absorption.
- ✓ Une bonne conductivité thermique.
- ✓ Une bonne résistance à la corrosion.

Le choix du matériau et le procédé de construction ont une grande influence sur la qualité d'un capteur. Du fait de leurs conductivités élevées, le cuivre, l'acier et l'aluminium sont les matériaux les plus couramment utilisés. Les caractéristiques de divers matériaux utilisés comme absorbeur sont données au tableau (I-4).

Tableau I.4 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur

Matière	Conductibilité (w/m °C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

Afin de diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont généralement revêtus d'une couche sélective. Le nickel et le chrome sont les principaux métaux utilisés pour les revêtements sélectifs pour la plupart des capteurs.

Au tableau (I-5) sont donnés les modes de revêtement les plus souvent utilisés.

Tableau I.5 : Revêtements des surfaces d'absorbeur

Revêtement	Absorption	Emission
Peinture noire	0,92-0,97	0,95
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Tinox (sélectif)	0,95	0,05

I.9.3 Le fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur stockée par la plaque absorbante on utilise généralement comme fluide caloporteur soit de l'air, soit de l'eau.

Par rapport à l'eau, l'air présente les avantages suivants :

- ✓ Il ne présente pas de problèmes de gel pendant l'hiver ou d'ébullition pendant l'été,
- ✓ L'air sec ne présente pas de problèmes de corrosion,
- ✓ Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur dans le cas du chauffage de locaux,
- ✓ Le système à mettre en place est plus simple et plus fiable,

L'utilisation de l'air par rapport à l'eau entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux,
- Les conduites doivent avoir une grande section pour laisser passer un débit suffisant,
- Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau. Dans le cas de tuyauteries soudées sur la face arrière de la plaque absorbante, il faut prendre soin aux soudures afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact

Dans le cas de tuyauteries soudées sur la face arrière de la plaque absorbante, il faut prendre soin aux soudures afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact

I.9.4 L'isolant

Un capteur doit être bien isolé thermiquement, et cela avec des matériaux appropriés. Ces derniers doivent avoir une faible conductivité thermique, afin de minimiser les pertes thermiques par conduction à travers les faces du capteur. Généralement, l'épaisseur de l'isolant est de l'ordre de 5 à 10 cm. Les laines minérales, les matières synthétiques (de laine de verre, mousses expansives de polyuréthane ou polystyrène) sont généralement les matières isolantes utilisées. Elles doivent résister aux hautes températures qui peuvent être atteintes à l'intérieur d'un capteur. Pour un choix optimal d'un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés :

- ✓ Masse volumique
- ✓ Température maximale d'utilisation
- ✓ Résistance aux feux, aux rongeurs et à la putréfaction
- ✓ Sensibilité à l'humidité
- ✓ Son coût

Le tableau (I.6) regroupe les propriétés

Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau (I.6)

Tableau I.6 : Quelques propriétés des isolants

Isolant	Conductivité thermique à 500w/m°C max	Température max
Laine de verre	0,041	150
Laine de roche	0,05	150
Polyuréthane	0,027	110
Polystyrène	0,039	85
Liège expansé	0,042	110

I.10 Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré

Une partie du rayonnement solaire qui arrive sur la vitre la traverse pour atteindre la plaque absorbante. Cette dernière s'échauffe et transfère la chaleur au fluide caloporteur qui circule dans les

tubes. Comme tout corps qui s'échauffe, l'absorbeur émet un rayonnement (essentiellement dans l'infrarouge) qui est réfléchi par la vitre, c'est le principe de « l'effet de serre ». L'isolant a pour fonction de minimiser les déperditions thermiques avec l'extérieur. En effet, la grande partie de l'énergie absorbée doit être transmise au fluide, il faut donc minimiser les pertes avec l'environnement proche.

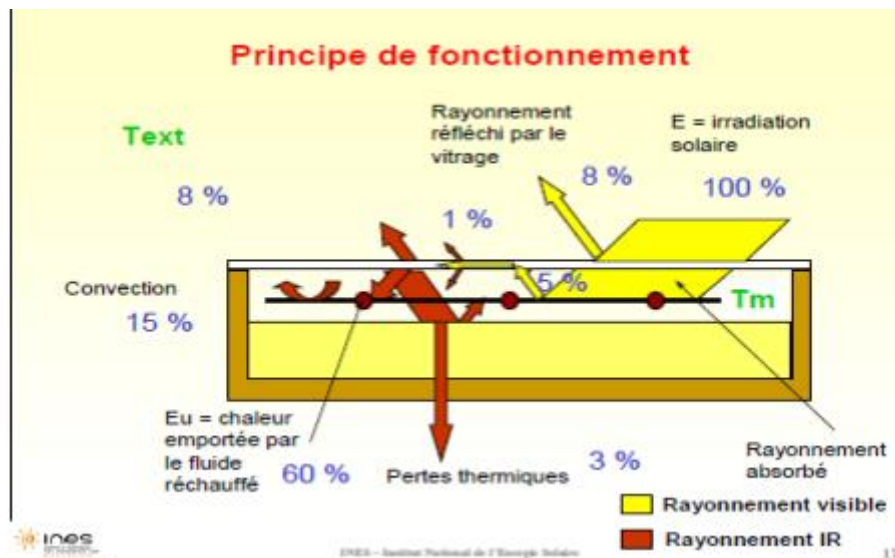


Figure I.18 : Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré

I.12 Inclinaison optimale d'un capteur

Pour permettre à un capteur un captage maximal du rayonnement solaire, il doit être incliné d'un angle particulier qu'on appelle l'inclinaison optimale. Ce qui revient à une position perpendiculaire par rapport aux rayonnements solaires.

En tenant compte des déplacements permanents de la terre et du soleil, pour chaque moment correspond une inclinaison optimale, ainsi la meilleure solution est d'équiper le capteur avec un système de poursuite. Cependant, cette solution peut être coûteuse.

L'inclinaison de la plupart des capteurs plans est généralement fixe et son optimum serait de $L+\delta/2$ en hiver et de $L-\delta/2$ en été et cela afin d'avoir le plus faible angle entre l'incidence du flux solaire et la normale du capteur [6].

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude approfondie sur l'élément le plus important de l'exploitation de l'énergie solaire (thermique et électrique) qui est le capteur solaire hybride PV/T. Cette partie est divisée essentiellement en deux, au début on a parlé du principe de fonctionnement d'un capteur solaire photovoltaïque où nous avons mis un rappel sur les différentes technologies utilisées dans un capteur solaire photovoltaïque. Suivi par une description détaillée sur les capteurs solaires thermique ; leur principe de fonctionnement, leur classification, type et Différents composants qui le constitue. Les différentes techniques d'amélioration appliquées à ce système ont été également présentées et discutées dans ce chapitre [7].



Chapitre II : Gisement solaire

II.1 Introduction

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux ont autant de ressources naturelles capables de produire de l'énergie grâce aux technologies développées par l'homme, leur faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Il existe divers types d'énergies renouvelables qui sont des sources d'énergie inépuisables comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas produire d'émissions polluantes, et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord mettre le point sur quelques notions astronomiques sur le rayonnement solaire (soleil, nature, intensité...etc.), les différents phénomènes physiques de ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et ces effets sur le rayonnement solaire. Ainsi, les différentes composantes du rayonnement solaire.

II.2 Source de l'énergie solaire

La principale source d'énergie est le soleil, c'est une étoile du système solaire la plus proche de la terre qui est situé à une distance d'environ 150 millions de kilomètres de la terre, le soleil libère d'énormes quantités d'énergies qui, après avoir parcouru cette distance atteignent la surface de la terre, il produit un rayonnement qui peut être assimilé, en première approximation, à celui d'un corps noir à 5800°k. Ce rayonnement émis par le soleil sous forme d'ondes électromagnétiques, et reste environ 8 minutes à nous atteindre. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, Les 98% de l'énergie émise se situent dans la bande de longueur d'onde comprise entre 0.25 et 3 μm .

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie appelé éclairage énergétique, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques. La figure I.1 illustre la distribution spectrale du rayonnement solaire [8].

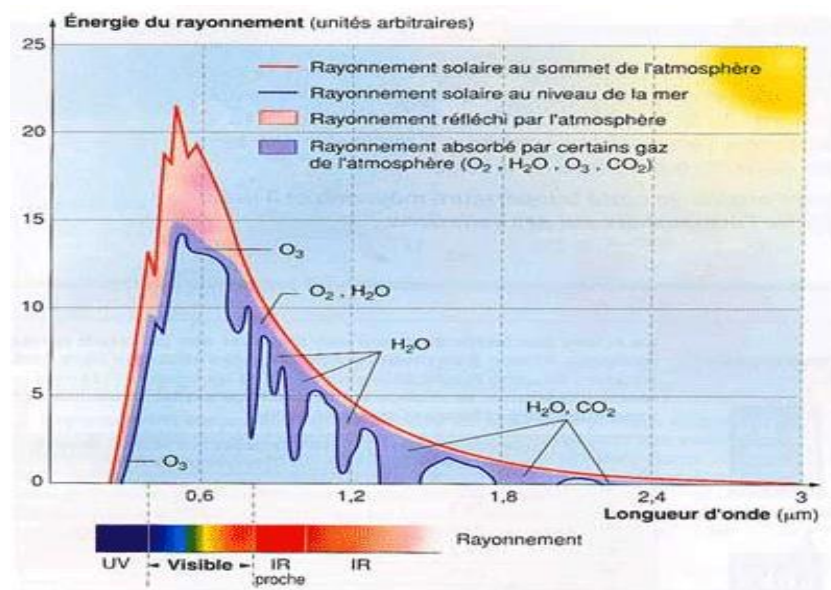


Figure II.1: Spectre du rayonnement solaire

II.3 Aspects géométriques

Nous allons nous intéresser dans ce qui suit aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la Terre et orienté dans une direction fixée. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire [9].

II.3.1 Mouvements de la Terre autour du Soleil

La Terre fait un tour autour du Soleil en un an, dans un plan appelé « écliptique ». La Terre tourne 365.25 jours sur elle-même pendant qu'elle fait, dans le même sens, un tour autour du Soleil (Figure I.2). Pendant cette révolution annuelle, l'axe de rotation de la Terre reste parallèle à lui-même, mais est incliné de 23.5° par rapport à la normale au plan de l'écliptique.

Le mouvement de la Terre autour du Soleil s'effectue à une vitesse orbitale d'environ 30 km/s, entraînant à chaque année un parcours d'environ un milliard de kilomètres. Du point de vue du pôle Nord de la Terre, cette dernière parcourt son orbite dans le sens antihoraire. Cette direction correspond, à midi, à l'ouest d'un observateur situé sur l'équateur terrestre.

Au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est le plus près du soleil : 147 millions de Km et au solstice d'été qu'elle en est le plus éloigné : 153 millions de Km, la distance moyenne étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps

(21 Février) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) à une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle avec la normale du plan de l'écliptique.

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'écliptique céleste. On appelle déclinaison δ l'angle formé par l'axe Terre -Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de $+23^{\circ} 27'$ solstice d'été (21 juin), à $-23^{\circ} 27'$ solstice d'hiver [8].

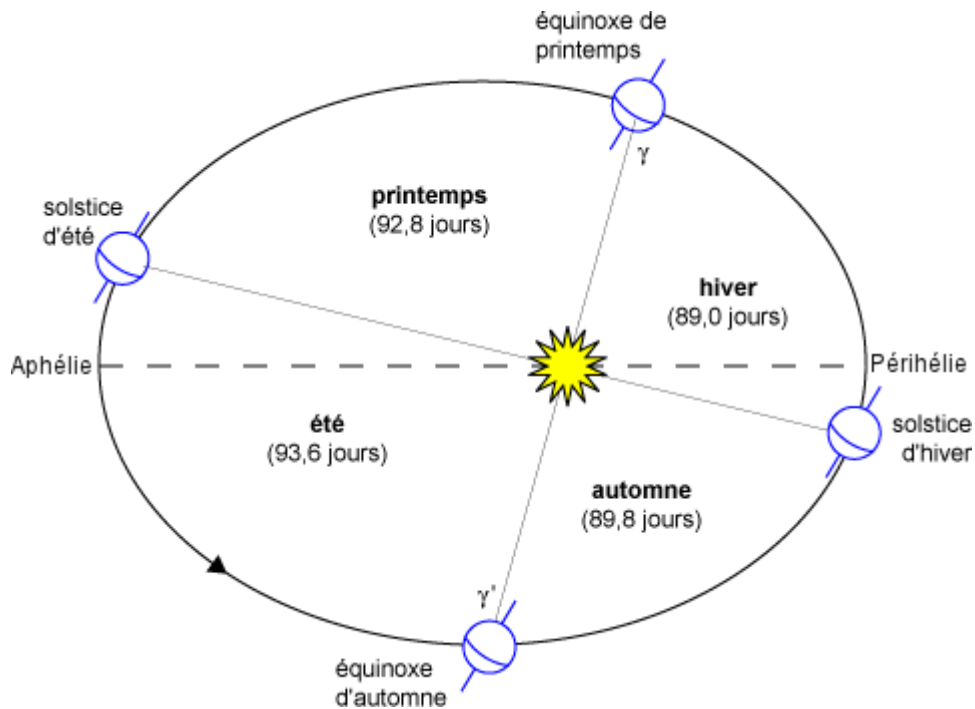


Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du soleil

II.3.2 Mouvement apparent du soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure (I.3).

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L - d)$. La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

Un jour a été divisé en 24h et l'heure solaire TS a été définie en fixant $TS=12$ h lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »). La hauteur h du Soleil peut alors se déduire de la relation :

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (\text{II.1})$$

Et l'azimut a par la relation :

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

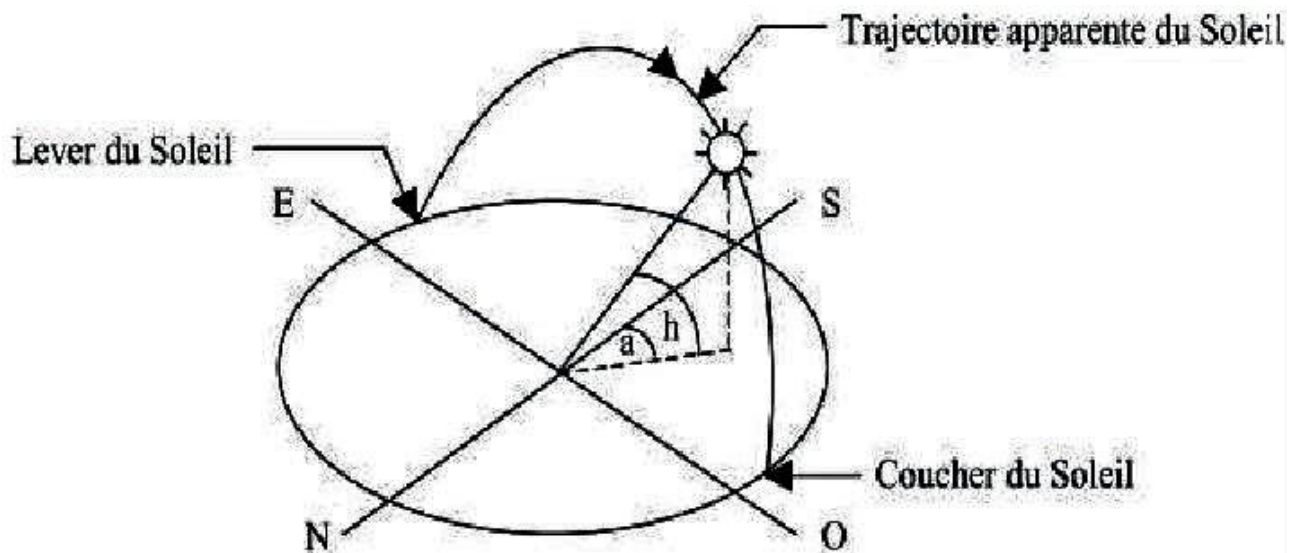


Figure II.3 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L

II.4 Aspects énergétiques

II.4.1 L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, qui sont :

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

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- CO₂ (0,03%)
- Vapeur d'eau : en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans

l'atmosphère

- Ozone O_3 située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols : grains de sable, poussières, fumées...

La répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec l'indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde

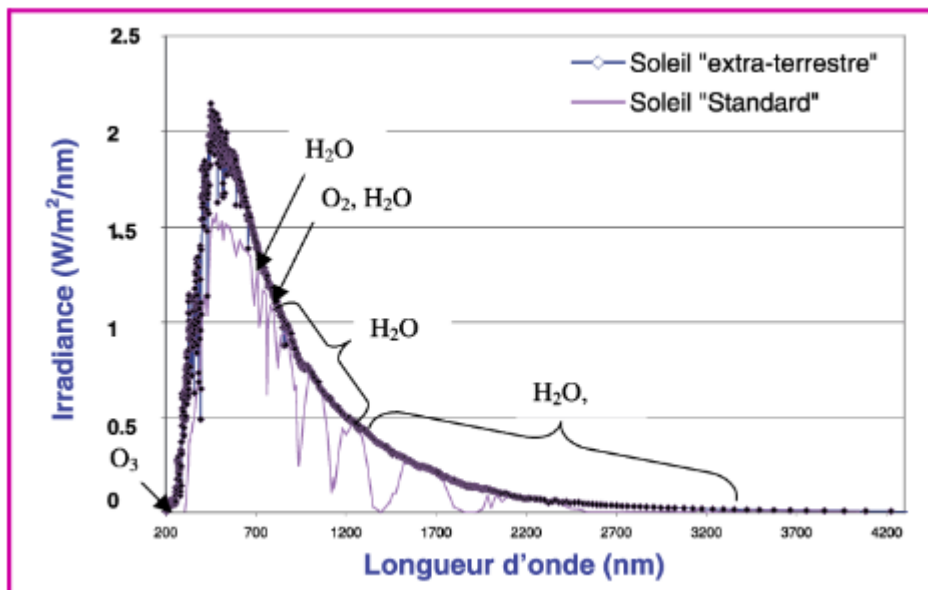


Figure II.4 : Répartition spectrale du rayonnement solaire du sol terrestre

II.4.1.1 Rayonnement du ciel et de l'atmosphère

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO_2 , O_3 , H_2O) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers $14,7 \mu m$ pour le CO_2 .
- Entre 5 et $7 \mu m$ et entre 14 et $20 \mu m$ pour la vapeur d'eau.
- Vers $9,6 \mu m$ pour O_3 .

Ainsi et comme le montre la figure I.7, il s'agit d'un rayonnement émis dans les grandes longueurs d'onde ($>3 \mu m$) contrairement au rayonnement solaire émis dans des longueurs d'ondes inférieures à $3 \mu m$ [11].

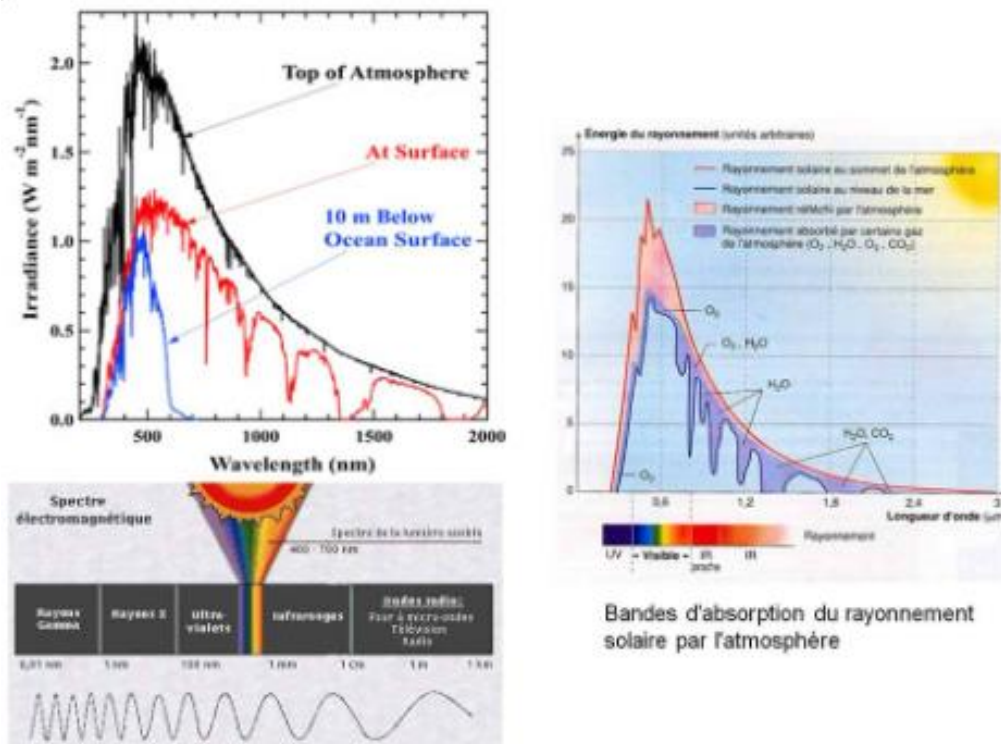


Figure II.5 : Spectre du rayonnement atmosphérique

II.4.2 Masse d'air

Par convention une masse d'air unité correspond au trajet d'un rayon solaire selon la verticale du lieu. Elle est définie par :

$$m = 1/\sin(h) \tag{II.3}$$

Si : $h \leq 10^\circ$

$$m = \left(\frac{1}{\sin(h)}\right) + 0.15(3,885 + h)^{-1,253} \tag{II.4}$$

II.4.3 Direction des rayons solaires

On considère un plan quelconque caractérisé par deux angles :

α : L'angle entre le méridien local et la normale au plan.

$\alpha = 0$, Le plan est orienté vers le Sud ;

$\alpha = \pi$, Le plan est orienté vers le Nord ;

$\alpha = -\pi/2$, Le plan est orienté vers l'Est ;

$\alpha = \pi/2$, Le plan est orienté vers l'Ouest ;

γ , L'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\gamma = 0,1$ Le plan est horizontal.

$\gamma = \pi/2$, Le plan est vertical

Soit :

\vec{N} : Le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires ;

\vec{n} : Le vecteur unitaire porté par la normale à la surface ;

i : L'angle d'incidence (\vec{n}, \vec{N}) (figure II.6)

$$\vec{N} \times \vec{n} = \|\vec{N}\| \times \|\vec{n}\| \cos(i) = \cos(i) \quad (\text{II.5})$$

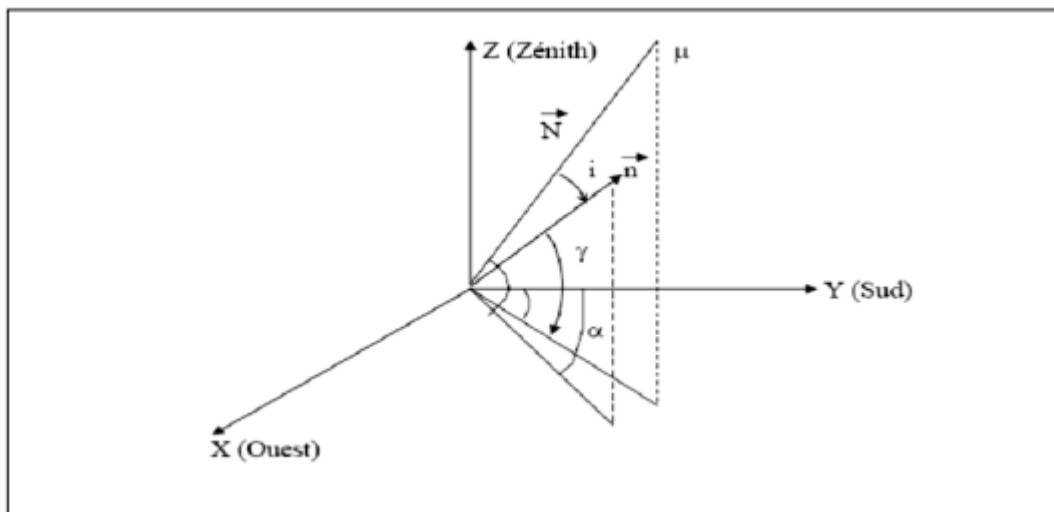


Figure II.6 : Représentation des vecteurs unitaires

Donc :

$$\cos(i) = \cos(h)\cos(\gamma)\cos(a - \alpha) + \sin(h)\sin(\gamma) \quad (\text{II.6})$$

Formule de $\cos(i)$ en coordonnées horaires :

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \cos(\delta)\sin(\omega)\cos(\gamma) + \sin(\varphi)\cos(\omega)\cos(\delta) - \cos(\varphi)\sin(\delta)\cos(\alpha)\cos(\gamma) + \\ & \cos(\varphi)\cos(\omega)\cos(\delta) + \sin(\varphi)\sin(\delta)\sin(\gamma) \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Formule de $\cos(i)$ en coordonnées horaires : $\gamma = \pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\varphi)\cos(\omega)\cos(\delta) + \sin(\varphi)\sin(\delta) \quad (\text{II.8})$$

➤ Surface verticale : $\gamma = 0$

❖ Surface verticale orientée vers le Sud : $\alpha = 0$

$$\cos(i) = \sin(\varphi)\cos(\omega)\cos(\delta) - \sin(\varphi)\sin(\delta) \quad (\text{II.9})$$

➤ Surface verticale orientée vers le Nord : $\alpha = \pi$

$$\cos(i) = \cos(\varphi)\sin(\delta) - \sin(\varphi)\cos(\omega)\cos(\delta) \quad (\text{II.10})$$

❖ Surface verticale orientée vers l'Est : $\alpha = -\pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\delta)\sin(\omega)$$

❖ Surface orientée vers le Sud et inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontale [9]

:

$$\cos(i) = \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\varphi - \beta) + \sin(\delta)\sin(\varphi - \beta) \quad (\text{II.11})$$

II.5 Les coordonnées célestes

✓ Les coordonnées géographiques

❖ **La longitude L**, est comptée positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest, à partir du méridien Greenwich.

❖ **La latitude Φ** , permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère Nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère Sud.

✓ Les coordonnées horaires

- ❖ **La déclinaison δ** , c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours.

Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{284+N}{365}\right] \times 360 \quad (\text{II.12})$$

N : le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1 Janvier.

- ❖ **L'angle horaire ω** : il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° .

✓ Les coordonnées horizontales

L'azimut a_s , ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.

La hauteur h , ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir.

On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle h : $z + h = 90^{\circ}$

L'équation de passage des coordonnées horizontales en coordonnées horaires est la suivante :

$$\sin(as)\cos(h) = \cos(\delta)\sin(\omega) \quad (\text{II.13})$$

$$\cos(as)\cos(h) = \cos(\delta)\cos(\omega)\sin(\Phi) - \cos(\Phi)\sin(\delta) \quad (\text{II.14})$$

$$\sin(h) = \cos(\Phi)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\Phi)\sin(\delta) \quad (\text{II.15})$$

II.6 Les temps solaires

✓ **Le temps solaire vrai (T.S.V)**

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil ω .

Il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (\text{II.16})$$

ω en degré

Si $\omega = 0,1$ $TSV = 12h.00$

Si $\omega < 0,1$ a matinée.

Si $\omega > 0,1$ l'après – midi

$$ET = TSV - TSM \quad (\text{II.17})$$

ET, l'équation du temps, qui corrige le TSV par rapport au TSM

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') [\text{min}] \quad (\text{II.18})$$

$$N' = (N - 81) \times 360/365 \quad (\text{II.19})$$

Où: N est le numéro du jour dans l'année.

✓ Letempsuniversel(TU)

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

$$TU = TSM - L/15 \quad (\text{II.20})$$

Où:L: est la longitude.

$L > 0$, pour les villes situées à l'Est de Greenwich

$L < 0$, pour les villes situées à l'Ouest de

Greenwich $TU = TSM$, pour le méridien

de Greenwich

✓ Letempslégal(TL)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par:

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{II.21})$$

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie [10].

II.6.1 Heures et temps

✓ La durée du jour :

Le module ω_1 de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant, $\sin(h) = 0$ ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_1) = -\tan(L)\tan(\delta) \quad (\text{II.22})$$

L'heure solaire au lever du Soleil a donc pour valeur :

$$(\text{TSV})_1 = 12 - \frac{\omega_1}{15} \quad (\text{II.23})$$

L'angle horaire ω_c au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc

$\omega_1 = -\omega_c$ et la durée du jour vaut :

$$D = 2 \cdot \frac{\omega_1}{15} \quad (\text{II.24})$$

✓ Relation entre temps légal et temps solaire

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré.

Cette différence est liée à :

La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du fuseau horaire dans lequel il se trouve soit :

$$C = TL - TCF \quad (\text{II.25})$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire du méridien de Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire que l'on trouvera sur la figure (II.7).

La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté ET :

$$\text{ET} = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad (\text{II.26})$$

$$N' = (N - 81) \times \left(\frac{360}{365}\right) \quad (\text{II.27})$$

Où : N est le numéro du jour dans l'année ET Équation du temps (terme correctif) en mn



Figure II.7 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

La différence de longitude ($\lambda - \lambda_{ref}$) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau). Le temps solaire TS se calcule finalement par la formule :

$$TS = TL - C + ET + \frac{\lambda_{ref} - 1}{15} \quad (\text{II.28})$$

Le problème est souvent de déterminer la différence C entre TL et TCF en un lieu donné. On peut procéder de la manière suivante :

- Il est possible de connaître TL et TU (écouter une radio internationale) d'où (TL-TU).
- La différence (TCF-TU) peut être lue sur la figure I.5.
- On en déduit

II.7 Les paramètres externes d'une installation

- L'efficacité d'un CES dépend des caractéristiques intrinsèques (optiques et thermiques) :

- La puissance du rayonnement solaire.
- L'angle d'incidence du rayonnement solaire.
- L'intensité du rayonnement solaire sur une paroi.
- L'orientation du capteur.
- L'emplacement.

II.7.1 La puissance du rayonnement solaire

La ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire et particulièrement à l'échelle nationale. L'Algérie possédant un gisement solaire important, de par son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ $1\text{KW}/\text{m}^2$.

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les $6\text{KW}/\text{m}^2$ et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de $2500\text{KW}/\text{m}^2$.

La constante solaire de $1370\text{Watts}/\text{m}^2$ est l'énergie atteignant une surface normale aux rayons solaires dans les couches supérieures de l'atmosphère. L'effet de la traversée de l'atmosphère qui réfléchit, absorbe ou diffuse des parties de ce rayonnement solaire réduit considérablement cette valeur.

La réduction est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante ; elle est donc une fonction directe de la hauteur du soleil. En été, la densité de flux atteignant une surface peut valoir dans les meilleures conditions de 900 à $1000\text{W}/\text{m}^2$.

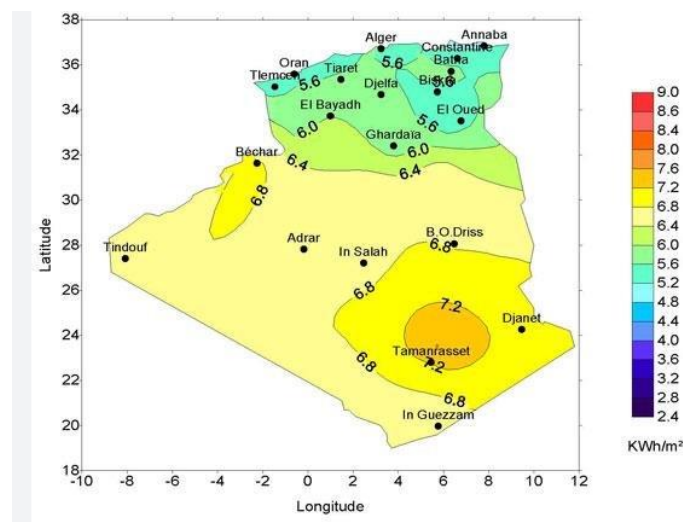


Figure II.8 : Rayonnement solaire global quotidien moyen en kWh/m² pendant l'année

II.7.2 L'angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence, c'est l'angle formé par les rayons du soleil et le plan du panneau. L'angle que font les rayons du Soleil avec une surface, détermine la densité énergétique que reçoit cette surface. Puisque le rayonnement solaire arrive sur la Terre sous forme d'un faisceau parallèle, une surface perpendiculaire à ces rayons intercepte la densité maximale d'énergie. Et si l'on incline la surface à partir de cette position perpendiculaire, son éclairement diminue. Comme on pouvait s'en douter, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement au panneau. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales, (figure. II.9).

$$\cos(i) = \cos(\beta - \gamma) \cdot \cos(h) + \sin(\gamma) \cdot \sin(h) \quad (\text{II.29})$$

γ : Orientation de plan.

β : Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal

α : L'azimut solaire.

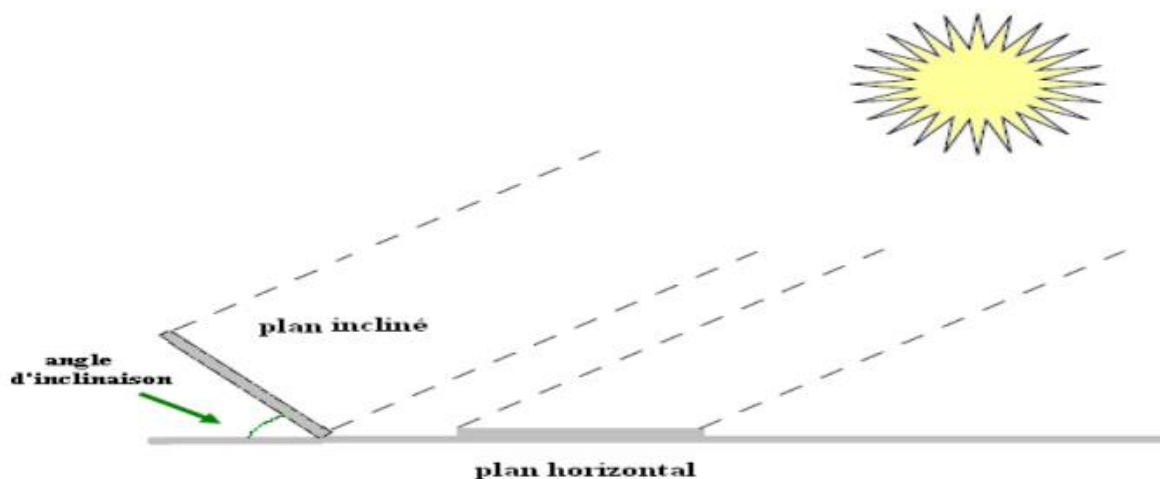


Figure II.9 : Mesure de rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque

En général, en hiver dans l'hémisphère nord, le soleil est bas par rapport à l'horizon ; à ce moment-là, pour obtenir le meilleur rendement, il faudra privilégier un grand angle à 60°. Au printemps, le meilleur angle est à 45° environ et en été l'angle optimal est à 20° [9].



Figure II.10 : Inclinaison de 90° par rapport aux rayons du soleil (au centre) = production

II.8 Rayonnement solaire reçu au niveau du sol

L'atmosphère terrestre perturbe grandement et par des processus variés le flux de photons issu du soleil, donc après sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme la somme de deux composantes :

- **Le rayonnement global** : Le rayonnement global est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La figure 8 illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.

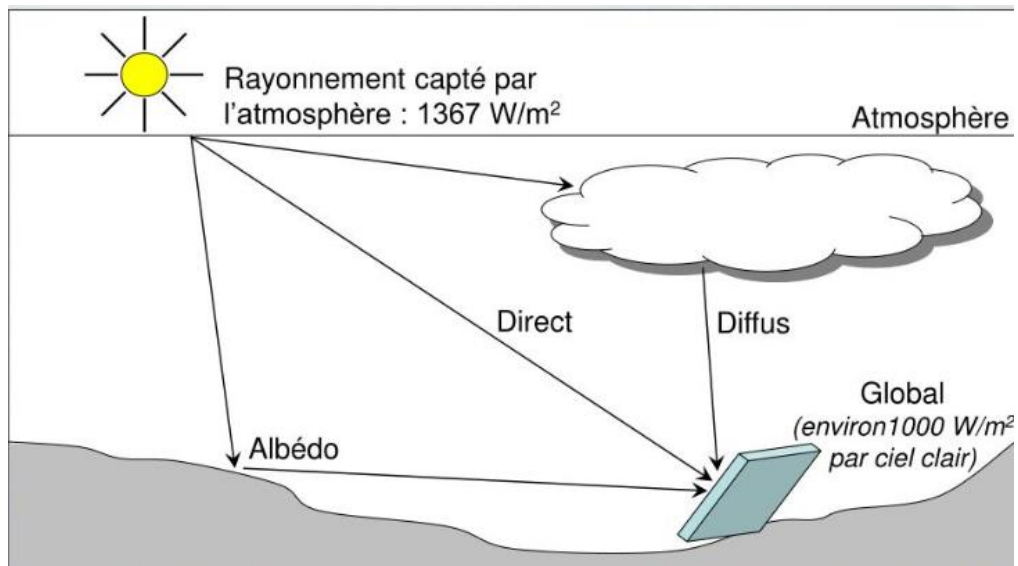


Figure II.11 : Composantes du rayonnement solaires

II.9 Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous avons abordé les concepts de base du gisement solaire, les coordonnées terrestres, le mouvement du soleil, et les différentes composantes du rayonnement solaire, entre autres, Dans ce chapitre, nous décrivons des notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres, le mouvement du soleil, différentes composantes du rayonnement solaire et autres d'abord le mouvement de la Terre et du Soleil à chaque instant de la journée et de l'année. L'étude de ce mouvement est nécessaire pour déterminer l'orientation du capteur solaire pour un emplacement spécifique, puis nous avons brièvement introduit l'atténuation du rayonnement solaire et paramètres de base pour estimer les énergies captées par des capteurs solaires hybride PV/T, le rayonnement reçu par le capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement à l'endroit respectif et de son orientation par rapport au soleil.



**Chapitre III : Bilans thermiques d'un
capteur solaire PV/T**

III.1 Introduction

Le but de cette étude est la détermination des températures des composants d'un capteur solaire hybride PV/T, en particulier la température des cellules photovoltaïques et la température sortie d'air. Ensuite, les performances à savoir la puissance utile récupérée par l'air et l'efficacité ou le rendement instantané du système puis de déterminer l'effet des paramètres (matériau de l'absorbeur, taille de l'absorbeur, les saisons, le débit d'air, etc.) Sur les performances du système énergétique. Les cellules photovoltaïques est l'absorbeur sont les principaux composants dans le capteur solaire hybride PV/T qui a pour fonction de recueillir le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur. Les applications de mise en forme et l'amélioration des qualités de ce composant, nécessitent la prédiction des pertes thermiques au sein des composants d'un capteur solaire hybride PV/T, la détermination des pertes nécessite à son tour une analyse des bilans thermiques de ces composants. Ces bilans tiennent compte des différents échanges thermiques existants [11].

III.2 Généralités sur les transferts de chaleur

La thermodynamique nous apprend que l'énergie peut être transférée à partir d'interactions entre le système et son environnement, sous forme de chaleur et de travail. Cependant, la thermodynamique ne se préoccupe que de l'état initial et de l'état final du système à l'équilibre, et ne fournit aucune information sur la nature des interactions mises en jeu et sur l'évolution temporelle du système entre les deux états d'équilibre.

Un transfert de chaleur au sein d'un système ne se produit que s'il existe des gradients de température entre les différentes parties du système, ce qui implique que celui-ci n'est alors pas l'équilibre thermodynamique (la température n'est pas uniforme dans tout le système). Autours de la transformation du système vers un état d'équilibre final, la température va évoluer la fois en temps et en espace. Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps [12].

III.3 Théories de transfert de chaleur

L'existence d'un écart de température entre deux systèmes, quel que soit le milieu qui les partage même le vide, fait intervenir un échange d'énergie connu couramment sous le nom de « transfert de chaleur » Les systèmes solaires mettent en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, la convection, le rayonnement et la conduction.

A. Transfert de chaleur par conduction

C'est le transfert de chaleur dans un milieu solide, sans déplacement significatif de matière, sous l'influence d'une différence de température :

En tout point d'un milieu s'applique une équation dite « équation de chaleur » qui traduit le mécanisme local du transfert, elle lie les grandeurs suivantes : la température T , le temps t et les variables d'espace (x,y,z) .

L'équation de la chaleur est donnée sous une forme unidimensionnelle par :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.1})$$

Où « a » est la diffusivité thermique du matériau.

La théorie de la conduction se base sur l'hypothèse de FOURIER ; liant linéairement la densité du flux thermique et le gradient de température :

En tout point d'un milieu isotrope, la densité du flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu et au gradient de température.

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{III.2})$$

La forme algébrique de cette équation est la suivante :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{III.3})$$

Avec : φ (w) Le flux de chaleur transmis par conduction et S (m²) Aire de la section de passage du flux de chaleur.

B. Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection s'effectue dans les milieux fluides, plus précisément dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement.

Suivant la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

- La convection naturelle (libre) : ou le mouvement du fluide est dû à l'action simultanée des différences des températures qui existe dans le milieu et d'un champ
- La convection forcée : ou le mouvement du fluide est induit par un moyen mécanique (Pompes, ventilateur, etc...)

Régime d'écoulement

- En régime laminaire, l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes entre deux filets de fluides adjacents, figure III.1

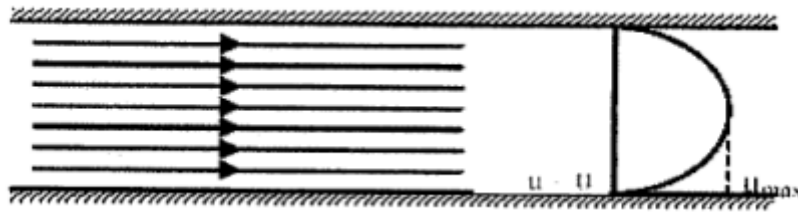


Figure III.1 : écoulement d'un fluide en régime laminaire

- En régime turbulent, l'écoulement n'est pas unidirectionnel : L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la chaleur transférée par conduction est généralement négligeable par rapport à celle transférée par convection.

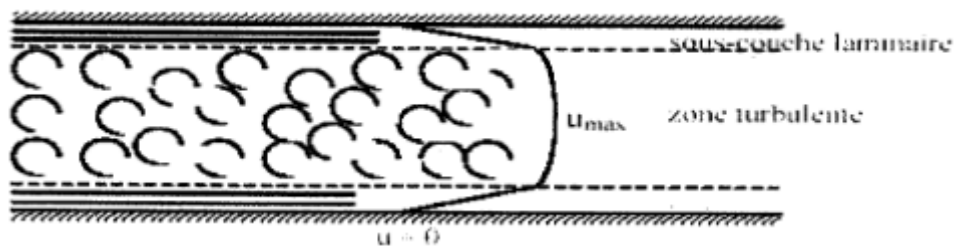


Figure III.2 : écoulement d'un fluide en régime turbulent

Expression du flux de chaleur

Pour un écoulement de surface S ayant une température T le flux de chaleur s'écrit :

$$\varphi = hS(T - T_f) \quad (\text{III.4})$$

Où h est appelé coefficient d'échange par convection. ($\text{W/m}^2 \text{C}^\circ$)

$T - T_f$: Différence de température entre la paroi et du fluide.

- **En convection naturelle**

Dans le cas de la convection naturelle le flux est une fonction des caractéristiques du fluide ; de la longueur de la paroi et l'écart de la température.

En introduisant l'analyse adimensionnelle on déduit une relation entre trois nombres :

$$N_u = c(G_r P_r)^m \quad (\text{III.5})$$

Où

$$N_u = \frac{hD}{\lambda} \quad \text{Nombre de Nusselt}$$

$$G_r = \frac{\beta g \Delta T p^2 L^3}{\mu^2} \quad \text{Nombre de Grashof}$$

$$P_r = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad \text{Nombre de Prandtl}$$

Le calcul de flux de chaleur transmis par convection naturelle suit les étapes suivantes :

1. Calcul des nombres adimensionnels Gr et Pr ;
2. Suivant la valeur du nombre de Gr on choisit de la corrélation correspondante
3. Calcul du nombre de Nu en appliquant la corrélation choisie
4. Calcul du coefficient d'échange par convection h ; $h = \frac{Nu\lambda}{D}$
5. Calcul du flux transmis φ ; $\varphi = hS(T_p - T_\infty)$

- **En convection forcée**

Dans le cas de la convection forcée la relation liant le flux de chaleur transféré aux différentes variables peut être simplifiée à la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (\text{III.6})$$

Avec, $Re = \frac{\rho D U_m}{\mu}$ le nombre de Reynolds

Le calcul de flux de chaleur transmis par convection forcée suit les étapes suivantes :

1. Calcul des nombres adimensionnels Re et Pr ;
2. Suivant la valeur du nombre de Reynolds Re on fait le choix de la corrélation correspondante
3. Calcul du nombre Nu en appliquant la corrélation choisie
4. Calcul du coefficient ; $h = \frac{Nu\lambda}{D}$
5. Calcul du flux transmis φ ; $\varphi = hS(T_p - T_\infty)$,

Où

$$T_f = \frac{T_p + T_\infty}{2} \quad (\text{III.7})$$

Selon le cas envisagé, les différentes corrélations pour le calcul du nombre de Nusselt (Nu), sont présentées dans la référence

C. Transfert de chaleur par rayonnement

C'est une propagation d'énergie à distance, entre deux corps séparés ou non par un milieu matériel (transformation d'énergie thermique d'un émetteur en énergie électromagnétique, propagation, transformation partielle en énergie thermique sur un corps récepteur). C'est le cas de l'énergie qui nous vient du soleil. Son interprétation physique est tout corps émet des particules désignées par "photons" ; ceux-ci se déplaçant à la vitesse de la lumière et transportent une énergie fonction de leur "longueur d'onde"

Un corps émettant des photons dans toutes les directions possibles, certains d'entre eux sont reçus par l'autre corps est éventuellement absorbés, en tout ou en partie. Bien entendu, ce corps émet aussi des photons dont certains seront reçus et absorbés par le premier corps. Le bilan net se traduit par un échange d'énergie entre les deux corps. La densité du flux thermique (rayonnement) émis par une surface dont la température est T, est donné par la loi de Stéphane Boltzmann.

$$Q = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{III.8})$$

Le rayonnement pur à grande longueur d'onde entre deux surfaces i et j portées respectivement à deux différentes températures est évalué par la relation [13] :

$$Q_{ij} = F_{ij} S_i \sigma (T_{si}^4 - T_{sj}^4) = F_{ji} S_j \sigma (T_{si}^4 - T_{sj}^4) \quad (\text{III.9})$$

Avec :

T_s La température de la surface (K°) ;

F_{ij} Facteur de forme entre les surfaces i et j ;

σ Constante de Stéphane Boltzmann. ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) ;

S Superficie de la surface (m^2) ;

Q_{ij} Flux de rayonnement à grande longueur d'onde entre les surfaces i et j .

$$F_{ij} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} - 1 + \frac{1}{F_{ij}} + \frac{S_i}{S_j} \left(\frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right)} \quad (\text{III.10})$$

On peut également trouver dans la littérature :

$$Q_{ij} = hr_{ij} S_{ij} (T_i - T_j) \quad (\text{III.11})$$

$$hr_{ij} = \frac{\sigma (T_i + T_j) (T_i^2 + T_j^2)}{\frac{1}{\varepsilon_i} - 1 + \frac{1}{f_{ij}} + \frac{S_i}{S_j} \left(\frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right)} \quad (\text{III.12})$$

III.4 Modélisation énergétique du capteur PV/T

La figure ci-dessous représente l'architecture d'un système de pompage et chauffage d'eau à partir d'un capteur PV/T

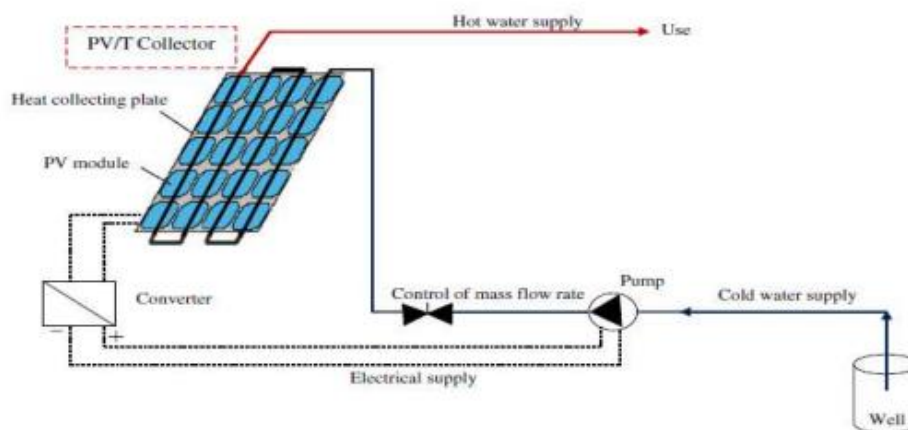


Figure III.3 : Schéma synoptique d'un système à base du capteur PV/T hybride

La production d'énergie électrique et thermique par le système hybride PV/T dépend des plusieurs paramètres d'entrées et de sorties : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température

ambiante et de fluide caloporteur. La représentation d'état du modèle du Capteur PV/T est schématisée par la figure III.4 :

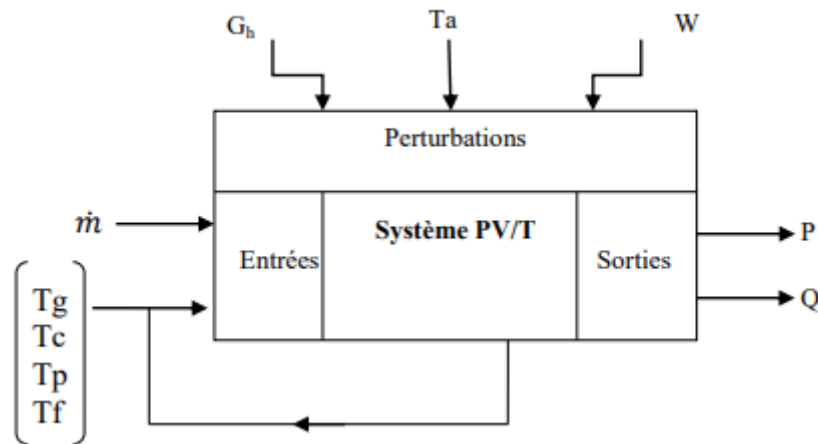


Figure III.4 : Représentation d'état capteur PV/T hybride

$$\begin{pmatrix} \dot{T}_g \\ \dot{T}_c \\ \dot{T}_p \\ \dot{T}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_g \\ T_c \\ T_p \\ T_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \end{pmatrix} \dot{m} + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} \\ d_{41} & d_{42} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_h \\ T_a \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_g \\ T_c \\ T_p \\ T_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{21} \end{pmatrix} \dot{m}$$

Le vecteur d'entrée $T = [T_g \ T_c \ T_p \ T_f]^T$; avec T_g , T_c , T_p , T_f représentent les températures dans chaque couche du PV/T : Verre, Cellule solaire PV, Plaque absorbante, Fluide (Eau) ; les perturbations du système sont : Rayonnement Solaire G_h , Température Ambiante T_a , Vitesse de Vent W ; le signal de Commande ou Contrôle est \dot{m} ; le vecteur de sortie est $S = [P \ Q]^T$; P la puissance électrique du PV/T et Q est la puissance thermique.

Le but de l'étude, est de prévoir les températures dans chaque couche du capteur PV/T, Pour cela on utilise le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie suivante : La variation de l'énergie interne = l'énergie reçue – l'énergie perdue

Ou encore sous forme mathématique, Considérons une section quelconque du système l'instant t

$$\text{Le bilan au nœud } i \text{ donne : } M_i C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_i Q_i - \sum_s Q_i \quad (\text{III.13})$$

M_i : Masse du nœud i

C_i : La chaleur spécifique du nœud i

dt : Pas de temps.

➤ **Pour le verre (Glass coversub-model)**

La température au niveau de verre est donnée par l'équation suivante

$$m_g c_g dt_g/dt = \alpha_g g_h A_g + A_g (h_{wind} + h_{nrga}) (T_a - T_g) + A_g h_{rog} (T_c - T_g) + A_g h_{crg} (T_c - T_g) \quad (\text{III.14})$$

Avec

m_g : Masse de verre (Kg)

c_g : Coefficient de la chaleur spécifique du verre (1/Kg. K)

g_h : Rayonnement Solaire (W/m²)

h_{wind} : Coefficient de transfert convectif qui est fonction de la vitesse du vent en (W/m²K), il est donné par l'expression suivante :

$$h_{wind} = 2.8 + 3.0W \quad (\text{III.15})$$

Avec

W : Vitesse de vent (m/s)

h_{rga} : Coefficient d'échange par rayonnement entre la face extérieure de verre et l'ambient, il est donné par l'équation suivante

$$h_{rga} = \varepsilon_g \sigma \cdot (T_g^2 + T_a^2) \cdot (T_g + T_a) \quad (\text{III.16})$$

Et entre la face extérieure de verre et plaque absorbante est donnée par l'équation

$$h_{rcg} = \left(\sigma \cdot (T_g^2 + T_a^2) \cdot (T_g + t_a) \right) / (1/\varepsilon_g + 1/\varepsilon_c - 1) \quad (\text{III.17})$$

Avec

ε_g : émissivité de verre

ε_c : émissivité de plaque absorbante

σ : constant of Stefan

➤ **Pour la cellule solaire (Solar cellsub-model)**

$$m_c c_c dT_c/dt = [\alpha_c \tau_g A_c (1 - \eta_r)] g_h - A_g h_{rcg} (T_g - T_c) - A_g h_{cg} (T_c - T_g) - A_c h_{cp} (T_c - T_p) \quad (\text{III.18})$$

Avec

m_c : Masse de la cellule solaire

c_c : Chaleur spécifique de la cellule

α_c : Absorptivité de la cellule

τ_g : Transmittivité du verre.

➤ **Pour la plaque absorbante (Absorber plat sub-model)**

$$m_p c_p dT_p/dt = A_c h_{cp} (T_c - T_p) - A_c h_{pa} (T_p - T_a) - A_f h_{fa} (T_f - T_a) m c_f \Delta T_f \quad (\text{III.19})$$

Avec

m_p : Masse de la plaque

c_p : Chaleur spécifique de la plaque

\dot{m} : Débit massique (Kg/s)

➤ **Pour le fluide caloporteur (Output fluid temperatures sub-model)**

$$m_f c_f dT_f/dt = A_f h_{pf} (T_p - T_f) - c_f \dot{m} \frac{\Delta T_f}{\Delta y} \quad (\text{III.20})$$

m_f : Masse de fluide

c_f : Chaleur spécifique du fluide

Pour La puissance de sortie électrique P, cette puissance dépend du fonctionnement instantané la température T_c du module de cellule PV.

$$P = V_{pv} \times I_{pv} \quad (\text{III.21})$$

$$V_{pv} = N_s \cdot V_T \ln(I_{scSTC} - I_{pv}/I_0) \quad (\text{III.22})$$

$$I_{pv} = N_{ph} \{ I_{pg} - I_0 [\exp(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}/V_T) - 1] - V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}/R_{soh} \} \quad (\text{III.23})$$

$$V_T = K_B \cdot T_c \cdot n/q \quad (\text{III.24})$$

$$I_{ph} = [I_{scSTC} + \alpha_{STC} (T_c - T_{a,ref})] \quad (\text{III.25})$$

$$K_B = 1.3806 \times 10^{-23} [J/K];$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} [C];$$

$$n = 1.62$$

I_0 est le courant inverse de la saturation de la diode.

Concernant la puissance de sortie thermique Q du système PV/T est donnée par l'équation suivante [14].

$$Q = \dot{m}c_f(T_f - T_{fi}) \quad (\text{III.26})$$

Avec

T_f : Température de sortie du fluide à l'instant t

T_{fi} : Température d'entrée du fluide à l'instant t

III.5 Bilan thermique

Une partie de la totalité de l'énergie solaire frappant le collecteur plan n'est pas transmise à cause de la transparence imparfaite de la plaque transparente de couverture et une partie n'est pas absorbée à cause de l'absorbance imparfaite de la surface noire.

Ce comportement représente une première perte d'énergie absorbée par la surface noire et dissipée de la manière suivant :

- Pertes par conduction vers la partie postérieure et les côtés du collecteur.
- Pertes par convection et rayonnement à travers le système de couverture.

La quantité restante d'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur et représente donc ; l'énergie utile du système.

Il en résulte que le bilan thermique d'un capteur plan, dans les conditions de régime variable est représenté par l'équation suivante [15] :

$$Q_a = Q_u + Q_p + Q_s \quad (\text{III.27})$$

Où :

Q_a : chaleur absorbée par l'absorbeur (J).

Q_u : chaleur utile (J).

Q_p : chaleur perdue par le capteur vers l'extérieur (J).

Q_s : chaleur emmagasinée dans le capteur (J).

III.6 Bilan énergétique du capteur hybride PVT

Le capteur étudié est un modèle de 9 nœuds. Les différents nœuds du ce capteur solaire sont indiqués sur la figure suivante :

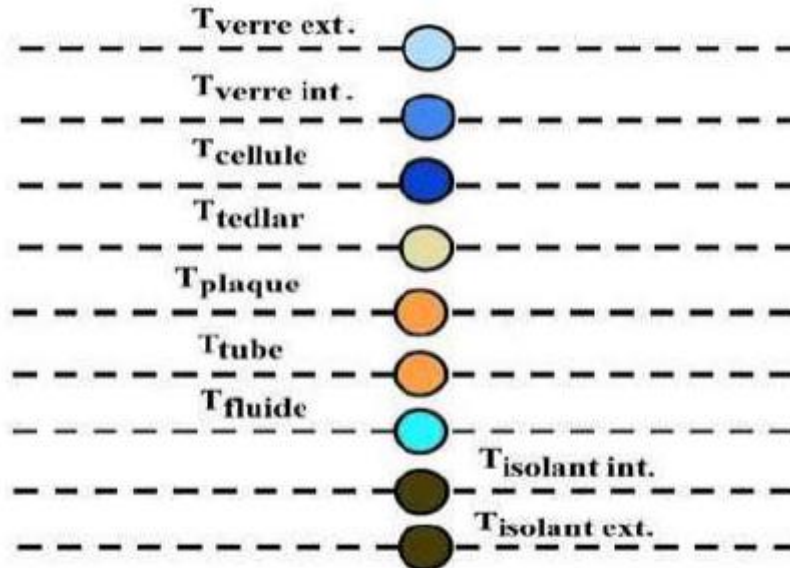


Figure III.5 : Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds

L'énergie thermique fournie par le rayonnement solaire est donnée comme suit :

$$Q_{sun} = A_{verre} G \tau_{verre} \alpha_{cel} \quad (III.28)$$

A_{verre} : Surface du verre (m^2).

G : Rayonnement directe totale absorbée par la cellule solaire (W/m^2)

τ_{verre} : Transmittivité du verre.

α_{cel} : Coefficient d'absorptivité de la cellule solaire.

Puisque le verre est opaque par rapport aux rayonnements émis par les cellules, la surface du verre devient une surface émettrice, les pertes thermiques par rayonnement sont exprimées comme suit :

$$Q_{rad\ v-a} = \sigma \cdot \varepsilon_v \cdot A_{verre} (T_v^4 - T_{ciel}^4) \quad (III.29)$$

Avec :

σ : Constante de Stefan-Boltzmann en ($W/m^2 K^4$)

ε_v : Émissivité du verre

A_v : Surface du verre en (m^2)

$$T_{ciel} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad (III.30)$$

Nous avons exprimé les pertes thermiques par convection par l'équation de transfert de chaleur entre le verre du capteur hybride et le milieu extérieur comme suit :

$$Q_{conv\ v-a} = h_{c.a.} A_v (T_v - T_a) \quad (III.31)$$

Avec :

T_v : Température du verre du capteur hybride (K)

T_a : Température ambiante (K)

$h_{c.a.}$: Coefficient de transfert convectif qui est fonction de la vitesse du vent en (W/m^2K), il est donné par l'expression suivante:

$$h_{c.a.} = 2.8 + 3.0V_{vent} \quad (III.32)$$

✓ **Pour la face extérieure du verre**

L'équation de l'énergie au niveau du verre ; face extérieure est comme suit :

$$M_v C_v \frac{dT_{v\ ext}}{dt} = Q_{sun} - Q_{rad\ v-ciel} - Q_{conv\ v-a} - Q_{cond\ v} \quad (III.33)$$

$$M_v C_v \frac{dT_{v\ ext}}{dt} = A_v G - \sigma \epsilon_v A_v (T_{v\ ext}^4 - T_{ciel}^4) - h_{c.a} A_v (T_v - T_a) - h_{cond\ v} A_v (T_{v\ ext} - T_{v\ int}) \quad (III.34)$$

$$h_{cond\ v} = \frac{\lambda_v}{\delta_v}$$

(III.35)

λ_v : La conductivité thermique du verre

δ_v : L'épaisseur de verre

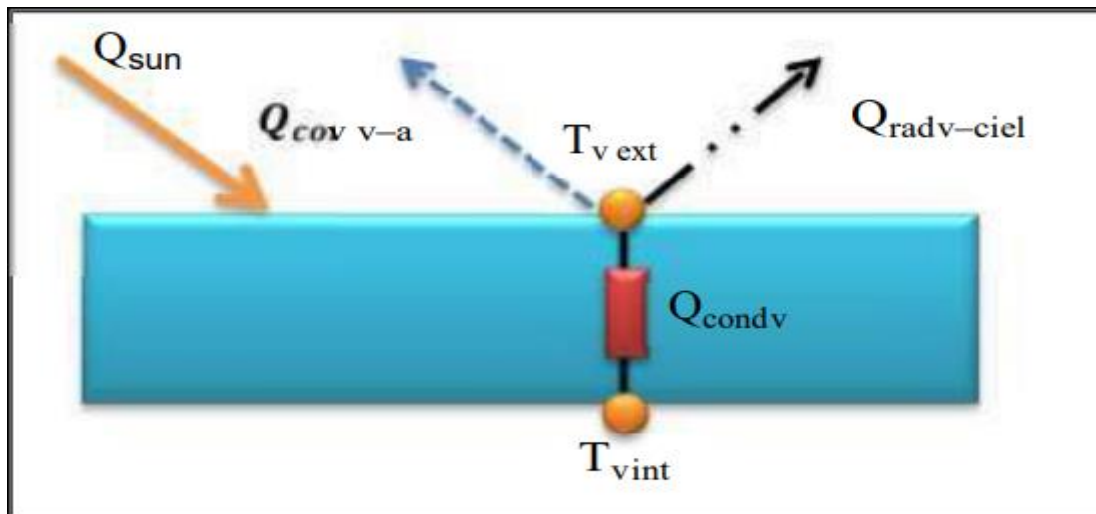


Figure III.6 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face extérieure

✓ **Pour la face intérieure du verre**

L'équation de l'énergie au niveau du verre ; face intérieure est comme suit :

$$M_v C_v \frac{dT_{v \text{ ext}}}{dt} = Q_{\text{sun}} + Q_{\text{cond } v} - Q_{\text{conv } v\text{-ciel}} \quad (\text{III.36})$$

$$M_v C_v \frac{dT_{v \text{ ext}}}{dt} = A_v G \tau_{\text{verre}} + h_{\text{cond } v} A_v (T_{v \text{ ext}}^4 - T_{v \text{ int}}^4) - h_{\text{cond } v\text{-ciel}} A_v (T_{v \text{ int}} - T_{v \text{ ciel}}) \quad (\text{III.37})$$

$$h_{\text{cond } v\text{-ciel}} = \frac{\lambda_{\text{ciel}}}{\delta_{\text{ciel}}} \quad (\text{III.38})$$

λ_{ciel} : La conductivité thermique du verre

δ_{ciel} : L'épaisseur de verre

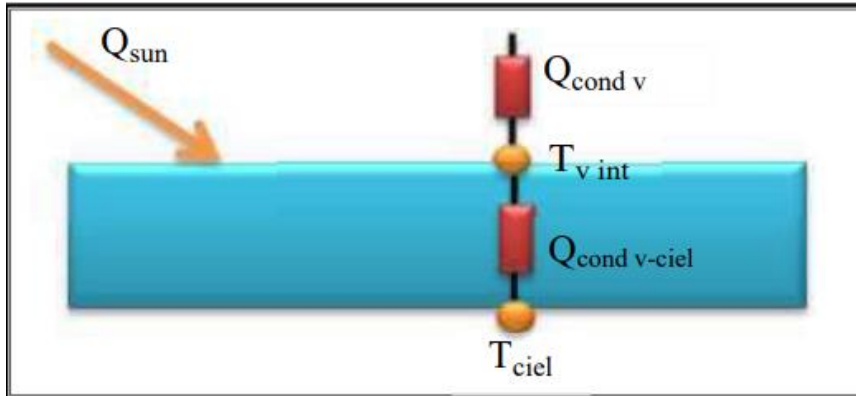


Figure III.7 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face intérieure

✓ **Pour la cellule solaire**

L'équation de l'énergie au niveau de la cellule photovoltaïque est comme suit :

$$M_{\text{ciel}} C_{\text{ciel}} \frac{dT_{\text{ciel}}}{dt} = A_v G \tau_{\text{verre}} \alpha_{\text{ciel}} + Q_{\text{cond } v\text{-ciel}} - Q_{\text{cond } \text{ciel-ted}} - Q_{\text{ele}} \quad (\text{III.39})$$

$$M_{\text{ciel}} C_{\text{ciel}} \frac{dT_{\text{ciel}}}{dt} = A_v G \tau_{\text{verre}} \alpha_{\text{ciel}} + h_{\text{cond } v\text{-ciel}} A_v (T_{v \text{ int}} - T_{v \text{ ciel}}) - h_{\text{cond } \text{ciel-ted}} A_v (T_{\text{ciel}} - T_{\text{ted}}) - Q_{\text{ele}} \quad (\text{III.40})$$

$$h_{\text{cond } \text{ciel}} = \frac{\lambda_{\text{ciel}}}{\delta_{\text{ciel}}} \quad (\text{III.41})$$

$$h_{\text{cond-ted}} = \frac{\lambda_{\text{ted}}}{\delta_{\text{ted}}} \quad (\text{III.42})$$

$$Q_{\text{ele}} = \frac{Q_{\text{sun}}}{\alpha_{\text{ciel}}} \eta_{\text{ref}} \exp[\beta (T_{\text{ciel}} - T_{\text{ref}})] \quad (\text{III.43})$$

η_{ref} : Est le rendement de référence est mesuré pour une température de référence T_{ref} prise égale à 25°C.

β : Le coefficient de température qui représente la relation entre le rendement de la cellule solaire et la température (environ 0.004 pour une cellule solaire au silicium).

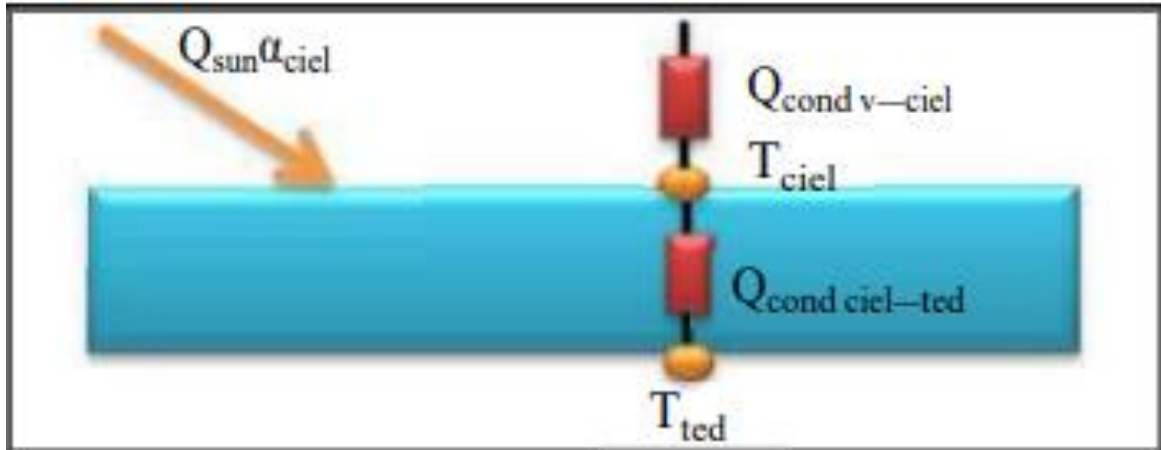


Figure III.8 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la Cellule photovoltaïque

✓ Pour la couche de Tedlar

L'équation de l'énergie au niveau de la couche de Tedlar est donnée comme suit :

$$M_{ciel} C_{ciel} \frac{dT_{ciel}}{dt} = Q_{cond\ ciel-ted} - Q_{cond\ ted-p} \tag{III.44}$$

$$M_{ciel} C_{ciel} \frac{dT_{v\ ext}}{dt} = h_{cond\ ted} A_{ted} (T_{ciel} - T_{ted}) - h_{cond\ ted-p} A_{ted} (T_{ted} - T_p) \tag{III.45}$$

$$h_{cond\ ted} = \frac{\lambda_{ted}}{\delta_{ted}} \tag{III.46}$$

$$h_{cond\ ted-p} = 2 \frac{\lambda_p}{\delta_p} \tag{III.47}$$

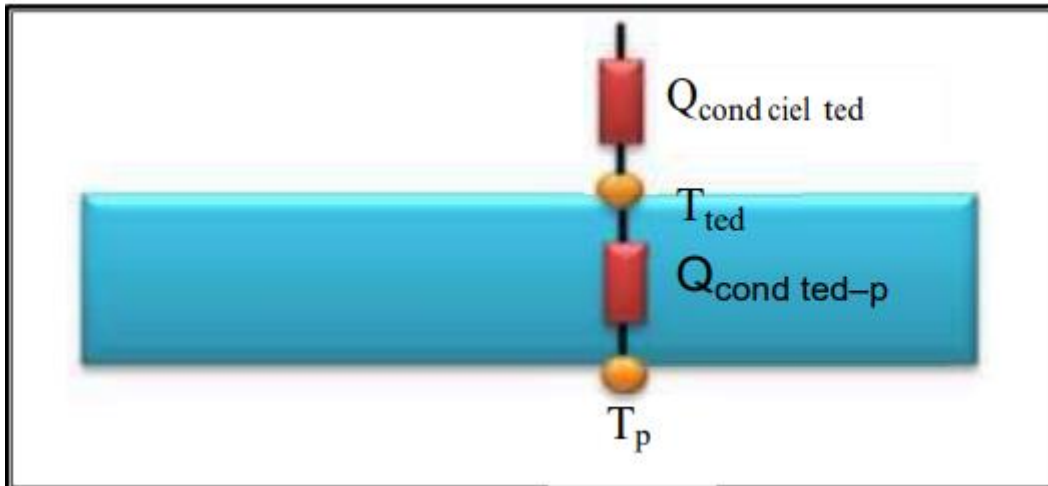


Figure III.9 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar

✓ Au niveau de la plaque absorbante

L'équation de l'énergie au niveau de la couche de la plaque absorbante est donnée comme suit :

$$M_{ciel} C_{ciel} \frac{dT_p}{dt} = Q_{cond\ ted-p} - Q_{cond\ p} - Q_{cond\ p-iso}$$

$$M_p C_p = A_p h_{cond\ tube-p} (T_{ted} - T_p) - A_{p-tube} h_{cond\ p-tube} (T_p - T_t) - A_{p-iso} h_{cond\ p-iso} (T_p - T_{iso\ int}) \quad (III.48)$$

La surface de contact entre le tube et la plaque absorbante c'est :

$$A_{p-tube} = A_p \left(\frac{W - D_{ext}}{W} \right) \quad (III.49)$$

La surface de contact entre la plaque absorbante et l'isolant, face intérieure est :

$$A_{p-iso} = A_p \left[1 - \left(\frac{W - D_{ext}}{W} \right) \right] \quad (III.50)$$

$$H_{cond\ p-tube} = \frac{1}{2 \left[\frac{\delta p}{\lambda p} + \frac{(D_{ext} - D_{int})}{2 \lambda p} \right]} \quad (III.51)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par conduction entre la plaque absorbante et l'isolant, face intérieure est :

$$h_{cond\ p-iso} = 2 \frac{\lambda p}{\delta p} \quad (III.52)$$

✓ Au niveau du tube

L'équation de l'énergie au niveau du tube est donnée comme suit :

$$M_t C_t \frac{dT_t}{dt} = Q_{cond\ p-tube} - Q_{cond\ tube-fluide} - Q_{cond\ tube-iso} \quad (III.53)$$

$$M_t C_t \frac{dT_t}{dt} = A_{p-tube} h_{cond\ p-tube} (T_p - T_t) - A_{fluide} h_{conv\ tube-fluide} (T_t - T_f) - A_{iso\ tube} h_{cond\ tube-iso} (T_t - T_{iso\ ext}) \quad (III.54)$$

Nous avons considéré que la surface de contact entre le tube et l'isolant est :

$$A_{iso-tube} = \frac{D_{ext}}{2} \pi L \quad (III.55)$$

Le : $h_{conv\ t-f}$ est le coefficient de transfert de chaleur de convection entre le fluide et le mur de tube.

Pour l'écoulement de l'eau dans le tube :

$$N_u = \frac{h_{conv\ t-f} D_h}{\lambda_f} \quad (III.56)$$

$$D_h = \frac{4 A_{fluide}}{p} \quad (III.57)$$

p : est le périmètre du tube

✓ **Pour le fluide caloporteur**

La distribution de la température dans le sens d'écoulement du fluide, si on considère que le fluide a une température d'entrée T_e et une température de sortie T_s , et les diamètres extérieur et intérieur du tube sont respectivement D_{ext} et D_{int} , pour un segment de l'eau dans le tuyau de communication :

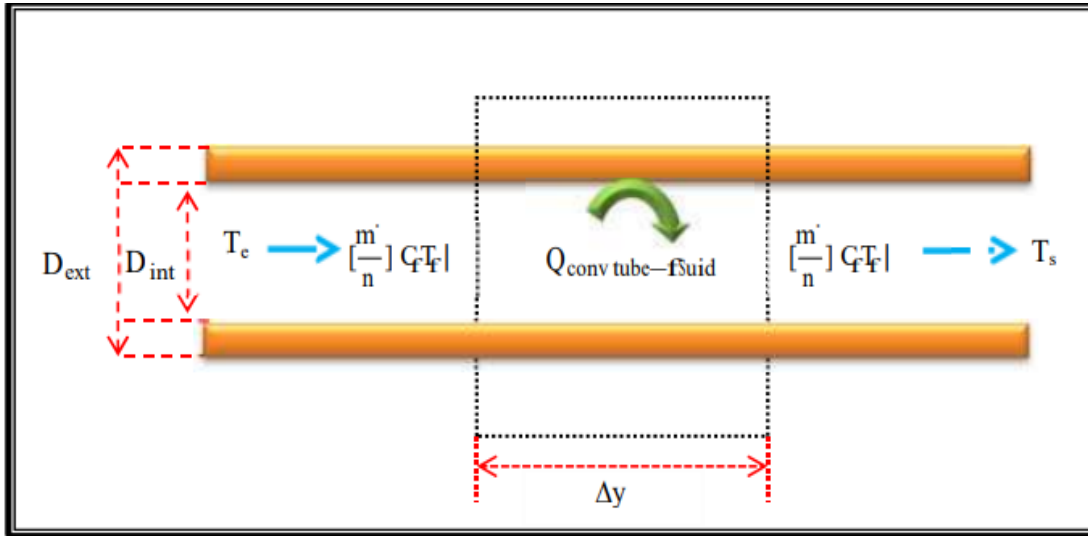


Figure III.10 : Ecoulement du fluide dans un tube

L'équation de l'énergie pour le fluide caloporteur est donnée comme suit :

$$M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = Q_{conv \text{ tube fluide}} - Q_{th} \quad (\text{III.58})$$

$$M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = A_{fluide} h_{conv \text{ tube-fluide}} (T_f - T_a) + n W F' [S - U_{pa} (T_f - T_a)] \quad (\text{III.59})$$

$$S = \left[\tau_{verre} \alpha_{ciel} - \left(\frac{\eta_{ref} A_{ciel}}{A_{capteur}} \right) \right] G \quad (\text{III.60})$$

✓ **Pour la couche d'isolant**

L'équation de l'énergie au niveau de l'isolant ; face intérieure est donnée par :

$$M_{iso} C_{iso} \frac{dt_{iso \text{ int}}}{dt} = A_{conv \text{ p-iso}} - Q_{cond \text{ iso}} \quad (\text{III.61})$$

$$M_{iso} C_{iso} \frac{dt_{iso \text{ int}}}{dt} = A_{p-iso} h_{cond \text{ p-iso}} (T_p - T_{iso \text{ int}}) - h_{cond \text{ iso}} A_{iso} (T_{iso \text{ int}} - T_{iso \text{ ext}}) \quad (\text{III.62})$$

$$h_{cond \text{ iso}} = \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \quad (\text{III.63})$$

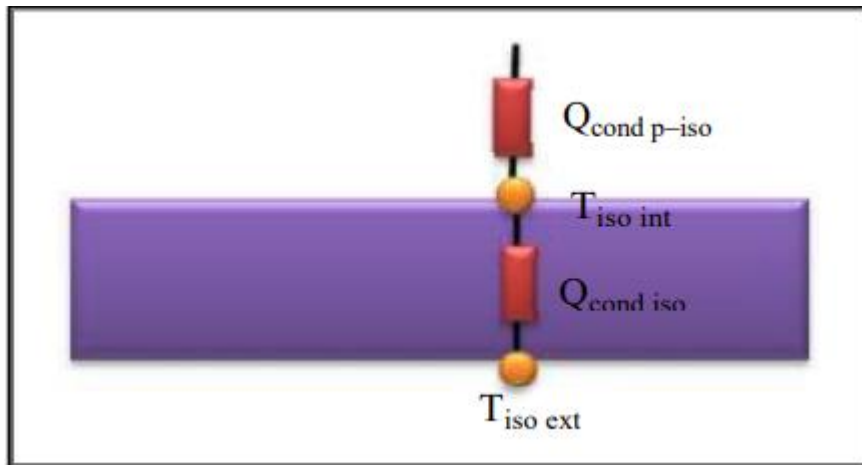


Figure III.11 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face intérieure

L'équation de l'énergie au niveau de l'isolant ; face extérieure est donnée par :

$$M_{iso} C_{iso} \frac{dt_{iso\ int}}{dt} = Q_{cond\ tube-iso} - Q_{cond\ iso} - Q_{cond\ iso-a} \quad (III.64)$$

$$M_{iso} C_{iso} \frac{dt_{iso\ int}}{dt} = A_{iso-tube} h_{cond\ tube-iso} (T_t - T_{iso\ ext}) + h_{cond\ iso} A_{iso} (T_{iso\ int} - T_{iso\ ext}) - h_{conv\ iso-a} A_{iso} (T_{iso\ ext} - T_a) \quad (III.65)$$

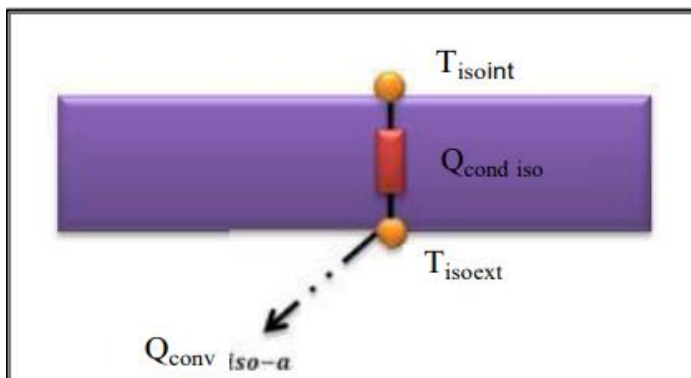


Figure III.12 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face, extérieur

Le gain utile de la chaleur peut être calculé comme suit [16] :

$$Q_{util} = A_{capteur} F_R [(\tau\alpha)_{pv} G - U_{p-a} (T_e - T_a)] \quad (III.66)$$

III.7 Le rendement d'un capteur solaire

III.7.1 Rendement instantané du capteur

Le rendement instantané est défini comme étant le rapport de la puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur (P_u) et la puissance solaire arrivant sur le plan incliné du capteur (P_{ab}).

Selon la référence, la norme C.E.C stipule que l'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané donné par la relation suivante :

$$\eta_i = \left(\frac{p_u}{p_{qb}} \right) = \left(\frac{p_u}{A_c \times G} \right) \quad (\text{III.67})$$

p_{ab} : la puissance solaire arrivant sur le capteur.

p_u : la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

A_c : surface du capteur.

G : flux solaire global incident.

Le rendement instantané du capteur en fonction du débit massique est donné par :

$$\eta_i = m \times c_p \times \left[\frac{(T_{fs} - T_{fe})}{A_c \times G} \right] \quad (\text{III.68})$$

Avec

m : débit massique de l'eau

C_p : Chaleur spécifique de l'eau.

T_{fs} : température de sortie du fluide.

T_{fe} : température d'entrée du fluide.

A_c : surface du capteur solaire.

G : flux de chaleur global incident.

III.7.2 Rendement journalier du capteur

C'est le rapport de la somme des énergies utiles prises au cours de la journée par la somme des ensoleillements correspondants :

$$\eta_i = \left(\frac{\sum p_u}{A_c \times \sum G} \right) \quad (\text{III.69})$$

III.8 Les paramètres influant le rendement d'un capteur solaire

Le rendement d'un capteur solaire thermique est influencé par différents paramètres. On distingue généralement les points suivants :

III.8.a Les paramètres externes

1- Les paramètres d'ensoleillement :

- Eclairage énergétique dû au rayonnement global.
- Position du soleil et durée d'insolation.

- L'heure de la journée et la saison.
- La position géographique du lieu considéré (latitude).

2- Température ambiante.

3- Vitesse du vent.

III.8.b Les paramètres internes

1- Les paramètres de position :

- Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
- Capteur fixe ou suivant le soleil.

2- Les paramètres de construction.

Parmi lesquels nous citons :

- L'absorbeur :

- Les propriétés thermo-physiques et optiques.
- Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.
- Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective.
- Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
- Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire).
- Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur.
- Température de l'absorbeur.
- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

- La surface sélective

- Propriétés optiques.

- Couverture transparente

- Propriétés optiques et thermo-physiques.
- Epaisseur.
- Le nombre de vitrage et la forme.

- L'isolant

- Propriétés thermo-physiques et optiques.
- Epaisseur.

- Fluide caloporteur

- Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.
- Température d'entrée.
- Propriétés thermo-physiques.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude a été menée sur le capteur solaire photovoltaïque hybride PV/T, qui permet le captage de l'énergie thermique et a un certain nombre d'utilisations, notamment la connaissance de la convection et de la conduction. Le rendement électrique de ce système photovoltaïque [17].



Chapitre IV : Simulation Numérique

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation numérique instationnaire d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique (PV/T). L'objectif principal est d'étudier numériquement le comportement thermique de ce type de capteur solaire pour analyser le transfert thermique dans une géométrie tridimensionnelle (3D). Un code commercial ANSYS Fluent est utilisé pour effectuer notre calcul. Le modèle de turbulence K-epsilon et le modèle Rosseland sont utilisés pour notre cas de calcul. Cette étude a été réalisée à partir des données météorologiques initiales créées par le logiciel fluent qui se sont imposés aux conditions aux limites d'un capteur solaire hybride PV/T.

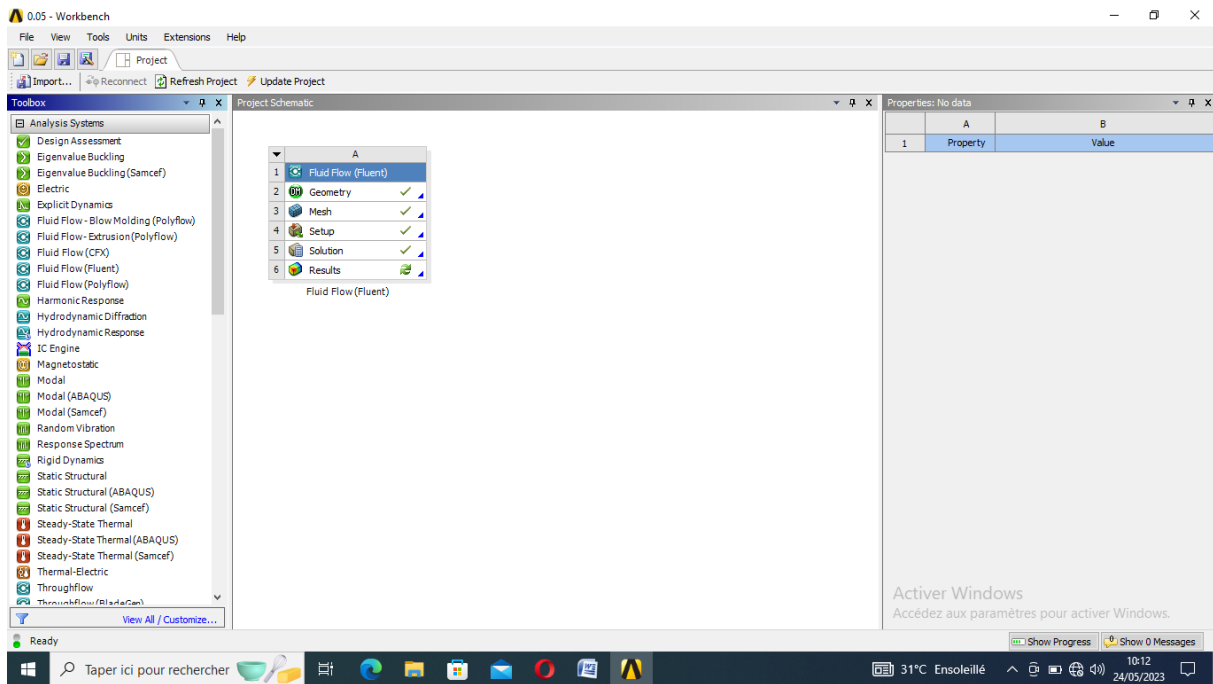
Le capteur solaire PV/T étudié est composé par 45 cellules photovoltaïques de dimension (6x6) cm², en basant sur la vitesse d'écoulement d'air entre l'absorbeur et les cellules photovoltaïques qui va permettre d'augmenter l'échange thermique entre les différents composants du capteur solaire PV/T. Ceci permet de garder les cellules photovoltaïques à bon état de fonctionnement. La méthode choisie pour étudier et modéliser les performances thermiques de ce capteur solaire hybride PV/T est la méthode de volume fini, dont la particularité est la détermination de la température des différents composants du capteur tout le long de ce dernier.

IV.2 Présentation de logiciel ANSYS Fluent

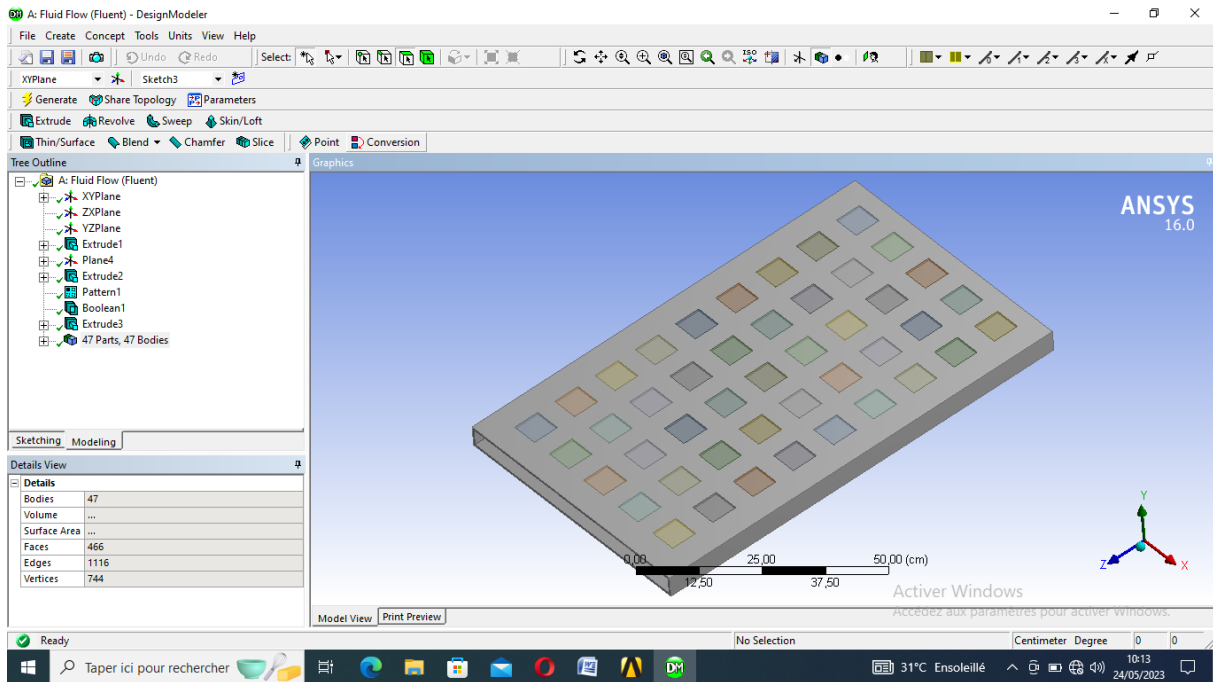
Le logiciel Ansys fluent est un code de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) basé sur la méthode des volumes finis. L'avantage de cette méthode est la présence de toutes les quantités physiques liées au phénomène du transfert thermique quel que soit (température, vitesse, pression etc...) en tous les points dans le domaine étudié.

➤ Étapes nécessaires pour simuler un problème par le Code Ansys fluent

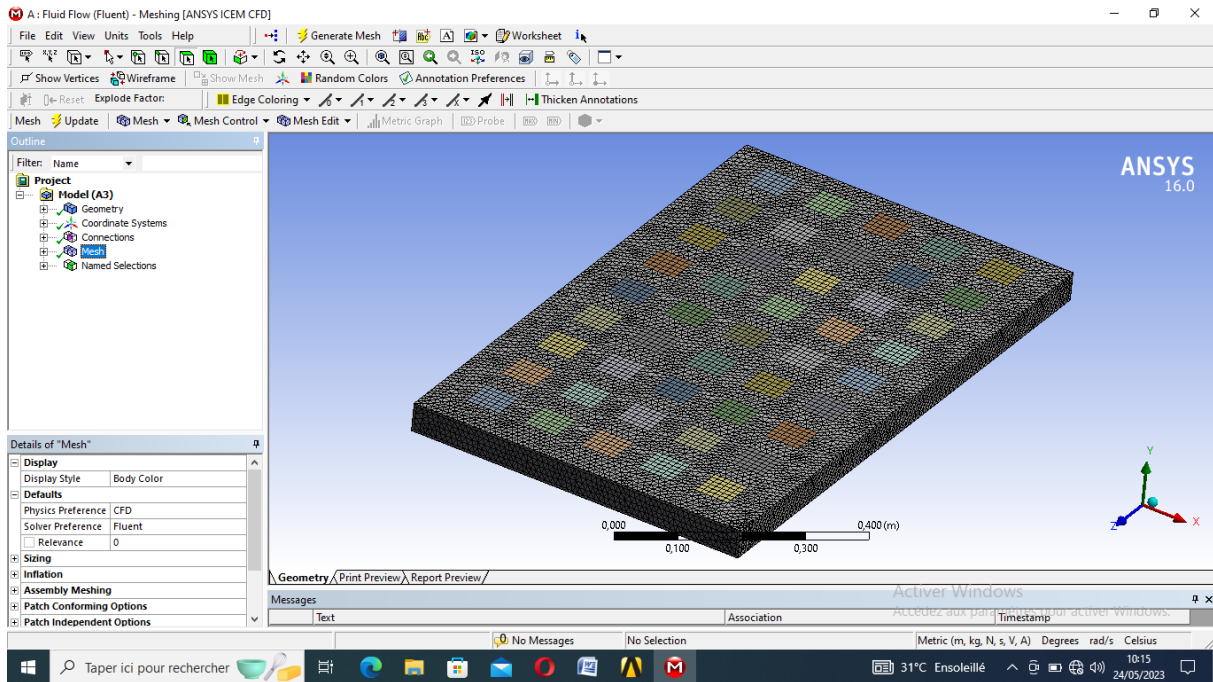
La simulation numérique par le logiciel ANSYS Fluent d'une manière simple, suit les étapes suivantes :



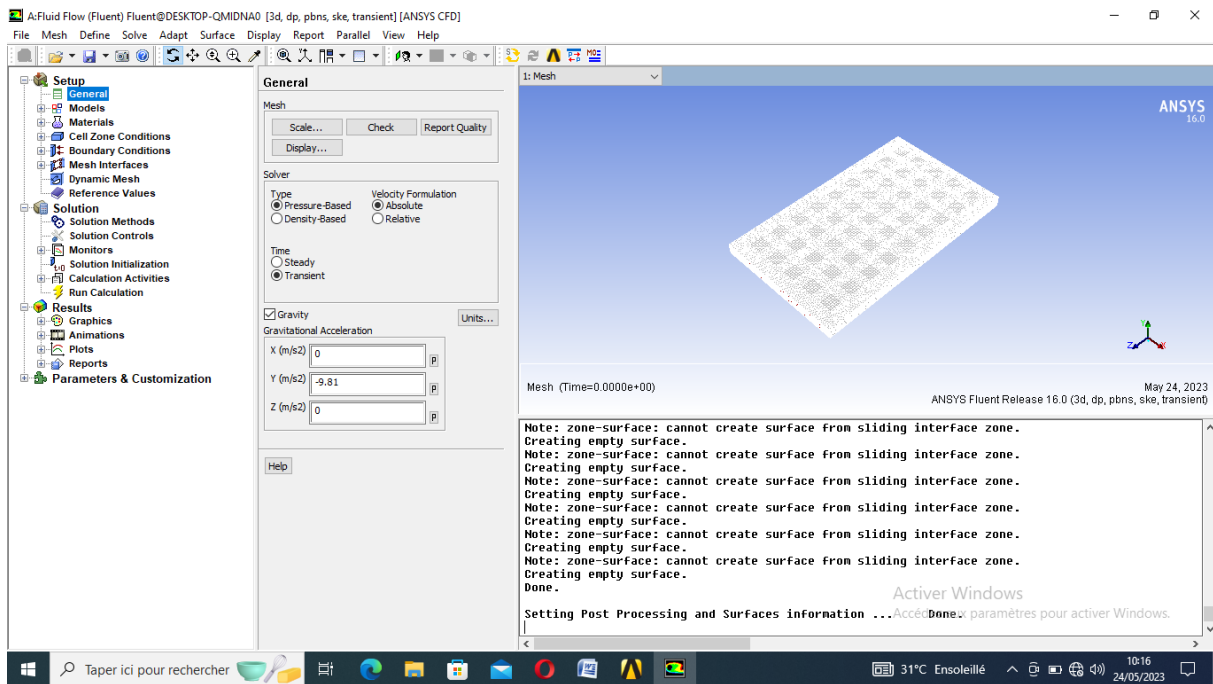
❖ Création de la géométrie sous logiciel Design Modeler



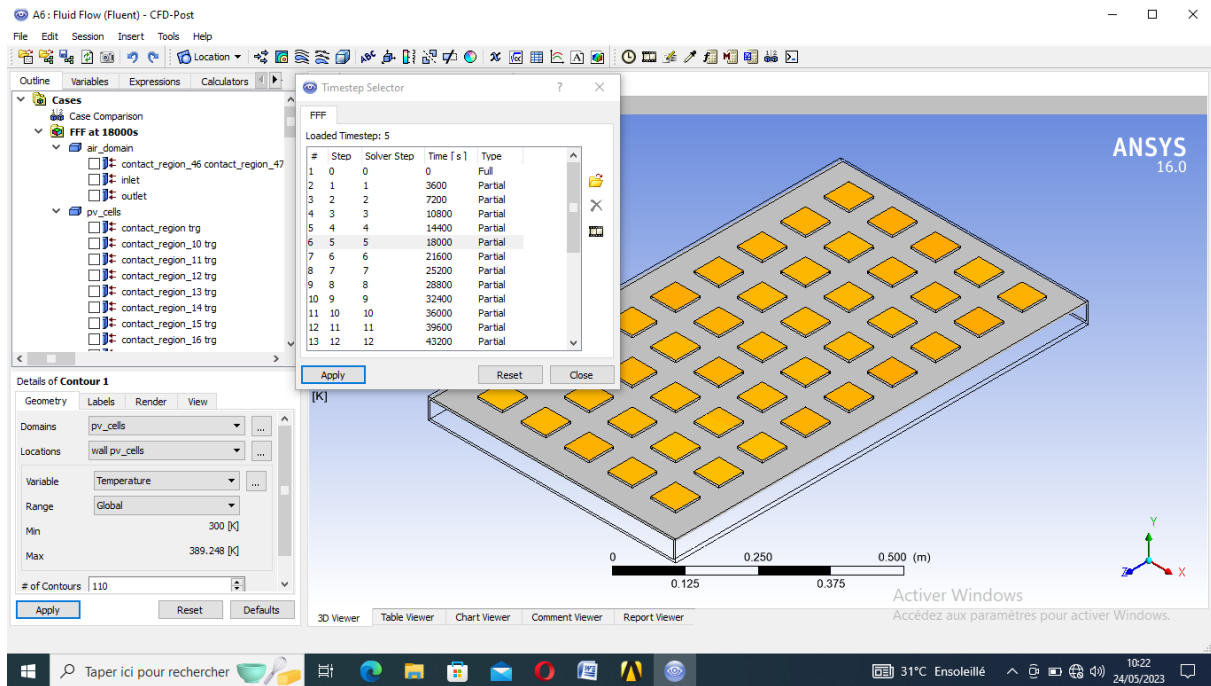
❖ Génération de maillage et la définition des conditions aux limites (surfaces, domaines etc...).



❖ Définition et calcul sous logiciel fluent pour les différents cas étudiant.



❖ Analyse des résultats obtenus sous le programme CFD-Post.



IV.3 Géométrie du modèle

Le capteur solaire PV/T étudié est composé par 45 cellules photovoltaïques de dimension $(6 \times 6) \text{ cm}^2$ montés sur une plaque de verre de dimension $(100 \times 60) \text{ cm}^2$ d'une épaisseur $e = 5 \text{ mm}$. Un isolateur à air à simple passe entre l'absorbeur et la vitre. La Figure IV.1 présente les principaux éléments du capteur solaire PV/T. Il est constitué d'une plaque absorbante en Aluminium peinte en noire d'absorptivité, $\alpha_{\text{abs}} = 0.9$ et de transmissivité $\tau = 0.84$, une surface de captation de $A = (1 \times 0.6) \text{ m}^2$, les dimensions du canal d'écoulement d'air est $(100 \times 59 \times 4) \text{ cm}^3$. La couverture transparente est réalisée en verre normal et le caisson est thermiquement isolé.

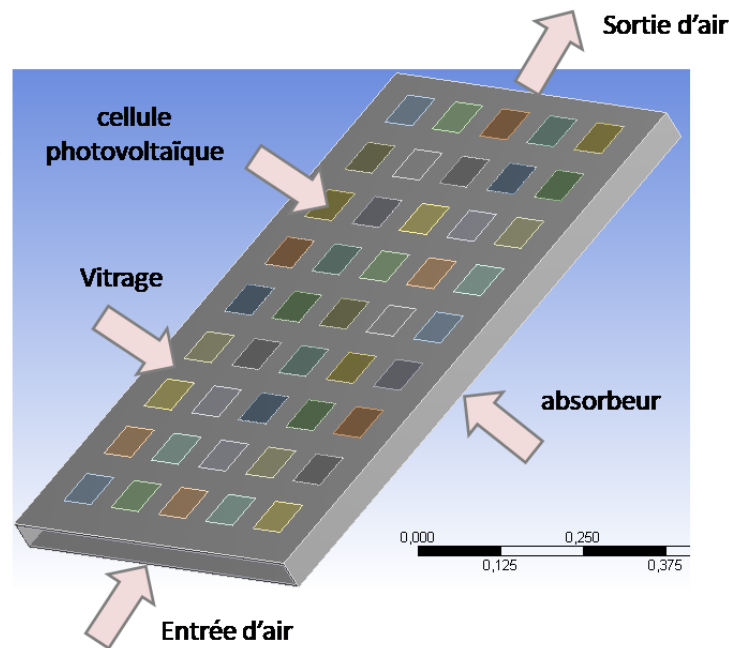


Figure IV.1 : La géométrie du capteur solaire PV/T étudié.

Tableau IV.1 : Propriétés thermophysiques de différentes composantes du capteur solaire.

Propriétés thermophysiques	Aluminium	Vitre	Silicium	Air	Unités
Viscosité dynamique	/	/	/	1.7894e-05	Pa*s
La capacité thermique spécifique	871	750	750	1006	J/(kg K)
Densité	2719	2300	2330	1.225	kg/m ³
Conductivité thermique	202.4	1.2	148	0.02401	W/(m K)

➤ Maillage

Dans l'analyse CFD, la génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante, vu l'influence de ses paramètres sur les résultats du calcul. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et significatif et a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps du calcul. La géométrie du système étudié a été créée en employant le code ANSYS meshing, version 16.0. Le maillage mixte (triangulaire+carré) est utilisé pour mailler le domaine de calcul, le nombre d'élément est environ 226042 éléments (Fig.IV.2).

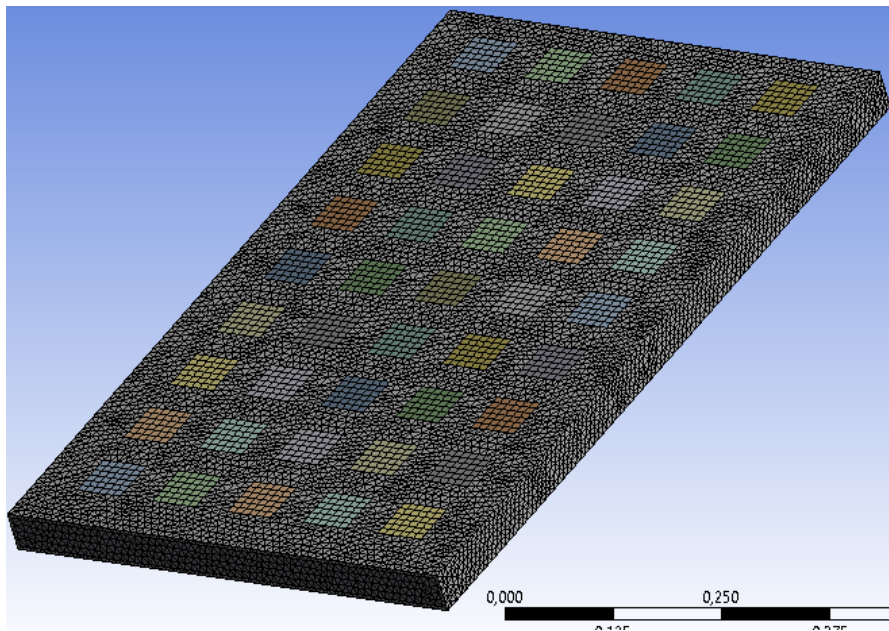


Figure IV.2 : le modèle du maillage du capteur solaire hybride PV/T utilisé dans la simulation numérique.

➤ Conditions aux limites et initiales

Présentation générale du site de Laghouat

La ville de Laghouat est une wilaya algérienne ayant pour chef-lieu la ville de Laghouat, cette ville est considérée comme la porte d'accès aux espaces sahariens, Située au centre du pays à 400 km au sud de la capitale Alger la wilaya s'étend sur une superficie de 25052km². Pour une population estimée au 2017 à 661 700 habitants soit une densité de : 26.41 Hab. /Km². Laghouat est une ville d'Algérie située dans le Nord du Sahara, au pied de l'Atlas saharien. Elle se trouve à 329 km au sud d'Alger et à 750 m d'altitude. Elle possède également le plus grand gisement de gaz naturel d'Afrique (à Hassi R'mel). La wilaya est limitée géographiquement au nord par la wilaya de Tiaret, à l'est par la wilaya de Djelfa, à l'ouest par la wilaya d'El Bayadh et au sud par la wilaya de Ghardaïa.

Le climat de la wilaya de Laghouat est continental semi-aride à aride avec des températures moyennes de -5 °C en hiver et de plus de 40 °C en été. Le climat est de type continental au Nord-Ouest avec une pluviométrie variant de 300 à 400 mm, des chutes de neige et des gelées blanches. Dans la région des Hauts Plateaux, le climat est de type saharien et aride. La pluviométrie varie entre 150 mm au Centre et 50 mm au Sud. Les hivers sont caractérisés par des gelées blanches et les étés par une forte chaleur accompagnée de vents de sable.

- **Températures moyenne de la région**

Région sud de la wilaya : +31.5°C pour les mois chaud Juillet 16/Aout16 + 7.9°C pour les mois plus froid Décembre 2016/Janvier2017.

Région nord de la wilaya : +26.5°C pour les mois chaud Juillet2017/Aout2017 +3.8°C pour les mois plus froid Décembre2016Janvier 2017 [18].

Gisement solaire générer par le modèle de transfert thermique par rayonnement discret (DTRM).

Mois de Septembre

	Valeurs	Unités
Rayonnement solaire directe	1041.49	[W/m ²]
Irradiation solaire diffuse – Surface verticale	53.7441	[W/m ²]
Irradiation solaire diffuse – Surface horizontale	66.6553	[W/m ²]
Rayonnement solaire réfléchi au sol- surface vertical	99.9448	[W/m ²]

Mois d'Octobre

	Valeurs	Unités
Rayonnement solaire directe	1020.64	[W/m ²]
Irradiation solaire diffuse – Surface verticale	56.7101	[W/m ²]
Irradiation solaire diffuse – Surface horizontale	58.1763	[W/m ²]
Rayonnement solaire réfléchi au sol- surface vertical	82.4908	[W/m ²]

IV.4 Résultats et discussions

➤ Evolution de la température à la sortie du capteur solaire en fonction de V_{in}

Les résultats numériques obtenus pour un capteur solaire PV/T est montré sur la figure (IV.3), qui traduit l'évolution de la température de sortie pour les quatre vitesses l'entrée d'air ($V_{in} = 0.1 \text{ m/s}, 0.75 \text{ m/s}, 0.05 \text{ m/s}, 0.25 \text{ m/s}$). Il montre que l'utilisation de faible vitesse d'entrée d'air produit une température plus élevée à la sortie du capteur solaire thermique. L'effet de la vitesse d'entrée d'air sur la température de là à la sortie peuvent être clairement observés dans cette figure, on peut observer une augmentation de 20 °C après 9 heures.

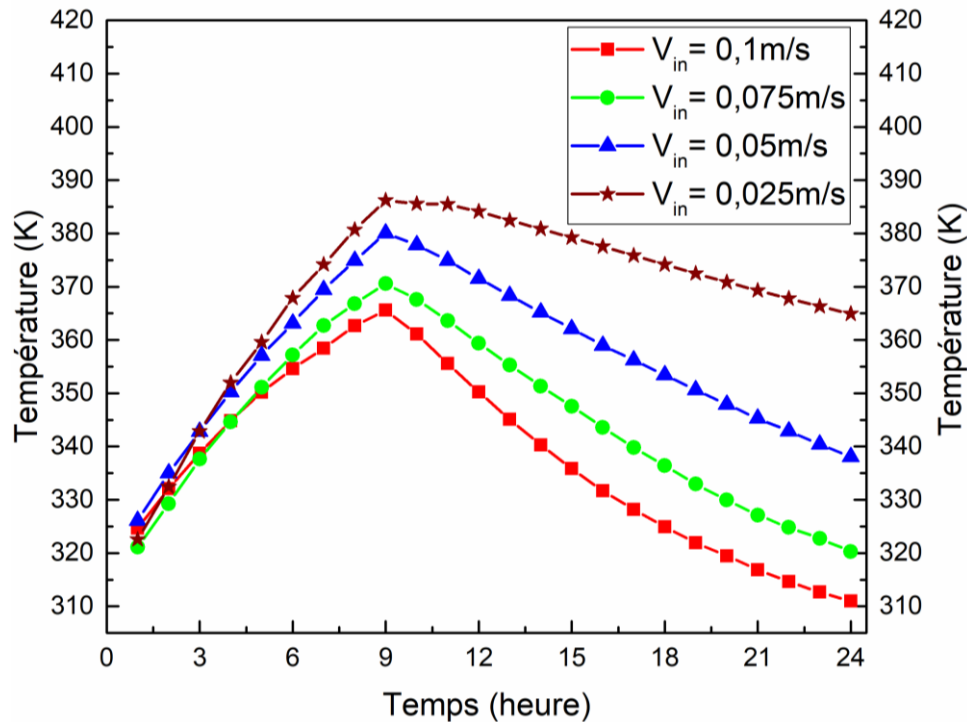


Figure IV.3 : la variation de la température d'air à la sortie du PV/T pour le mois de Septembre.

Les résultats obtenus par la simulation numérique nous a permet d'analyser la variation de la température moyenne des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (IV.4) pour les différentes vitesses d'entrée d'air ($V_{in} = 0.1\text{ m/s}, 0.75\text{ m/s}, 0.05\text{ m/s}, 0.25\text{ m/s}$). Ces courbes présentent la variation de la température imposée par des conditions aux limites pour le mois de Septembre. La première observation apparente qui peut être captée à partir de cette figure est que ces courbes ont la même tendance, où la température augmente proportionnellement avec l'augmentation des rayonnements solaires captés par le capteur solaire PV/T.

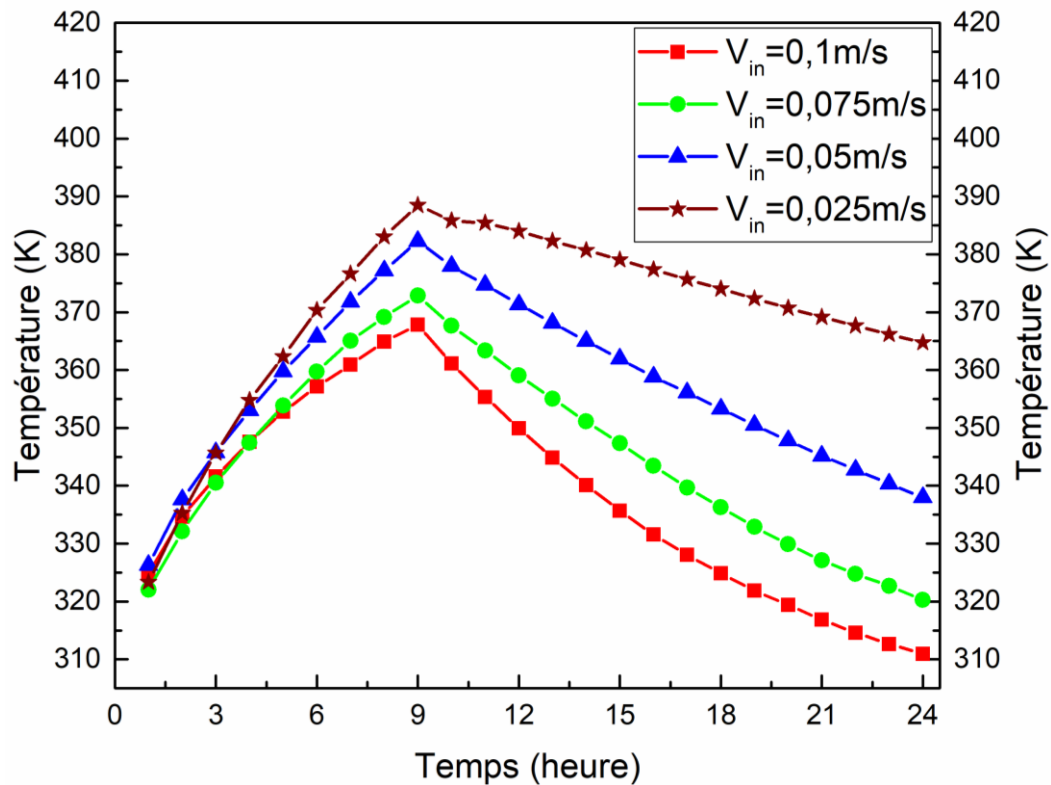


Figure IV.4 : la variation de la température moyenne des cellules photovoltaïques pour le mois de Septembre.

Les résultats obtenus par la simulation numérique nous a permet d'analyser la variation de la température produite par un capteur solaire PV/T est illustré sur la figure (IV.5) pour les différentes vitesses d'entrée d'air ($V_{in} = 0.1 \text{ m/s}, 0.75 \text{ m/s}, 0.05 \text{ m/s}, 0.25 \text{ m/s}$). Ces courbes présentent la variation de la température d'air à la sortie du PV/T imposée par des conditions aux limites pour le mois d'Octobre.

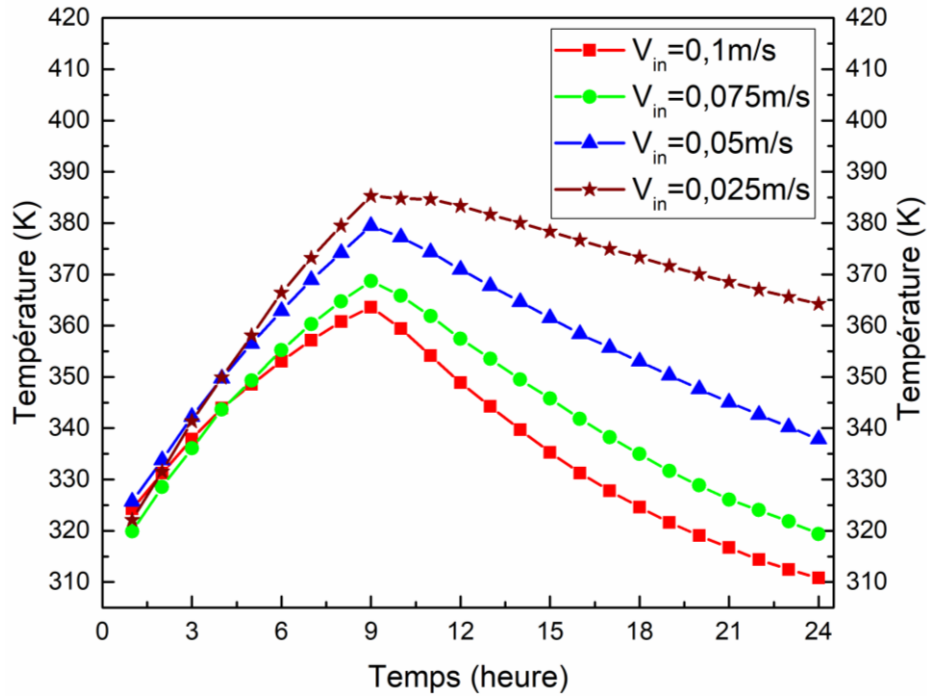


Figure IV.5 : la variation de la température de l'air à la sortie pour le mois d'Octobre.

La figure (IV.5) présente la variation de la température moyenne au niveau des cellules photovoltaïques du capteur solaire PV/T imposée par des conditions aux limites de mois d'Octobre. Nous pouvons remarquer un bon échange thermique entre les cellules photovoltaïques et l'air qui s'écoule à l'intérieur de capteur solaire hybride PV/T.

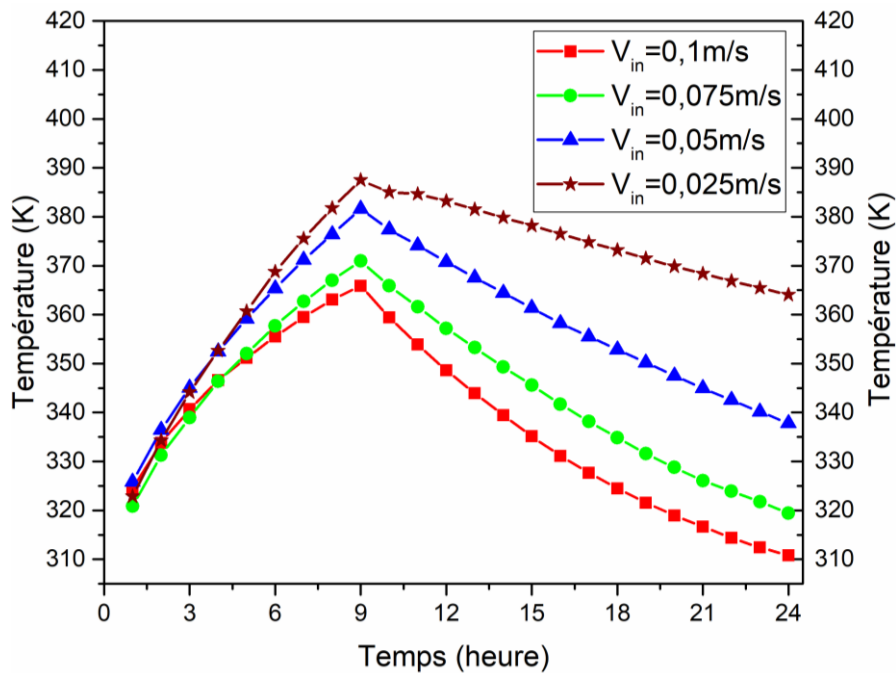
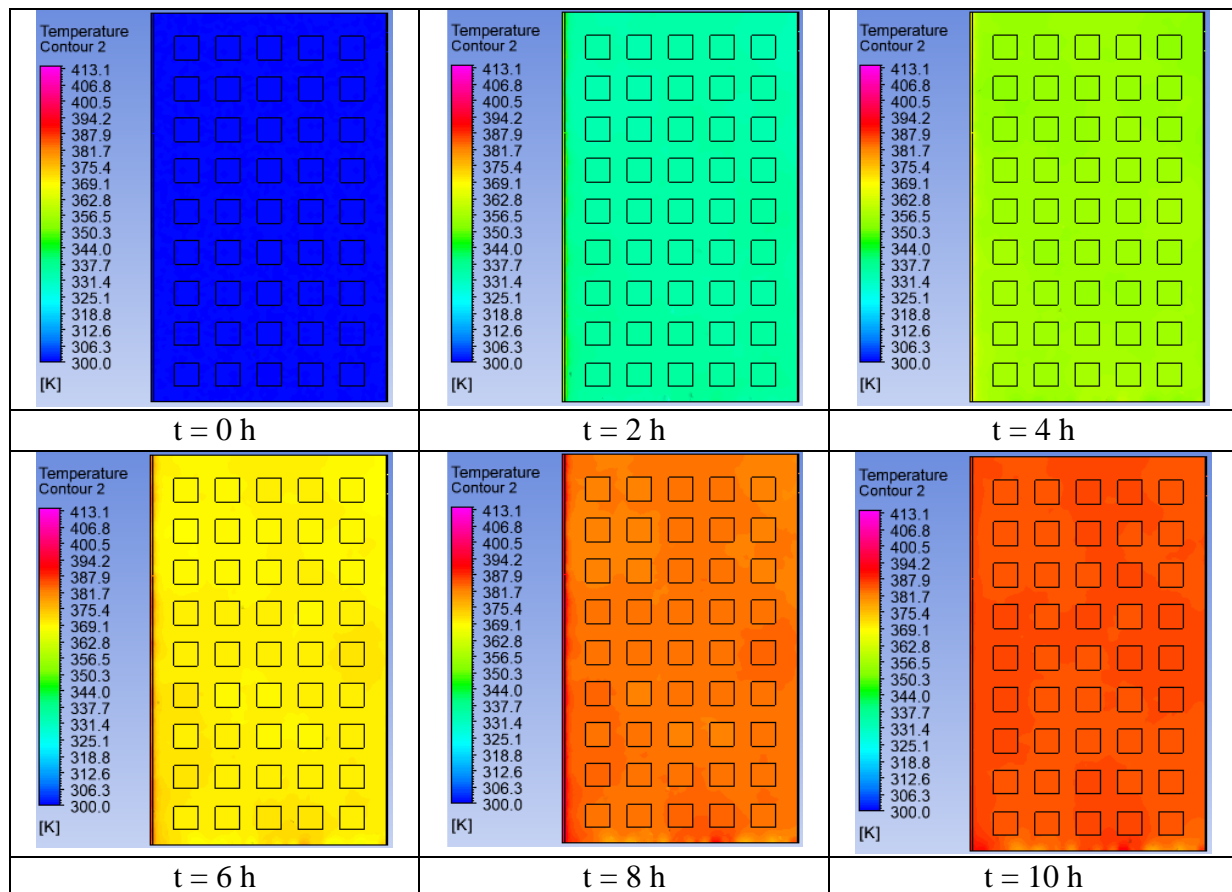


Figure IV.6 : la variation de la température moyenne des cellules photovoltaïques pour le mois d'Octobre.

➤ Etude du champ thermique dans le capteur solaire

Pour mieux comprendre l'évolution d'échange thermique entre l'air, l'absorbeur et les cellules photovoltaïques nous avons exposé les le champ d'évolution de température au niveau les cellules photovoltaïques pendant des durées bien déterminées.

Dans cette section on va interpréter les résultats qui présentent la distribution du champ de température au niveau les cellules photovoltaïques. La figure (IV.6) elle montre une augmentation de température remarquable sur la surface exposée directement au soleil. Nous pouvons remarquer que les cellules photovoltaïques atteindre la température maximale après environ 10 heures. D'autre côté, la diminution de la température des cellules photovoltaïques est dans ce cas-là est faible à cause de faible vitesse d'écoulement.



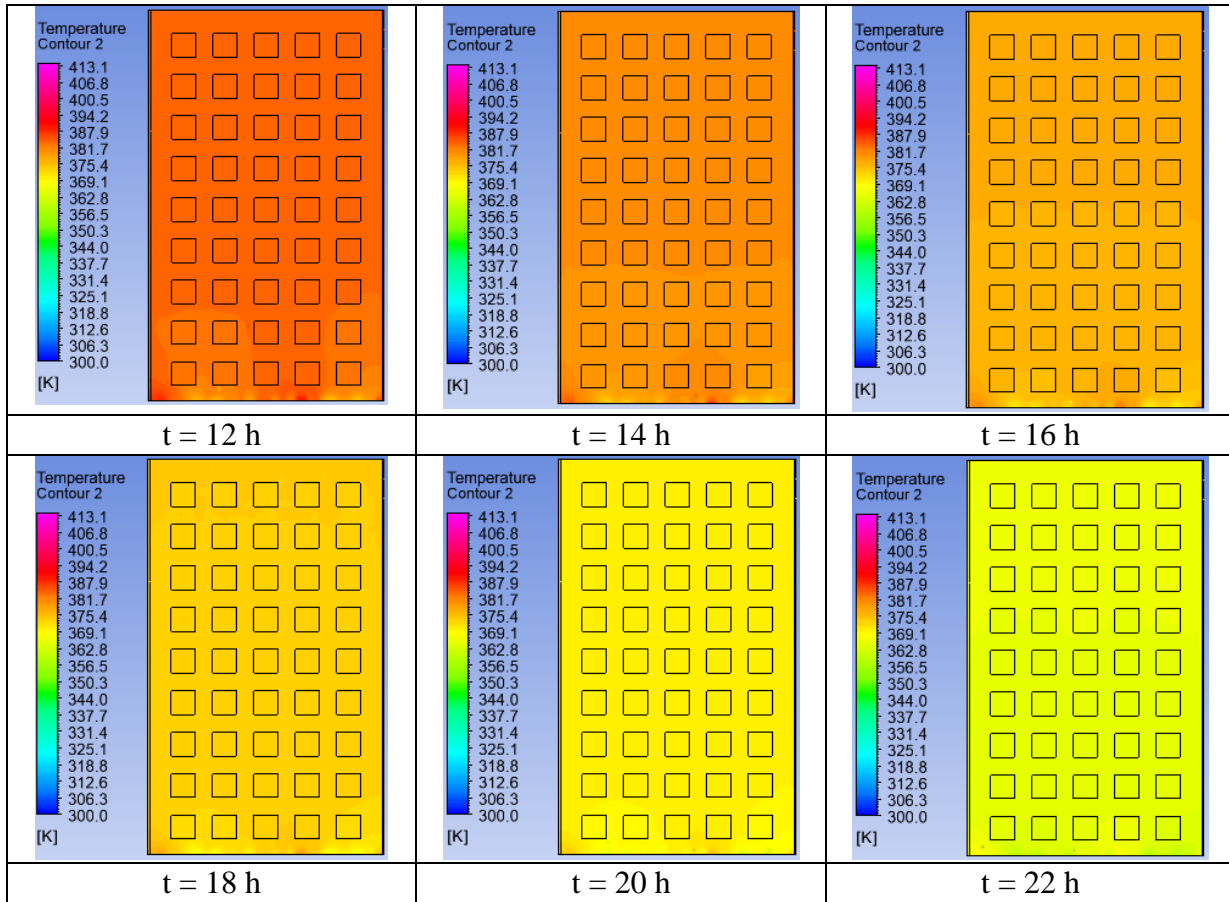
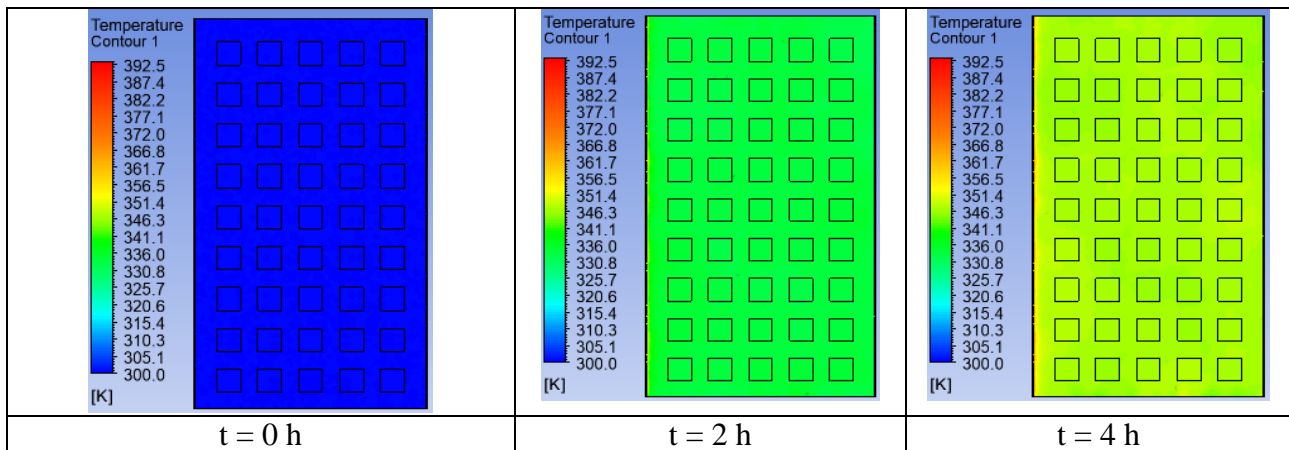


Figure IV.7 : la distribution du champ thermique au niveau les cellules photovoltaïques pour de le mois de Septembre et $V_{in}=0.025m/s$.

La figure (IV.7) illustre la distribution du champ de la température au niveau de la façade exposée directement au soleil calculé pour le mois d’Octobre, cette figure montre une diminution remarquable des cellules photovoltaïques à cause de la vitesse d’écoulement dans ce cas. Donc, l’effet de la vitesse d’écoulement dans les capteurs solaires hybride PV/T est très important pour un bon fonctionnement.



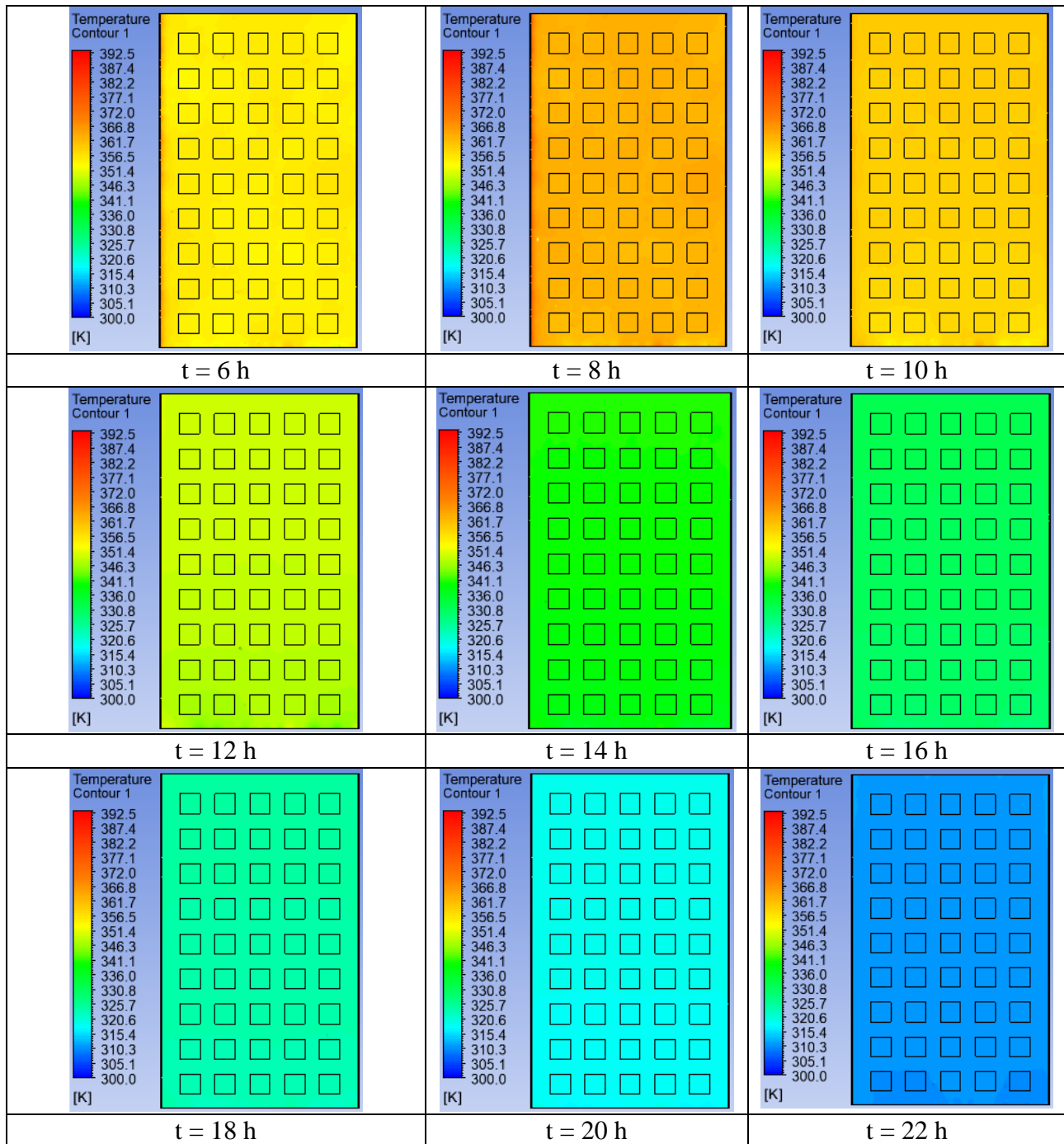


Figure IV.8 : la distribution du champ thermique au niveau les cellules photovoltaïques pour de le mois de Septembre et $V_{in}=0.1\text{m/s}$.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales étapes pour notre simulation numérique et l'interprétation des différents résultats obtenus pour les deux jours type étudiant. La méthode de calcul est basée sur les mesures de la température de l'air à la sortie et la température des cellules photovoltaïques pour analyser les performances thermiques d'un capteur solaire hybride PV/T.

Cette étude nous a permis de montrer qu'à différentes vitesses d'écoulement d'air, on peut augmenter ou diminuer la température des cellules photovoltaïques.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire de fin d'étude, un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique (PV/T) a été étudié numériquement. La simulation numérique a été réalisée par l'utilisation d'un code commercial ANSYS Fluent.

L'étude du comportement thermique du capteur solaire PV/T a été testée en utilisant en prière phase quatre vitesses d'entrée d'air ($V_{in} = 0.1, 0.075, 0.050, 0.025$) m/s. La stabilité du modèle numérique a été testée en utilisant des différentes vitesses d'entrées. L'effet de la variation des vitesses d'entrées de l'air sur le comportement thermique du capteur solaire PV/T est remarquable par l'évolution de la température de sortie. Pour cela, une analyse qualitative a été effectuée. Diminution de la vitesse d'entrée induit une augmentation de transfert thermique acceptable.

Cependant, l'utilisation de faible vitesse d'écoulement d'air permet d'améliorer le rendement du capteur solaire PV/T. L'amélioration de la température du sortie est clairement vu dans les résultats numériques obtenus d'un côté. D'autre côté, l'augmentation de la vitesse d'écoulement d'air permet de referoidir les cellules photovoltaïques.

Finalement, l'amélioration de la performance thermique et l'efficacité énergétique des capteur solair thermique peuvent réduire considérablement la consommation énergétique, ce qui se traduira par une réduction de coût d'exploitation, une réduction des émissions des gas à effet de serre et, par conséquent, un impact moindre sur l'environnement.



Bibliographie

Bibliographie

- 1- ABDELLI Zakaria, expérimentale sur les capteurs solaires thermiques, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, mémoire de Master 2021 /2022.
- 2- Chaïb Sawséne, Cherfi Rania, Etude technico-économique et environnementale de capteur solaire hybride photovoltaïque / thermique (PV/T), université kasdi merbah ouargla, mémoire de Master 2021-2022.
- 3- Selman Mohamed Abd Setar, taïbi Mohamed El Amine, Memoire Licence intitulée en Étude des panneaux solaires photovoltaïques, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR, 2021.
- 4- TOUMI Nihed, KOUDA Iskandar, PROJET FIN D'ETUDE LICENCE, ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME, Université Badji Mokhtar, Annaba, mémoire de master, 2020/2021.
- 5- Dehiri Zohra, etude numerique d'un capture solaire thermique plan dans la region de boussaada, Universite mohamed boudiaf, M'sila, mémoire de master, 2018.
- 6- Aghilas BRAHIMI, Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau Centre de Développement des Energies Renouvelable CDER de Bouzaréah (Alger) Mémoire de Master 2015/2016.
- 7- M. Zenatti Abderrahim, M. Taleb Mohamed Hamza Abdelwahad, ENERGETIQUE Capteur solaire en présence d'un absorbeur muni d'ailettes longitudinales, Université –Ain Temouchent-Belhadj Bouchaïb Faculté des Sciences et de Technologie Département de génie mécanique, Mémoire de master 2021/2022.
- 8- Djelloul BENATIALLAH, Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie, UNIVERSITE AFRICANE AHMED DRAIA ADRAR, Diplôme de Doctorat, 2018 / 2019
- 9- FATMI HAKIM, Système hybride thermique photovoltaïque pour la production de l'eau distillée, UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE, Mémoire de master, 2017.
- 10- TABET Ismail, Étude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire, UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE, Diplôme De Doctorat, 2016.

Bibliographie

- 11- Zaabta Mohammed Yazid, Bakha Ziad, Etude des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air soumis aux conditions climatiques de la région de Laghouat, Université Ammar Telidji-Laghouat, Mémoire de master, 2021/2022.
- 12- Sophie Mergui, UPMC Sorbonne université.
- 13- Aghilas BRAHIMI, Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau, UNIVERSITE DE LORRAINE Faculté des sciences et technologies, Mémoire de Master, 2015/2016.
- 14- TEBOUB Amina, GHOUL Fatiha, Etude d'un capteur solaire thermique plan et stockage de l'énergie solaire thermique, Université de Djilali Bounaama Khemis Miliana, Mémoire de master en physique, 2019 / 2020.
- 15- Bourouis Bilal, Hachani Ibtissem Karima, Modélisation d'un Capteur Photovoltaïque /Thermique, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, Mémoire de master, 2017/2018.
- 16- NOUN MOHAMED SEDIK, Etude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire, UNIVERSITY MOKHTAR-ANNABA, Mémoire de master, 2017/2018.
- 17- Cristina Ventura, Giuseppe Marco Tina, Antonio Gagliano, Stefano Aneli, Enhanced models for the evaluation of electrical efficiency of PV/T modules, University of Catania, Italy 2021
- 18- Y. Slimani, F.Kazi Aoual, Analyse de l'évolution de la construction à Laghouat à travers les méthodes et matériaux de construction, communication international Annaba 2020.