

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Techniques de production industrielle

Présenté par :

Redjem Bilal & Lahciene Hachem

Thème

SIMULATION NUMERIQUE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAIQUE A EAU OU AIR

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
M ^r MOUSSA Ahmed Toufik	MAA	Président
M ^{me} BENKHERBACHE Souad	MCA	Encadreur
M ^{elle} MECHTAAHLEM	Doctorante	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2020

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde.

Mon père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à

Mes parentes Pour leurs éducations et tout l'amour, et toujours

À mes chers frères, sœurs,

À Mes amis, et toute la famille

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu Tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour mener ce travail.

Nos vifs remerciements s'adressent à notre promotrice M^{me} BENKHERBACHE Souad pour son aide, ses conseils, sa disponibilité durant toute la période d'encadrement.

Nous remercions également les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Nomenclature.....i

Liste des figuresiii

Liste des tableaux.....vii

Introduction Générale.....1

Chapitre I : Le Gisement solaire

I.1. Introduction 3

I.2. Le soleil 4

I.3. La constante solaire4

I.4. Les mouvements de la terre 5

I.5. Position du soleil par rapport à la terre 5

I.5.1.Coordonnées géographiques...6

I .5.2.Coordonnées horizontale.....6

I.6. Le rayonnement solaire.....7.

) Le rayonnement solaire hors atmosphère7

) Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol.....8

) L'albédo.....8

I.7. Gisement solaire au sol8

I.8. Gisement éolien en Algérie10

Chapitre II : Energie solaire

II.1.1.Introduction.....15

II.1.2. Applications Techniques de l'énergie solaire.....16

II.1.3 . différentes types d'énergies solaires16

II.1.3.1. Energie solaire Photovoltaïque16

II.1.3.2. Energie solaire thermique.....17

II.2. Conversion thermique.....17

II.2.1. Energie solaire thermique.....17

II.2.2. Technologie de la conversion thermique de l'énergie solaire.....19

SOMMAIRE

II.4.4.1. La technologie du solaire passif	20
II.4.4.2. La technologie du solaire actif	22
II.2.3. Capteurs thermiques.....	29
II.2.3.1. Définition	29
II.3. La conversion photovoltaïque.....	30
II.3.1. Définition	30
II.3.2. Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.....	31
II.3.3. La cellule solaire	31
II.3.4. Capteurs solaire photovoltaïque.....	31
II.3.5. Cellule PV.....	32
III.3.5.1. Différents types des cellules PV.....	33
A. Cellules inorganiques.....	33
B. Cellules au polycristallin.....	33
C. Cellules amorphes	34
III.3.5.2. Cellules en couche mince	35
III.3.5.3. Cellules à concentration	35
III.3.5.4. Cellules organiques.....	36
III.3.6. Les différentes technologies.....	37
II.3.7. Les systèmes photovoltaïques.....	37
III.2. Les capteurs solaires hybrides PVT plan.....	39
III.2.1. Les capteurs solaires hybrides PVT à eau.....	39
III.2.2. Les capteurs solaires hybrides PVT à air	44
III.2.3. Les capteurs solaires hybrides PVT bi-fluide	49
Chapitre III : Modèle Numérique	
III.1. Introduction	54
III.2 Configuration étudiée.....	54
III.3 Hypothèses.....	56
III.4 Equations générales de conservation.....	56
III.5 Modèle de transfert radiatif de Rosseland.....	57
III.6 .1Equation de modèle Rosseland.....	58
III.7 Simulation numérique.....	58
III.7.1 Introduction	58
III.7.2 Présentation du code de calcul	58

SOMMAIRE

III.7.3 Pré - processeur GAMBIT	59
III.7.4 Solveur FLUENT.....	59
III.7.5 Post-processeur FLUENT.....	59
III.8 Etapes principales de simulation.....	60
III.8.1 Construction géométrie.....	60
III.8.2. Conditions aux limites et définition des domaines.....	62
III.8.3 Exportation du maillage de Gambit	63.
III.8.4 Types des fichiers qui sont créés par Gambit.....	64
III.9 Simulation sous FLUENT.....	64
III.9.1 Démarrage de Fluent.....	64
III.9.2 Importation de la géométrie(*.msh)	65
III.9.3 Vrfication du maillage importé.....	66
III.9.4 Vrfication du maillage importé.....	66
III.9.5 Vrfication de l'échelle.....	66
III.9.6 Présentation de la géométrie.....	67
III.9.7 Choix du solveur.....	67
III.9.8 Autorisation du transfert de chaleur.....	68
III.9.9 Choix du type d'écoulement.....	68
III.9.10 Choix du modèle de rayonnement	69
III.9.11 Définir la position pour le calcul solaire	69
III.9.12 Définir les propriétés des matériaux.....	69
III.9.13 Définir les conditions aux limites.....	70
III.9.14 Les facteurs de sous- relaxation.....	71
III.9.15 Initialisation du calcul	72
III.9.16 Choix du résidu	72
III.9.17 Calcul.....	73
III.9.18 Visualisation des résultants.....	73
III.9.19 Sauvegarde de fichier.....	73
III.10 Conclusion.....	74

Chapitre IV : Résultats et Discussions

SOMMAIRE

IV.1.Introduction	75
IV.2.Champs de températures	75
IV.3Champs de vitesses pour l'eau et l'air	81
IV.4 Le rendement.....	82
Conclusion Générale.....	84
Références.....	85

Nomenclature

A:	Surface [m ²]
Cp :	Chaleur spécifique [1/Kg K]
f :	Fluide
G :	Eclairement global [W/m ²]
i :	Isolant
M :	Masse [Kg]
m:	Débit massique [Kg/s]
PV/T :	Photovoltaïque thermique
Qth:	Energie thermique [W]
Re :	Nombre de Reynolds
T :	Température [K]
Ts :	Température de sortie du fluide [K]
Te :	Température d'entrée du fluide [K]
U:	Coefficient des pertes
K :	Conductivité thermique [W/m K]
ε :	Emissivité
ρ :	Masse volumique [Kg/m ³]
v :	Vitesse [m/s]
μ:	Viscosité dynamique [Kg/m.s]
σ :	Constante de Stefan-Boltzmann
γ :	Facteur d'idéalité de la cellule photovoltaïque
δ :	Epaisseur [m]
η :	Rendement [%]
β :	Coefficient de dilatation volumique [1/K]
α :	Coefficient d'absorption
ρ :	Densité [kg.m ⁻³]
Re :	Nombre de Reynolds
Pu :	Puissance utile récupérée par le fluide
<i>P_{ab}</i> :	Puissance solaire arrivant sur le capteur

NOMENCLATURE

A:	Surface de la capture [m^2]
m° :	Débit massique du fluide
G :	Flux solaire global incident
Tv :	Température du vitrage
Is :	Irradiation solaire
h:	Hauteur angulaire ($^\circ$)
i :	Angle d'incidence ($^\circ$)
L :	Longitude ($^\circ$)
:	Latitude ($^\circ$)
:	Angle horaire ($^\circ$)
c :	Angle horaire au coucher du soleil ($^\circ$)
i :	Angle horaire au lever du soleil ($^\circ$)

Liste des figures

Figure I-1: Les mouvements de la terre.....	5
Figure I-2: La longitude et la latitude d'un lieu.....	6
Figure I-3: Coordonnées horizontales.....	7
Figure I-4 : Irradiation globale (W/m^2) au sol.....	9
Figure I-5 : Disque Solaire.....	9
Figure I-6: Carte du monde de l'enseillement moyen annuel.....	10
Figure I-7: Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu moyenne annuelle.....	11
Figure I-8 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol (Hiver et automne, Eté et Printemps)	12
Figure II-1 : Capteur thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire.....	18
Figure II-2 : Deux exemples de modules thermiques.....	18
Figure II-3 : Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.....	19
Figure II-4: Filières de conversion de l'énergiesolaire.....	20
Figure II-5: Schéma du principe mur trombe.....	21
Figure II-6: Schéma d'un capteur à ruissellement.....	23
Figure II-7: Principe des technologies solaires thermiques.....	23
Figure II-8 : Capteur solaire à eau vitré.....	24
Figure II-9 : Capteur solaire sous vide.....	24
Figure II-10 : Chauffage de l'eau des piscines.....	24
Figure II-11 : Principe du chauffe-eau solaire monobloc.....	25
Figure II-12 : Principe du chauffe-eau solaire à éléments séparés.....	25
Figure II-13 : Principe du chauffage de bâtiment par plancher solaire direct (PSD) ou hydro-accumulation.....	26
Figure II-14 : Différents types d'absorbeurs poreux.....	27
Figure II-15 : Différentes formes d'absorbeurs.....	27
Figure II-16 : Types de circulation de l'air dans les capteurs plan air à.....	28
Figure II-17 : Principaux constituants d'un capteur.....	28
Figure II-18 : Principe composants d'un CSP.....	29
Figure II-19: Capteur solaire thermique.....	30

Liste des figures

Figure II-20 : Panneaux solaires photovoltaïques.....	32
Figure II-21: Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	32
Figure II-22: Cellule en silicium monocristallin.....	33
Figure II-23: Cellule en silicium poly-cristalline.....	34
Figure II-24: La cellule en silicium amorphe.....	34
Figure II-25: Cellule en couches minces.....	35
Figure II-26: Capteur PV avec des cellules à concentration.....	36
Figure II-27: Capteur PV avec des cellules organiques.....	36
Figure II-28: Cellule, panneau, champ photovoltaïque.....	37
Figure II-29: Type de cellule photovoltaïque.....	37
Figure II-30: systèmes PV pour raccordes au réseau et isolés.....	38
Figure II-30 : Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général.....	39
Figure II-31 : Schéma de l'échangeur de chaleur à canal convergent avec des modes de transfert de Chaleur.....	40
Figure II-32 : Capteur hybride à eau.....	40
Figure II-33 : Système PVT avec réflecteur.....	41
Figure II-34 : Photo du système PVT à eau.....	42
Figure II-35 : Photo du système de PVT.....	42
Figure II-36. : Système PVT et de la plate-forme d'essai extérieure.....	43
Figure II-37. : Capteur PVT avec ballon de stockage.....	44
Figure II-38. : PVT à air avec et sans vitrage, avec et sans tedlar.....	45
Figure II-39 : Photographie de l'installation expérimentale d'un collecteur d'air hybride PV / T.....	46
Figure II-40 : Systèmes PVT avec circulation d'air.....	46
Figure II-41 : Les différentes configurations étudiées : (a) système conventionnel (b)systèmeavec une feuille de métal (c) système avec ailettes	47
Figure II-42 : Section transversale du système PV.....	47
Figure II-43 : Photo du bâtiment expérimental.....	48
Figure II-44 : Schéma de la conception de capteur PVT.....	48
Figure II-46 : Capteur solaire PVT à deux fluides et à fonctions superposées.....	49
Figure II-47. : Section du prototype bi-fluide initial et localisation interdépendants.....	50
Figure II-48 : Schéma du capteur PVT.....	50
Figure II-49. : La vue en coupe du capteur PVT avec deux canaux pour différents fluides.....	51

Liste des figures

Figure II-50 :a) Vue en coupe b) Vue en perspective du capteur PVT bi-fluide.....	52
FigureIII.1 : Configuration du micro-canal du panneau PV (a), Géométrie étudiée de la section A (b).....	55
Figure III.2 : Lancement de Gambit.....	60
Figure III.3 : Les différentes options de Gambit.....	60
Figure III.4 : La Forme géométrique.....	61
Figure III.5 : Maillage de géométrie.....	61
Figure III.6 : Conditions aux limites.....	62
Figure III.7 : Conditions aux limites.....	63
Figure III.8 : Exportation du maillage.....	63
Figure. III.9 :Vue globale de Fluent.....	65
Figure. III.10 :Importation de la géométrie.....	65
Figure. III.11 : vérifier la qualité de maillage.....	66
Figure. III.12 :vérification de l'échelle.....	66
Figure. III.13 :Affichage de la grille et vérification des conditions.....	67
Figure. III.14 : Choix de solveur.....	67
Figure. III.15 : Autorisation l'équation de l'énergie.....	68
Figure. III.16 : Choix du type d'écoulement.....	68
Figure. III.17 : Choix du modèle de rayonnement.....	69
Figure. III.18 :Calculs solaires.....	69
Figure. III.19 : Définir les propriétés physiques des matériaux.....	70
Figure. III.20 : Choix de la pression de référence.....	70
Figure. III.21 : Valeurs des conditions aux limites.....	71
Figure.III.22 : Choix des facteurs de sous relaxation et les schémas de discrétisation.....	71
Figure. III.23 : Initialisation de la solution.....	72
Figure.III.24 : Choix des résidus.....	72
Figure. III.25 : Choix des nombres des itérations.....	73
Figure. III.26 : Allure de l'évolution des résidus de calcul.....	73
Figure IV.2 : Contours de Températures pour $Re = 433, T_v = 320 \text{ K}$ et $IS = 1900$ W/m^2	77
Figure IV.3 : Contours de Températures $Re = 600, T_v = 320 \text{ K}$ et $IS =$ $1900W/m$	77

Liste des figures

Figure IV.4 :Contours de Températures $Re = 1500, T_v = 320$ Ket $IS = 1900W/m$	77
Figure IV.5 :Contours de Températures $Re = 1500, T = 320$ Ket $IS = 2000W/m^2$	78
Figure IV.6 :Contours de Températures $Re = 1500, T = 380$ Ket $IS = 2000W/m^2$	78
Figure IV.7 :Contours de Températures $Re = 1500, T = 380$ Ket $IS = 1900W/m^2$	79
Figure IV.8 :Contours de Températures $Re = 1500, T = 320$ Ket $IS = 2000W/m^2$	79
Figure IV.9 :Contours de Températures $Re = 1500, T = 400$ Ket $IS = 2000W/m^2$	79
Figure IV.10 : Variation de la Températures du panneau en fonction de	80
Figure IV.11 : Variation de la Températures du panneau en fonction de la température du vitrage.....	80
Figure IV.12 :Contours de Vitesse $Re = 433, T = 320$ Ket $IS = 1900W/m^2$	81
Figure IV.13 :Contours de Vitesse $Re = 433, T = 320$ Ket $IS = 1900W/m^2$	81
Figure IV.14 : Contours de Vitesse $Re = 433, T = 320$ Ket $IS = 1900W/m^2$	82
Figure IV.15 : Rendement du panneau pour $T_v = 320K$	83
Figure IV.16 : Rendement du panneau pour $Re = 1500$ et $IS = 2000W/m^2$	83

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau (I.1): Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	13
Tableau (IV. 1) : Propriétés Physiques de l'air et l'eau.....	75
Tableau (IV. 2) : Paramètres utilisés dans les simulations.....	76

Introduction

Les énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets. Elles sont inépuisables et elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux. Un capteur solaire est un élément essentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire, il capte le rayonnement solaire et le transforme sous forme de chaleur par effet de serre par des matériaux qui ont des grands coefficients d'absorption. Cette chaleur peut être utilisée dans le chauffage de l'eau sanitaire ou pour la climatisation des bâtiments. Il peut également transformer le rayonnement solaire en courant à l'aide de matériaux semi-conducteur appelés cellules solaires.

Le rendement des capteurs solaire thermique et photovoltaïque ou hybride (photovoltaïque thermique) reste encore faible, plusieurs facteurs influent sur la performance du capteur. Cela dépend de leur type d'exploitation, de l'amélioration du pourcentage de captation de rayonnement solaire.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre donne des rappels sur les gisements solaires et la définition des différents types de rayonnement solaire à savoir le rayonnement global, le diffus, le réfléchi et le diffusé.

Le deuxième chapitre, présente les types d'énergies solaires ainsi que les différents capteurs solaires.

Le troisième chapitre, présente le modèle mathématique de la configuration étudiée avec les équations mathématique qui gouvernent le phénomène ensuite les outils de simulation qui sont les logiciels Gambit pour la création de la géométrie et Fluent pour les simulations. Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats de simulation.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion qui généralise les résultats obtenus.

Chapitre I

LE GISEMENT SOLAIRE

I. Gisement solaire

I.1. Introduction :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire Disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système Énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une

Importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise :

- Selon la densité des stations pour lesquelles on a des données ;
- Selon le nombre d'années de mesures disponibles.
- Selon le pas de temps des données (mois, jour, heure)
- Selon la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol etc.....

A cet effet, concernant la mesure du rayonnement solaire en Algérie, le réseau de mesures est peu dense relativement à la superficie du territoire. En effet seules sept stations météorologiques sur la soixantaine que compte le réseau de l'office national de la météorologie assurent la mesure des composantes diffuse et globale du rayonnement solaire reçu sur le plan horizontal.

Pour pallier aux insuffisances des réseaux de mesures, des modèles sont proposés, ils sont basés essentiellement sur l'utilisation des données météorologiques en particulier la durée d'insolation.

Dans ce cadre, l'équipe de recherche en Dans ce cadre, l'équipe de recherche en gisement solaire du laboratoire.

Evaluation du potentiel énergétique, s'est assignée pour objectif le développement d'une méthodologie qui a permis une estimation réaliste du Gisement solaire pouvant être exploité à

des fins énergétiques par les Concepteurs de systèmes solaires. Cette méthodologie consiste d'une part, à valider et développer Bouzaréah où les différentes composantes du rayonnement solaire particulièrement celles obtenues sur des plans d'inclinaison et d'orientation intéressant les concepteurs de systèmes solaires sont mesurées. D'autre part, elle a été étendue à l'ensemble du réseau de mesures en tenant compte de la nature et du type de mesures effectués ainsi que des régimes radiatifs observés. Ainsi, un Atlas préliminaire a été élaboré, il est constitué d'un ensemble de 72 cartes représentant la distribution mensuelle à grande échelle des différentes irradiations solaires utilisées par les concepteurs de systèmes solaires, il s'agit de :

- l'irradiation directe à incidence normale.
- les irradiations de base, la diffuse et la globale mesurées sur plan horizontal.
- l'irradiation solaire globale reçue sur des plans verticaux orientés Est, Ouest et Sud.
- l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et orienté Sud.
.La distribution à grande échelle de sa moyenne annuelle. [1].

I.2. Le soleil :

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre.

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à 4×10^{26} W. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7 \times 10^{17}$ W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère [2] ; [3].

I.3. La constante solaire :

La valeur du rayonnement solaire "IC", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne "I₀" appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m^{-2} . En première approximation, on peut

calculer la valeur de "IC" en fonction du numéro du jour de l'année " j" par la relation suivante[4].

$$I_C = I_0 [1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times j)] \tag{I.1}$$

I.4. Les mouvements de la terre:

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de :

$$T_r = 23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h.}$$

La vitesse linéaire de rotation à l'équateur est ;

$$V_r = 0,465\text{km/s.}$$

Elle est variable en fonction de latitude telle que :

$$V_r(\varphi) = V_r \cos \varphi \tag{I.2}$$

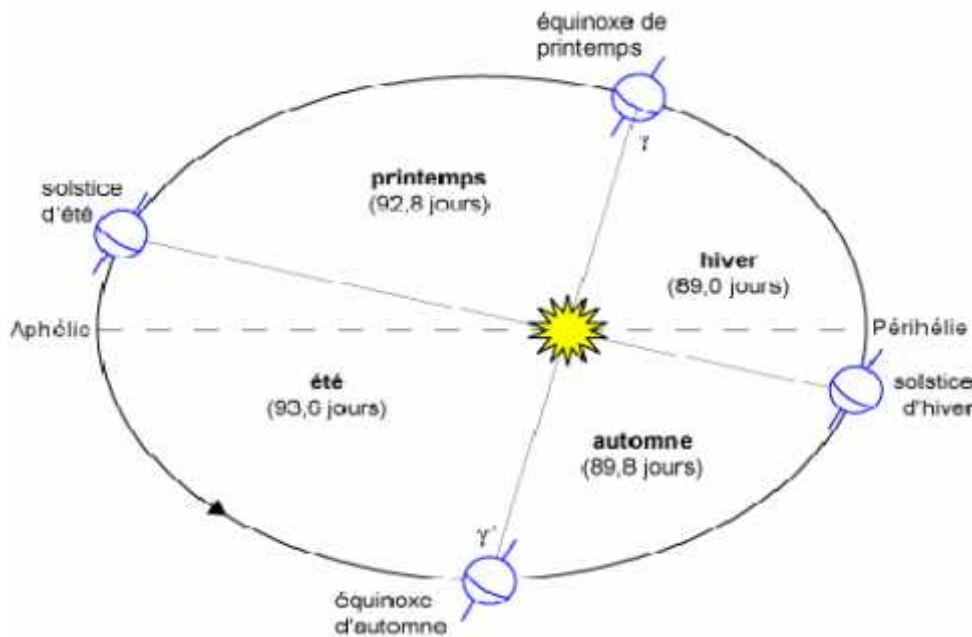


Figure I.1: Les mouvements de la terre [5].

I.5. Position du soleil par rapport à la terre :

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

I.5.1.Coordonnées géographiques :

Sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre

a) **La longitude (L) :** l'est est comptée positivement de 0 à $+180^\circ$ vers l'est négativement de 0 à -180° vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

b) **La latitude () :** permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle est comptée positivement de 0 à $+90^\circ$ vers le Nord et négativement de (0 à -90°) vers le Sud, notons que la latitude est égale à la hauteur du pôle.

c) **L'altitude A:** C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de réfère.

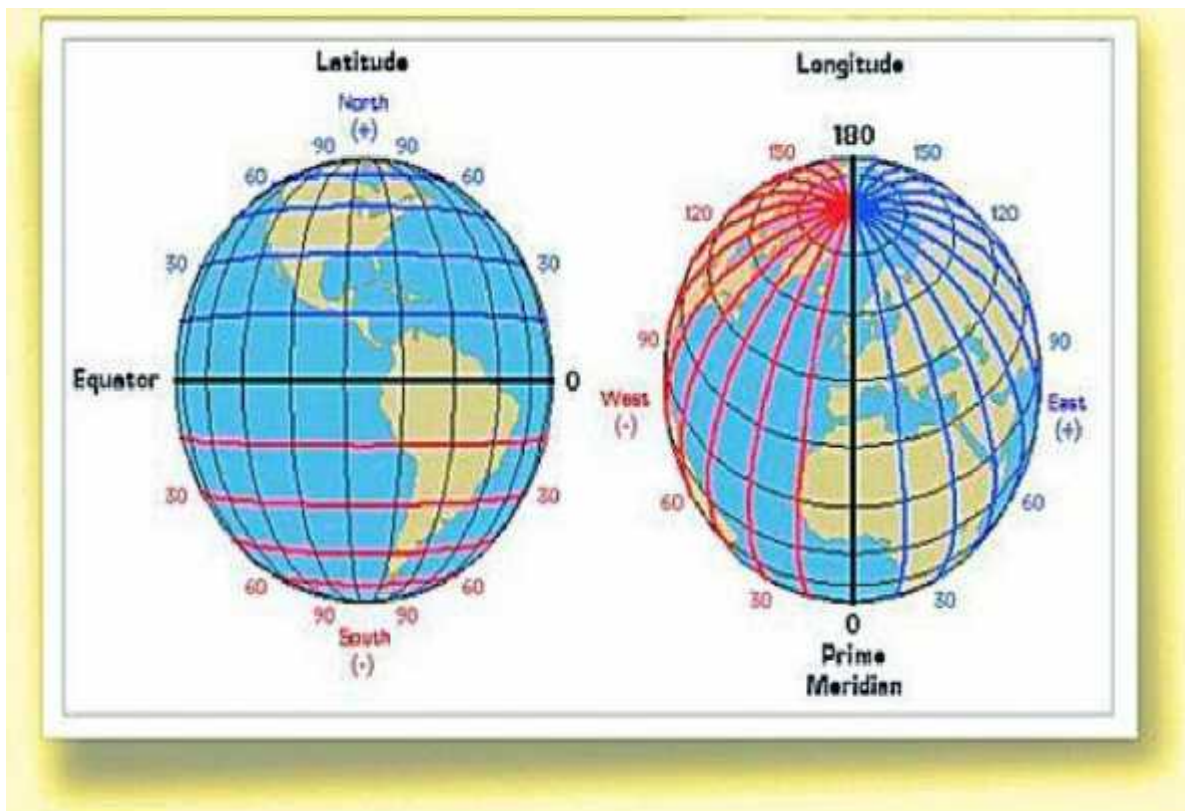


Figure I.2 : La longitude et la latitude d'un lieu.

I.5.2.Coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu.

a) **La hauteur du soleil (h):**

Est l'angle entre la direction du soleil et sa projection. Elle est comptée positivement de 0 à $+90^\circ$ vers le zénith et négativement de 0 à -90° vers le nadir. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \dots \dots \dots (1.3).$$

b) L'azimut (a) :

Est l'angle entre la direction de soleil et la direction de sud. On peut le compter positivement de 0 à +180° vers l'ouest et négativement de 0 à -180° vers l'est. La relation qui donne l'azimut est donné par :

$$\sin a = \frac{s \delta \cos \omega}{c n} \dots \dots \dots (1.4).$$

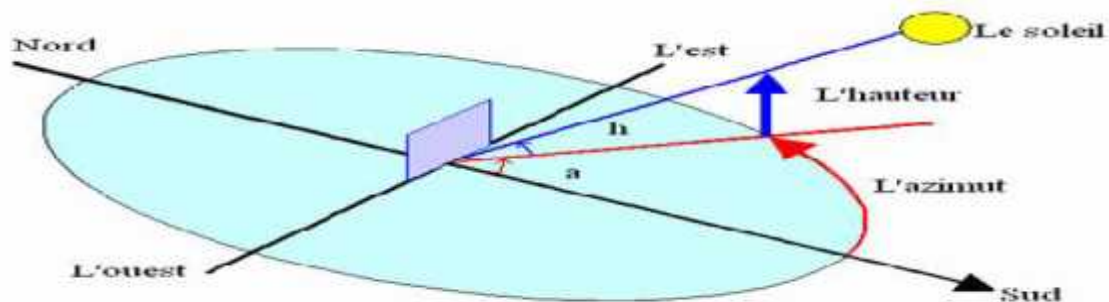


Figure I.3 :Coordonnées horizontales [6].

I.6. Le rayonnement solaire :

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

Le rayonnement solaire est caractérisé par différentes caractéristiques dont la plus importante est la constante solaire, qui est une donnée fondamentale indépendante des conditions météorologiques [8].

La deuxième caractéristique du rayonnement solaire est sa répartition spectrale, qui est à peu près celle d'un corps noir à 5800°k. Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont les longueurs vont de 0,25 micromètres à 4 micromètres [7], [8]. La figure 1.21 donne l'allure du spectre solaire [6].

A. Le rayonnement solaire hors atmosphère :

Le rayonnement solaire hors atmosphère ne dépend que des paramètres astronomiques, il est caractérisé par une donnée fondamentale appelée constante solaire [7], [8].

B. Le 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 [7], [8] :

➤ **Rayonnement direct :**

Est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

➤ **Le rayonnement diffus :**

Est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

➤ **Le rayonnement global :**

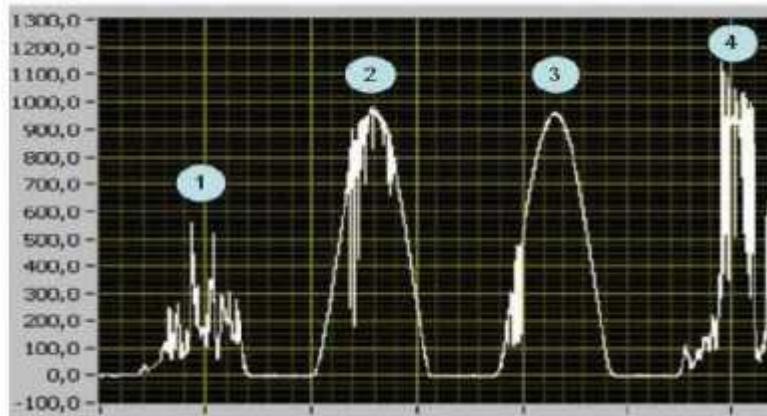
Est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La figure illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.[9]

C. L'albédo :

Est la partie réfléchi par le sol. Dépend de l'environnement du site. La neige par exemple renvoie énormément de rayons solaires alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun il faudra tenir en compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. On définit l'albédo comme le rapport réfléchi au sol par une surface et l'énergie incident par le soleil.

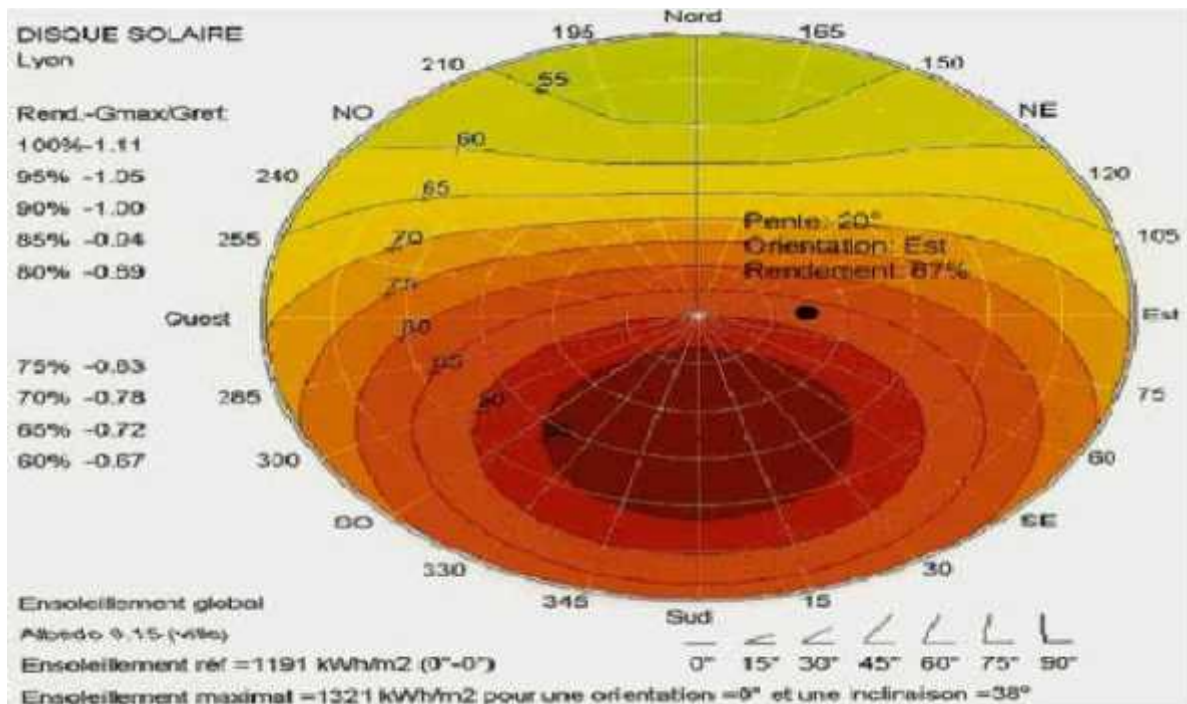
I.7. Gisement solaire au sol

Le gisement solaire au sol est très variable comme présenté sur la figure 1.4. Nous constatons une variabilité importante les jours nuageux (1) par rapport aux jours avec éclaircies (2) et les jours de soleil (3). L'irradiation du soleil les jours nuageux est environ 200W/m^2 alors qu'elle est de 1000W/m^2 pour les jours ensoleillés. La présence de nuages modifie sensiblement l'importance des rayonnements du soleil, les nuages jouant un rôle de.



FigureI.4 : Irradiation globale (W/m²) au sol

Par ailleurs, l'orientation et l'inclinaison sont essentielles. D'après l'exemple de la figure I-4, l'idéal est une orientation plein sud. Néanmoins on voit que avec une orientation Est et une pente de 20° le rendement est d'environ 87% (donc 13% de pertes par rapport au plein sud). Sur le disque solaire de la figure 1.6, on constate que dans toutes les orientations et inclinaisons, les pertes par rapport à un positionnement optimal restent inférieures à 50%, ce qui montre que l'on peut généralement utiliser l'énergie solaire quelle que soit le positionnement[10].



FigureI-5 : Disque Solaire [2].

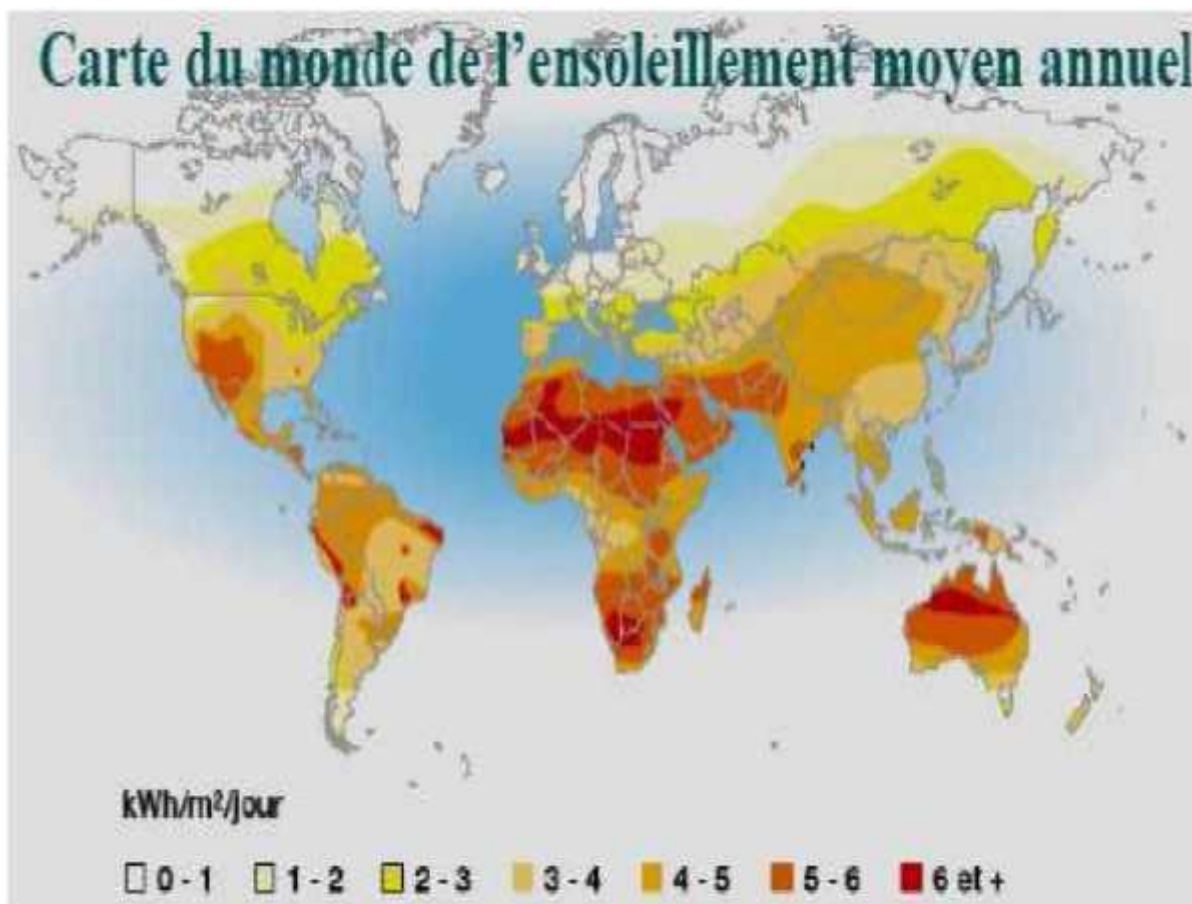


Figure I-6: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [11].

I.8. Gisement éolien en Algérie :

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grands zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'Atlas ténésien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s, qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est plus élevée. On note cependant l'existence de microclimats sur les sites côtiers de Oran, Bejaia et Annaba sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [12].

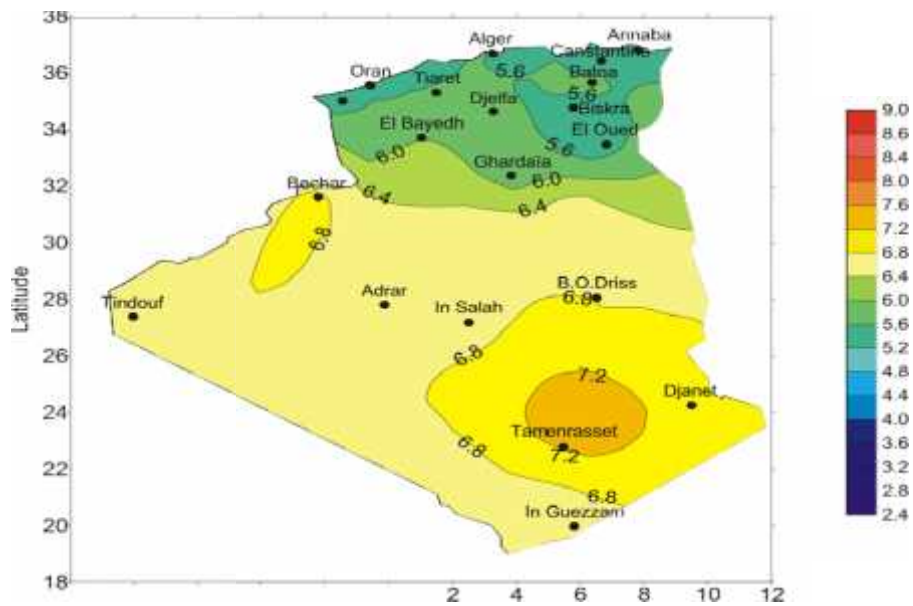
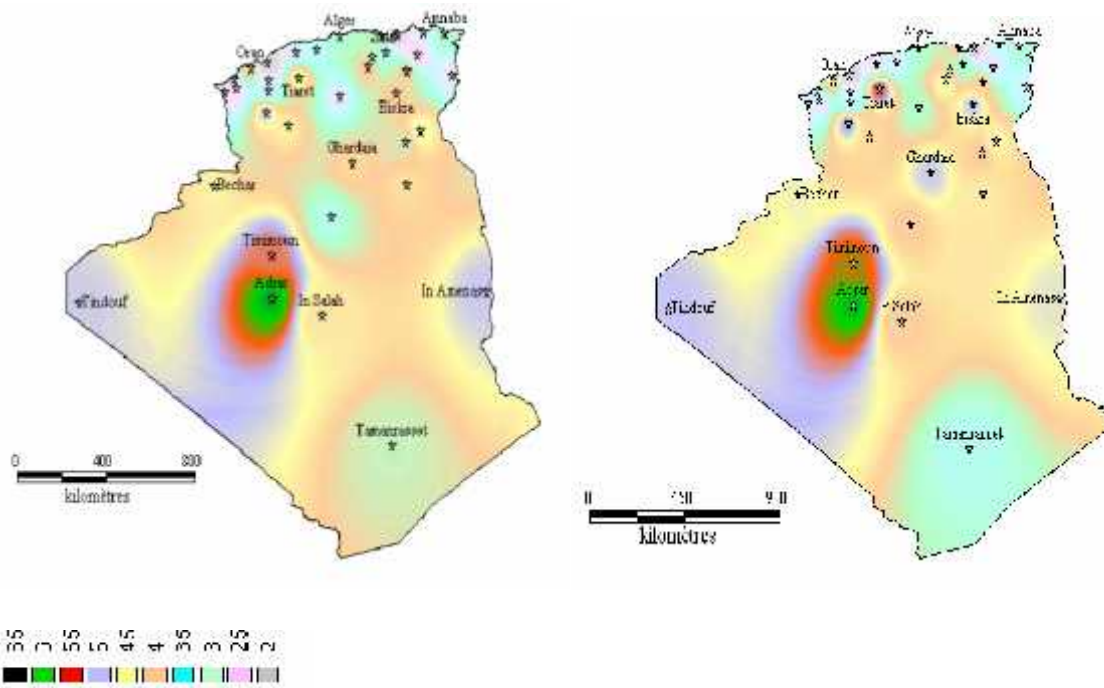


Figure I-7 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu : moyenne annuelle

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont Représentés en figures 1-10 (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On Remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le Reste de l'année

Eté Printemps



Hivers

Autom

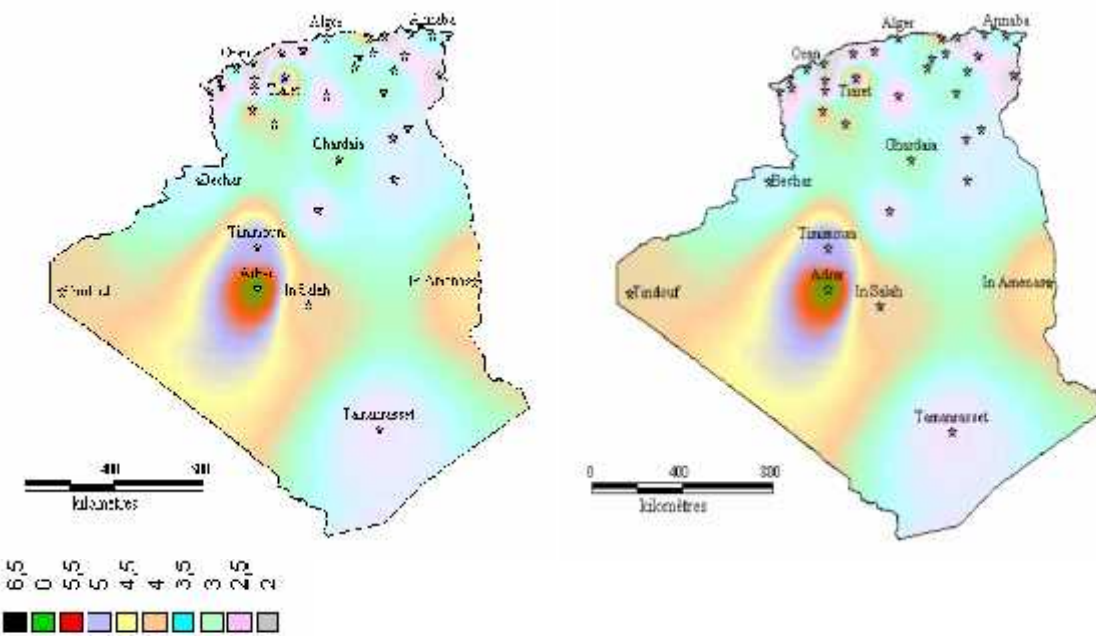


Figure I-8: Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps) [13]

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [14]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde, comme illustré sur la carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

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

Regions	Regions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficies	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	650	3000	3500
Energie moyenne recue	1700	1900	2650

Tableau I.1: Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6KW/m² et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 KWh/m², la carte suivante représente les zones énergétiques en Algérie. Comme on peut le constater il existe quatre zones énergétiques en Algérie.

CHAPITRE II

L'ENERGIE SOLAIRE

II.1. Energie solaire

II.1.1. Introduction :

L'énergie solaire vient des rayonnements du soleil, la chaleur du soleil dans les photons est utilisée pour créer de l'électricité, c'est l'énergie solaire photovoltaïque et de la chaleur c'est l'énergie solaire thermique. Il y a deux types de technologie pour l'exploitation des rayonnements du soleil. Il y a les technologies actives et les technologies passives. Les premières transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. Les secondes par contre, consistent à pratiquer des techniques pour bien orienter les bâtiments par rapport au soleil, à utiliser des matériaux spéciaux, et des modèles architecturaux pour les maisons d'habitation ou des bâtiments qui permettent d'exploiter l'énergie solaire.

Caractères particuliers :

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes :

-) Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1kW/m^2 à midi par ciel bleu sur toute la planète.
-) La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol (1kW/m^2) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.
-) Elle est abondante, notre planète reçoit plus de 104 fois l'énergie que l'humanité consomme.
-) Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
-) L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective et rayonnante.
-) Elle est propre. [15].

L'énergie solaire est inépuisable, gratuite et non polluante et même si l'énergie solaire reçue par la terre est d'intensité variable, intermittente et peu dense, son utilisation offre de nombreuses possibilités. Parmi ses nombreuses applications, on distingue le solaire thermique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur et le solaire photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité [16].

La plus grande partie de l'utilisation de l'énergie solaire est consacrée au réchauffement de la terre, ce qui rend possibles les formes connues d'existence biologique à proximité de la surface, suivie par la photosynthèse des plantes. La plupart des organismes, y compris les humains, dépendent soit directement (en tant qu'herbivores), soit indirectement (en tant que carnivores) de l'énergie solaire. Le combustible et les matériaux de construction en découlent également. Par ailleurs, l'énergie solaire est responsable des différences de pression d'air dans l'atmosphère, qui sont à l'origine du vent. Enfin, le cycle hydrique de la terre est entraîné par l'énergie solaire.

Outre ces « effets » naturels, il existe de plus en plus d'applications techniques, en particulier dans le domaine de l'approvisionnement énergétique. [17].

II.1.2. Applications Techniques de l'énergie solaire :

En s'appuyant sur la technologie solaire, l'énergie solaire peut être profitable de plusieurs façons :

⌋ Les Cellules solaires produisent de l'électricité à courant continu (photovoltaïque).

⌋ Les Panneaux solaires génèrent de la chaleur (thermo solaire).

⌋ Les Centrales héliothermiques génèrent de l'électricité à partir de la chaleur et de la vapeur.

⌋ Les plantes et les déchets végétaux peuvent être traités pour produire des.

Liquides exploitables (par ex. éthanol, huile de colza) ou des gaz (comme du biogaz).

⌋ Les centrales éoliennes et hydroélectriques génèrent de l'électricité (

⌋ Les cuisinières solaires ou les fours solaires permettent de réchauffer les aliments ou de stériliser les équipements médicaux [17].

II.1.3. Différents types d'énergies solaires

II.1.3.1. Energie solaire Photovoltaïque :

Le phénomène photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'échelle atomique. Les systèmes photovoltaïques peuvent ainsi alimenter de petits équipements portables (montres, calculatrices, ...), des applications en site isolé (habitations éloignées du réseau électrique, équipements de télécommunication, électrification rurale), ou être raccordées au réseau électrique. La simplicité de l'installation, la facilité d'exploitation et le caractère silencieux de la production électrique sont des atouts considérables pour des applications dans le bâtiment [18].

II.1.3.2. Energie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz).

L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par le soleil en électricité.

II.2. Conversion thermique.

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser : En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire. En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

II.2.1. Energie solaire thermique

Le solaire thermique actif permet de transmettre la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre des capteurs solaires. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage. [19]

Le capteur solaire est l'instrument utilisé pour transformer le rayonnement solaire en chaleur. Les principes physiques fondamentaux sur lesquels se basent cette production d'énergie sont notamment l'absorption, et la conduction thermique. Dans le cas particulier des systèmes à concentration (centrale solaire thermodynamique, four solaire, etc.), la réflexion joue aussi un rôle important [20].

Le principe de fonctionnement des capteurs thermiques est décrit comme suit pour commencer, le rayon solaire traverse une plaque de verre transparente ; le rayon lumineux sera alors absorbé après avoir passé la plaque de verre, par une plaque de métal noir qui absorbera environ 80 à 90% des rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est transmise à un circuit d'eau qui alimente un circuit secondaire qui, à son tour, alimente une habitation en eau sanitaire ou en chauffage. Les constituants d'un panneau solaire thermique sont montrés, sur la figure (4). Il est composé d'un corps qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant

d'un système de refroidissement par le fluide caloporteur (transportant l'énergie) ; d'un isolant thermique situé sur les faces non exposées au rayonnement et d'une couverture transparente sur la face, exposée, destinée à assurer l'effet de serre à l'intérieur du capteur.

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou la production d'eau chaude sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [21].

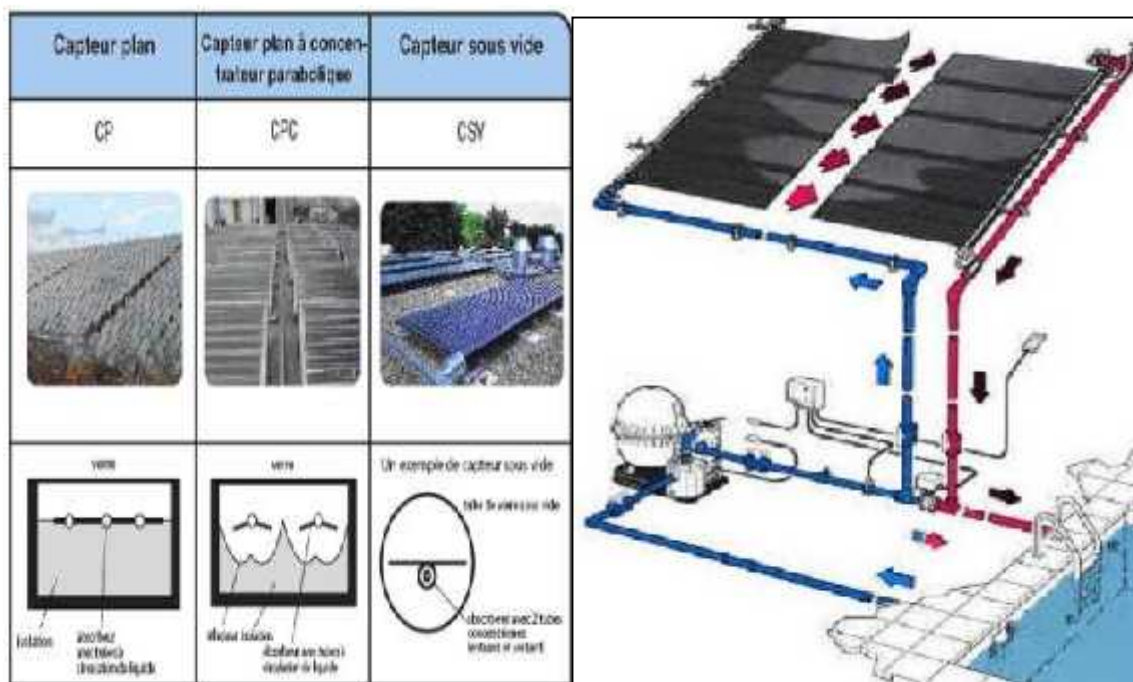


Figure II-1 : Capteur thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire



Figure II-2 : Deux exemples de modules thermiques

Le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique est montré par la figure-03. Pour.

Commencer, le rayon solaire traverse une plaque de verre transparente ; le rayon lumineux sera alors

Absorbé après avoir passé la plaque de verre, par une plaque de métal noir qui absorbera environ 80 à

90% des rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est transmise à un circuit d'eau qui alimente un

Circuit secondaire qui, à son tour, alimente une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

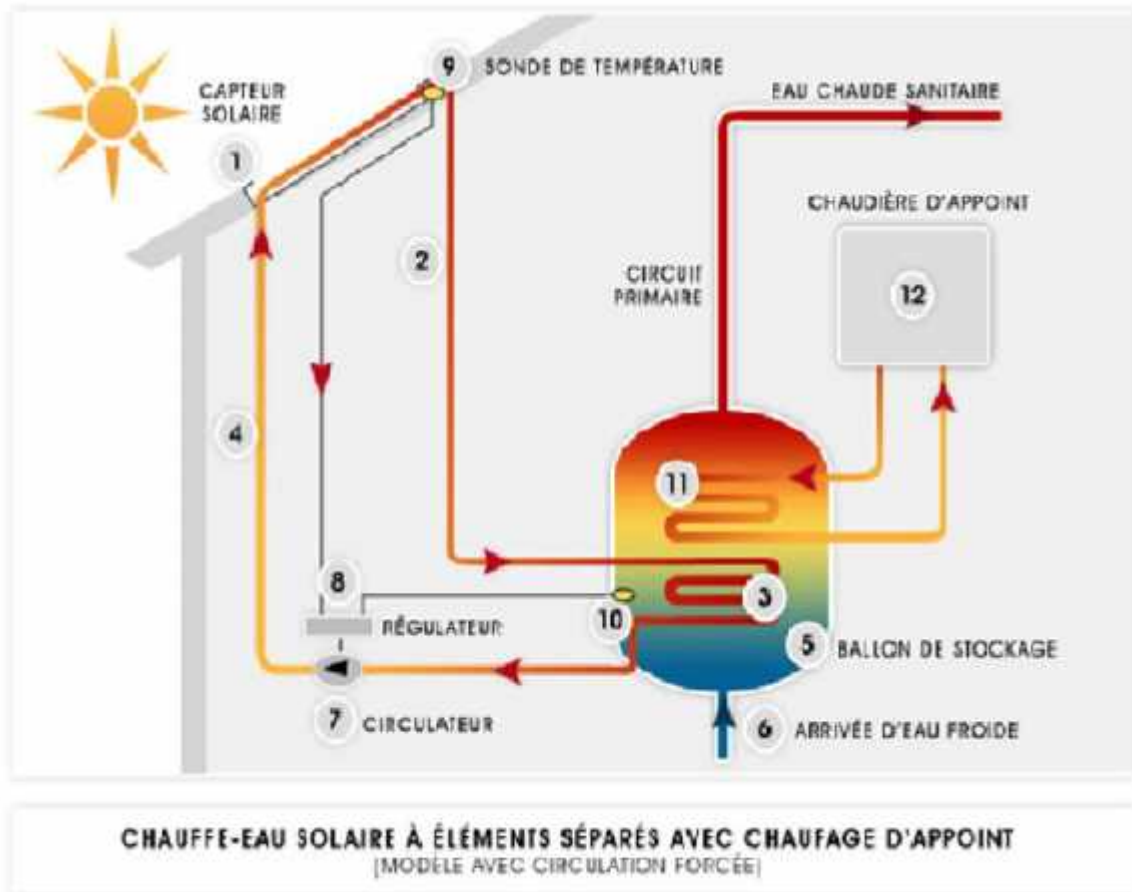


Figure II-3 : Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

II.2.2. Technologie de la conversion thermique de l'énergie solaire :

Les technologies permettant de convertir l'énergie solaire sont de deux formes : en chaleur (énergie thermique) ou en électricité. Selon les besoins énergétiques plusieurs filières d'exploitation de l'énergie solaire sont disponibles;



Figure II-4 : Filières de conversion de l'énergie solaire

Nous nous intéressons dans ce qui suit à la conversion thermique de l'énergie solaire. On peut

classifier les systèmes solaires selon la température fournie :

Basse et moyenne température (100°C)

- Chauffage central.
- Eau chaude sanitaire.
- Réfrigération.
- Dessalement de l'eau de mer.
- Séchage des fruits, des légumes,....etc.

Haute température ($>200^{\circ}\text{C}$)

- Procédés thermiques, Stérilisation.

II.2.2.1. La technologie du solaire passif :

Le rayonnement solaire est d'une utilisation dite passive lorsque ce rayonnement réchauffe directement les locaux du bâtiment, soit en pénétrant par les fenêtres ou soit en s'accumulant dans des masses calorifiques.

Dans le secteur du Bâtiment : Utilisé pour le chauffage, la réfrigération ou l'éclairage naturel d'une habitation, dans ce domaine la conception de bâtiments et l'appropriation des composants de construction adaptés afin d'utiliser le rayonnement solaire pour l'éclairage naturel, le chauffage des locaux et la climatisation des locaux.

Les fenêtres d'un bâtiment sont le lieu de chauffage solaire passif des locaux. Choisir des fenêtres avec un plus haut taux d'énergie pour économiser plus d'énergie, ou pour une meilleure utilisation de celle-ci. Les fenêtres devraient être principalement situées du côté sud, et moins possible des côtés ouest et est du bâtiment afin d'éviter un excès de chaleur. Au cours d'une année, la perte d'énergie, pour la plupart des fenêtres, est plus importante que le gain en énergie. Les fenêtres à haut rendement thermique peuvent réellement fournir de l'énergie utile, elles ont un meilleur rendement en terme d'énergie utile annuelle que les parois isothermes les mieux isolées. Concevoir le bâtiment de façon appropriée, ses composants comprennent une grande masse thermique afin de conserver la chaleur. Enfin concevoir une architecture qui profite du principe du mur Trombe [22].

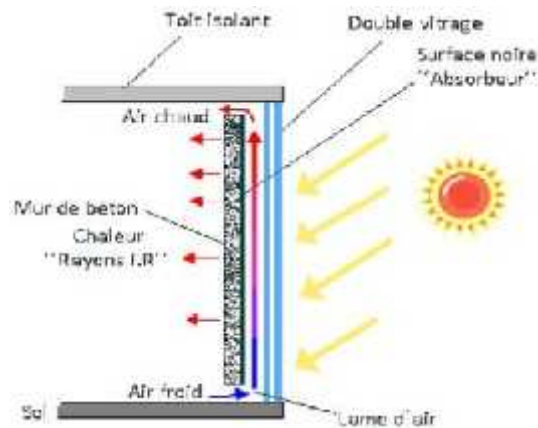


Figure II-5 : Schéma du principe mur trombe [22].

Rafraîchissement des locaux : utilisé dans les sites de climats chauds :

- Permettre à de l'air extérieur, plus frais, de pénétrer dans le bâtiment par le plancher ; cet air peut circuler à travers un conduit situé dans le sol de façon à être refroidi encore plus (rafraîchissement par lagéothermie).

- Ouvrir les fenêtres lorsqu'il faut refroidir le bâtiment

- Fermer les autres fenêtres du bâtiment afin que seul l'air provenant du niveau le plus bas pénètre dans le bâtiment.

- Placer les fenêtres aux étages supérieurs du bâtiment afin que cette section soit chauffée par le soleil pendant la saison chaude.

L'air chauffé situé dans le haut du bâtiment est refoulé à l'extérieur de façon naturelle et remplacé par de l'air plus froid dans la section plus basse de la maison, effet «cheminée».

- Éclairage naturel : Pour un confort meilleur, les gens préfèrent un éclairage naturel à un éclairage artificiel, puisque les fenêtres à haut rendement thermique peuvent produire un éclairage naturel à l'intérieur d'une maison, avec un faible coût annuel de chauffage.

- Dans le secteur agricole (les Serres) : Généralement les serres agricoles ne sont pas bien isolées. L'énergie solaire contribue à la demande en énergie, en utilisant une enveloppe permettant une bonne isolation tout en laissant la transmission de l'ensoleillement nécessaire à la croissance des plantes.

II.2.2.2. La technologie du solaire actif :

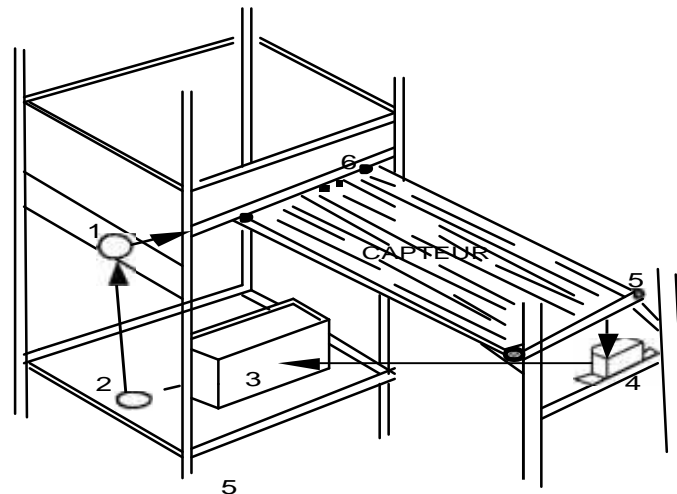
Le rayonnement solaire peut être utilisé pour chauffer un fluide, on parle de chauffage solaire actif. L'élément de base du chauffage solaire actif est le capteur solaire. Les différentes technologies de capteurs existantes sont :

-) Capteurs solaires sans vitrage : les plus simples, qui atteignent les niveaux de températures les moins élevés, utilisés principalement pour le chauffage des piscines qui est l'une des premières utilisations faites du solaire thermique dans certains pays.
-) Capteurs solaires plans : composés d'un vitrage qui laisse traverser le rayonnement solaire, d'un absorbeur en cuivre ou aluminium, d'un collecteur constitué de tubes en cuivre dans lequel circule le fluide. Le tout est isolé thermiquement en face arrière. Ils sont principalement destinés à la production d'eau chaude
-) Capteurs solaires à tube sous vide : composés d'un ou plusieurs tubes en verre dans lesquels un vide est créé afin de limiter les pertes thermiques.
-) Les capteurs fixes à fonction thermique donnent lieu à une très grande diversité de modèles, ils se distinguent en particulier par le fluide caloporteur utilisé, en effet il existe :

a- Les Capteurs utilisant des liquides comme caloporteurs et constituent ce que l'on appelle, les capteurs à eau ;

- Capteurs à ruissellement :

La caractéristique principale de ce type de capteurs est que le fluide caloporteur s'écoule librement sous l'effet de la gravitation pour refroidir la surface exposée au soleil. Le fluide caloporteur utilisé, peut-être de l'eau traitée anti-calcaire ou anti-algues ou bien une huile ayant une viscosité plus grande que celle de l'eau. Il y'a une limite à ce dispositif qui provient du risque d'évaporation du fluide caloporteur et à sa condensation sur la face interne de la vitre ce qui aurait pour conséquence de diminuer le rayonnement atteignant l'absorbeur. Pour ces raisons le choix du caloporteur est d'une grande importance.



1-compteur volumétrique 2-pompe 3-stock 4 - cuve isolée (mesure de Ts) 5- gouttière isolé
6- distributeur isolé

Figure II-6 : Schéma d'un capteur à ruissellement [23]

- Capteurs à eau :

Le principe de fonctionnement de ce genre de capteurs est basé sur la circulation du fluide caloporteur sous une certaine pression. On distingue donc des systèmes à basse pression de circulation et des systèmes à haute pression de circulation pour lesquels la circulation de l'eau se fait généralement dans des tubes de cuivre soudés sur des plaques métalliques noircies.

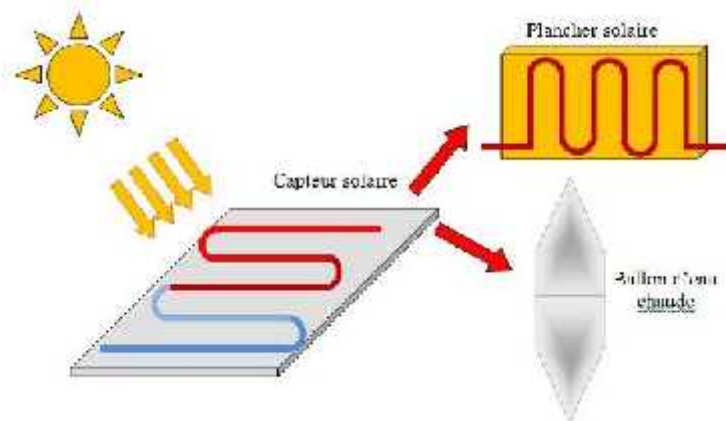


Figure II-7 : Principe des technologies solaires thermiques



Figure II-8: Capteur solaire à eau vitré [24]

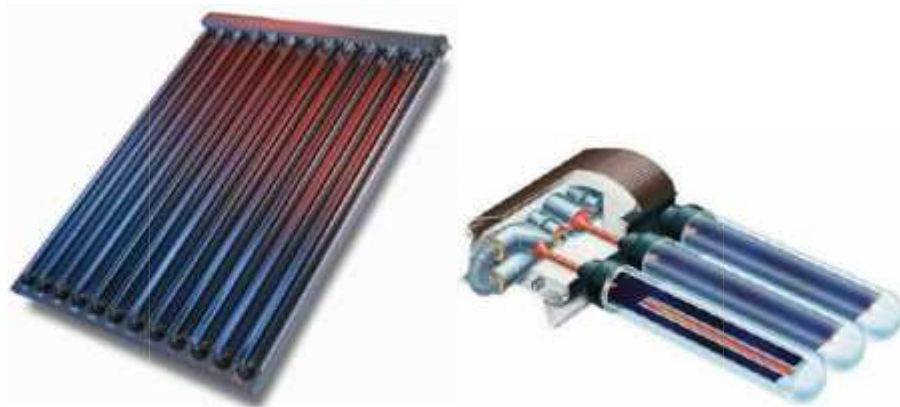


Figure II-9 : Capteur solaire sous vide [24]



Figure II-10 : Chauffage de l'eau des piscines [24]

- Le chauffe-eau solaire monobloc :

Cette technique profite de l'effet thermosiphon, les capteurs sont dissociés du système de stockage. La circulation est naturelle, la différence de température est responsable de la circulation du fluide.

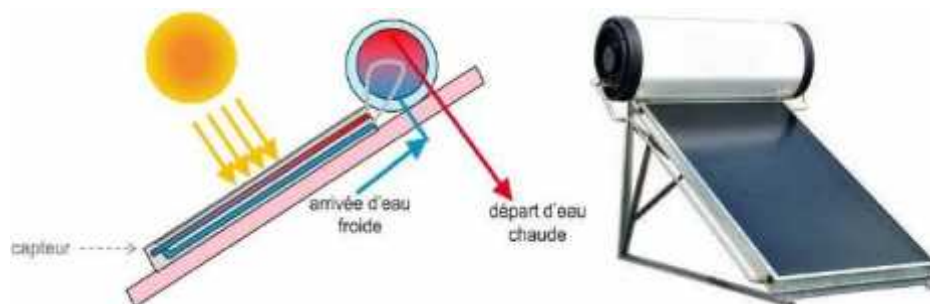


Figure II-11 : Principe du chauffe-eau solaire monobloc [25]

-Chauffe-eau à éléments séparés : La technique est telle que la circulation du fluide caloporteur est forcée. En effet le capteur solaire peut être placé sur une toiture, mais, l'élément de stockage est dissocié et placé à l'intérieur du bâtiment. Un antigel est souvent ajouté au fluide caloporteur et le ballon est placé à l'intérieur de l'habitat. L'installation peut avoir plusieurs éléments de stockage pour les installations collectives, ou un stockage centralisé.

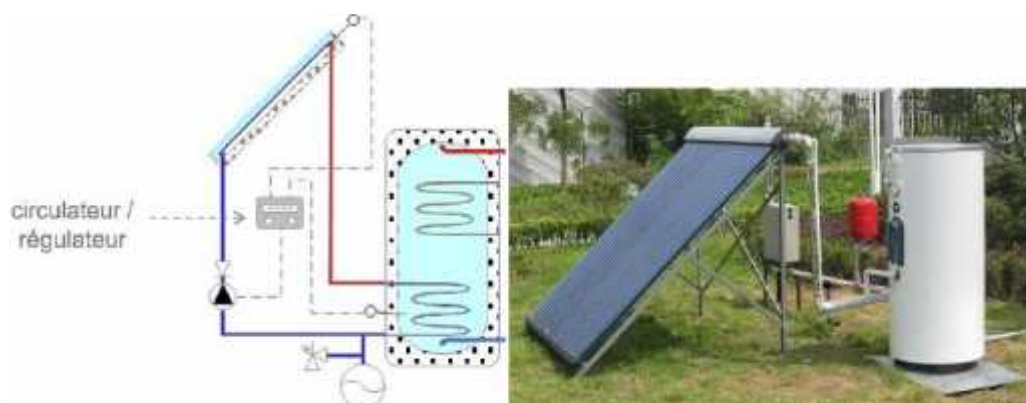


Figure II-12 : Principe du chauffe-eau solaire à éléments séparés [25]

- Le chauffage d'un bâtiment:

Le fluide caloporteur circule à travers le bâtiment et diffuse sa chaleur.

Le plancher solaire direct (PSD) est constitué d'un réseau de tuyaux qui parcourt le plancher et diffuse la chaleur dans le bâtiment. Le réseau de distribution peut aussi être relié à une chaudière. Le fluide caloporteur peut alors être stocké.

L'hydro-accumulation consiste à stocker la chaleur dans un ballon (de 0.5 à 1 m³), et peut être utilisée pour le chauffage de l'eau ou le chauffage domestique.



Figure II-13 : Principe du chauffage de bâtiment par plancher solaire direct (PSD) ou hydro-accumulation [25]

B- Les capteurs utilisant des gaz comme caloporteurs et constituent ce que l'on appelle les capteurs à air ;

Ces capteurs qui utilisent l'air comme fluide caloporteur, peuvent être des capteurs à une ou à deux couvertures, dans lesquels, l'air circule soit à travers l'absorbeur soit entre l'absorbeur et la vitre, soit sous l'absorbeur, soit des deux côtés de l'absorbeur et enfin pour des absorbeurs soit perméables, soit plans, soit à géométrie variable.

On distingue donc :

- Capteurs à absorbeurs poreux:

Pour lesquels l'absorbeur est une matrice poreuse où le rayonnement incident pénètre dans la masse de l'absorbeur donc une absorption volumique de ce dernier, cette pénétration fait donc que la température de la face avant du capteur est plus basse par comparaison à un capteur à absorbeur plan. Il s'ensuit donc une réduction des pertes thermiques avant du capteur.

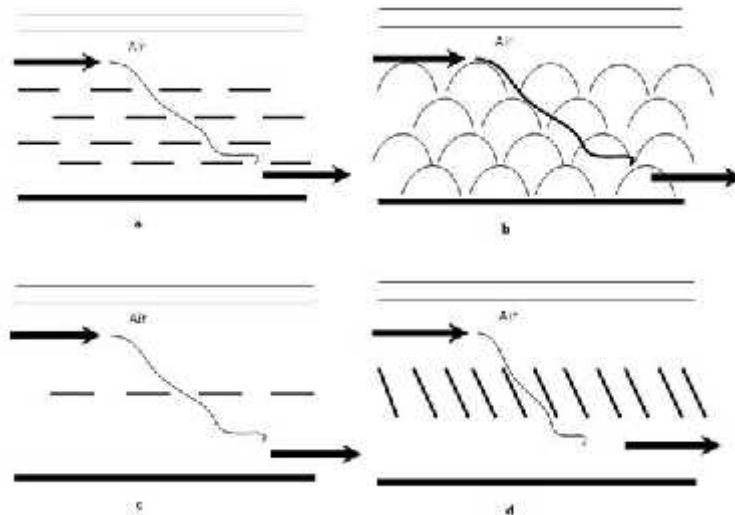


Figure II-14 : Différents types d'absorbeurs poreux

- Capteurs à absorbeurs à géométrie variable :

Ces capteurs se présentent sous de nombreuses variantes, l'idée principale consiste à jouer sur la géométrie de l'absorbeur de manière à améliorer l'échange thermique entre l'air et ce dernier.

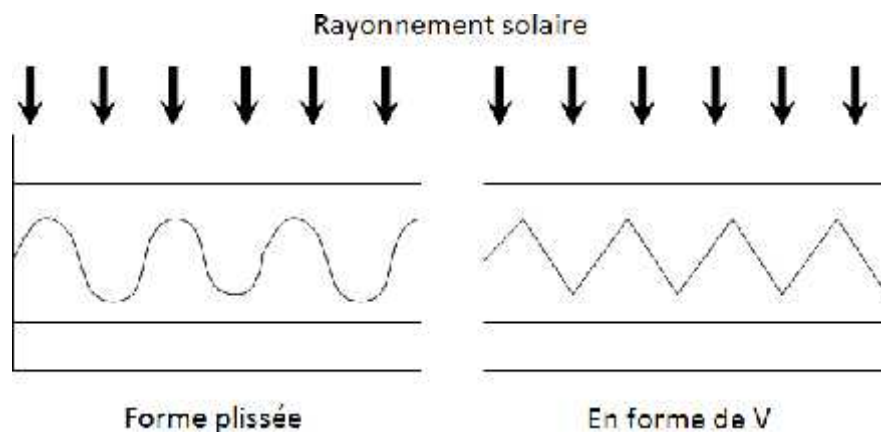


Figure II-15 : Différentes formes d'absorbeurs

Des études comparative des deux configurations d'absorbeurs (plissés et en forme de V) a été faite [26, 27, 28, 29]

- Capteurs à absorbeurs plans :

Ces capteurs, caractérisés par leurs absorbeurs plans qui peuvent être sélectifs ou non sélectifs, sans vitre ou avec une ou plusieurs vitres de protection, dans lesquels l'air circule, soit entre l'absorbeur et la vitre, (voir la figure II-16) soit sous l'absorbeur, soit des deuxcotés.



Figure II-16 : Types de circulation de l'air dans les capteurs plan air à

-Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan à air :

Un capteur solaire est destiné à convertir le rayonnement incident en énergie thermique à basses et moyennes températures et à la transférer au fluide caloporteur. La technologie de ces systèmes est simple : Elle se repose sur le pouvoir absorbant d'une surface traitée, l'absorbeur ; qui peut être soit:

- Plaque d'aluminium peint en noir mat
- Plaques sélectives "CopperSun".

L'absorbeur s'échauffe en absorbant les rayons solaires, cède une partie de l'énergie récupérée à un fluide caloporteur (l'air) et en réémet une partie dans l'infrarouge. Une vitre est placée au-dessus de l'absorbeur (alvéolée en polycarbonate par exemple). Elle est transparente aux rayonnements solaires visible et opaque à l'infrarouge qu'elle absorbe et réémet vers l'absorbeur, permettant ainsi de "piéger" les rayonnements entre l'absorbeur et la vitre et d'augmenter la température de l'absorbeur : c'est l'effet de serre. L'arrière du capteur ainsi que les parois latérales sont recouvertes d'isolants thermiques. (Voir Figure II.17).

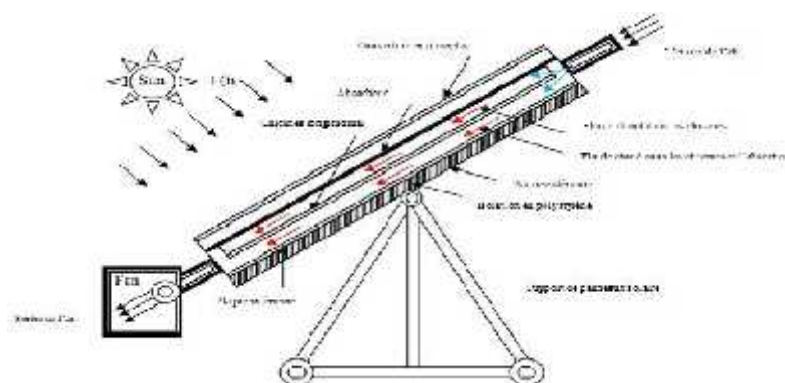


Figure II-17 : Principaux constituants d'un capteur [30]

- Éléments constituant un capteur solaire plan : les différentes composantes d'un capteur solaire plan peuvent être données dans la figure ci-dessous :

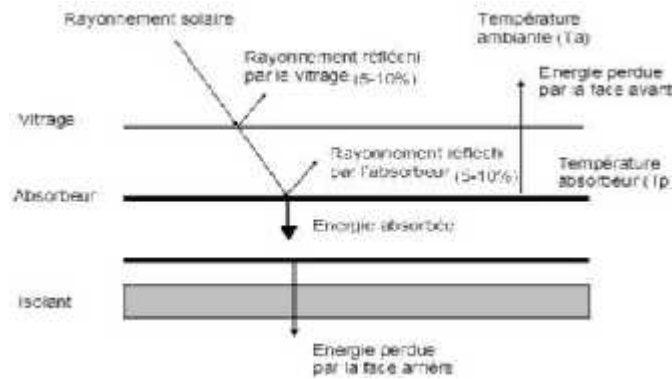


Figure II-18 : Principe composants d'un CSP.

II.2.3. Capteurs thermiques ;

II.2.3.1. Définition :

Un panneau solaire thermique est un dispositif convertissant l'énergie de la lumière solaire en énégiethermique (chaleur). L'énergie thermique est ensuite absorbée par un fluide caloporteur, par exemple Les panneaux thermiques à eau peuvent servir pour chauffer l'eau sanitaire ou comme chauffaged'appoint (Fig. 19). On peut également utiliser le solaire thermique pour chauffer une maison parl'intermédiaire d'un plancher chauffant. Le transfert thermique se fait alors directement avec l'air. Lorsque l'ensoleillement n'est pas suffisant pour amener l'eau à bonne température, le chauffe-eau estaussi relié à une chaudière d'appoint pour suppléer le panneau [30].

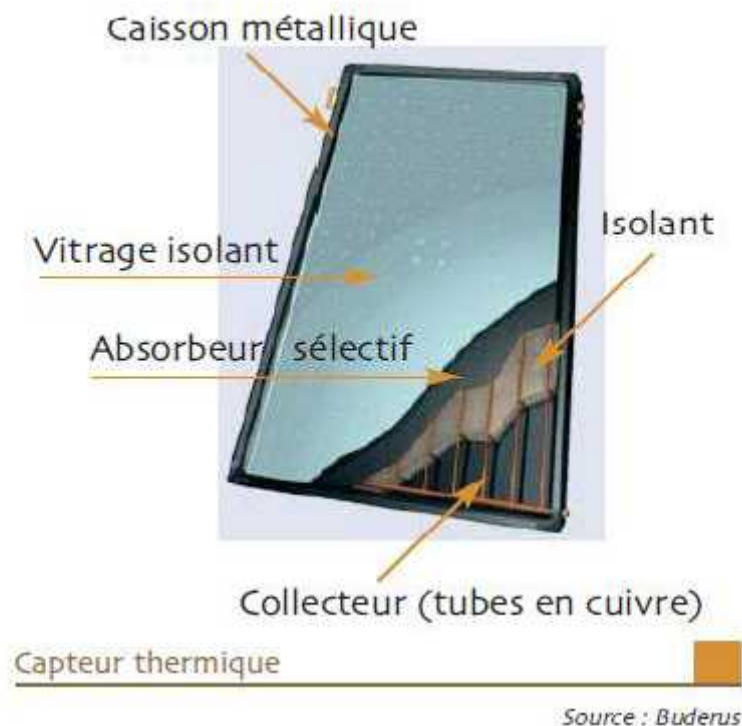


Figure II-19: Capteur solaire thermique

Tous les capteurs solaires thermiques visent à convertir le rayonnement solaire en chaleur avec un rendement élevé et à fournir cette chaleur aux consommateurs aussi efficacement que possible. Il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques : les capteurs non-vitrés, les capteurs plans, les capteurs sous vide, les capteurs à concentration. Ces types diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût.

II.3. La Conversion photovoltaïque

II.3.1. Définition :

Elle utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. La conversion photovoltaïque utilise le principe de la transformation directe de l'énergie lumineuse en une énergie électrique, les cellules solaires sont capables d'effectuer cette

Transformation. La première cellule solaire à hétérojonction en silicium a été fabriquée en 1954 aux laboratoires Bell avec un rendement voisin de 4.5%. En 1960, ce rendement a été porté à une valeur supérieure à 10% pour les cellules solaires à base de silicium monocristallin.

II.3.2. Principe de l'énergie solaire photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

II.3.3. La cellule solaire :

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique

Généralement, le matériau le plus utilisé sur une large gamme pour les applications terrestre, c'est le silicium. Il existe trois types de silicium photovoltaïque : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.

II.3.4. Capteurs solaire photovoltaïque :

Un module photovoltaïque est basé sur la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire absorbé en électricité. Cette conversion s'effectue par une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un processus appelé effet photovoltaïque.

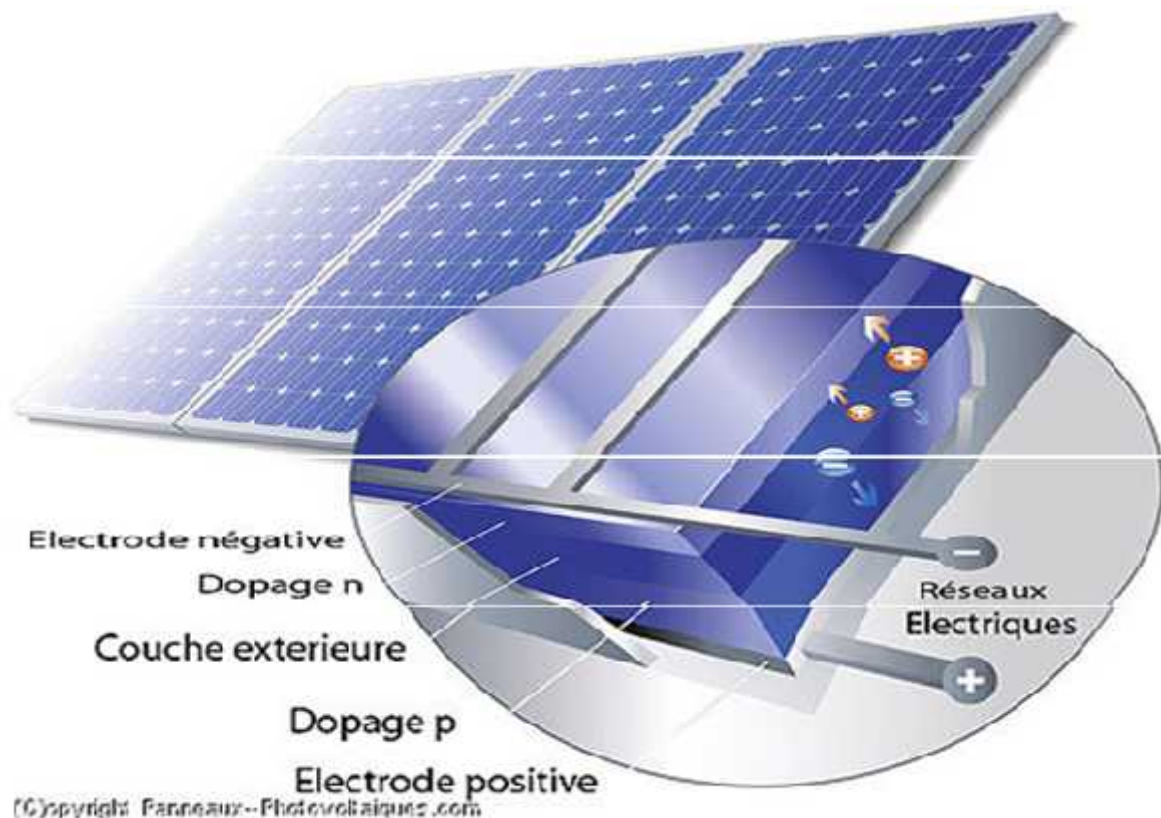


Figure II.20 Panneaux solaires photovoltaïques.

III.3.5. Cellule PV :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur (cristal de silicium) de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

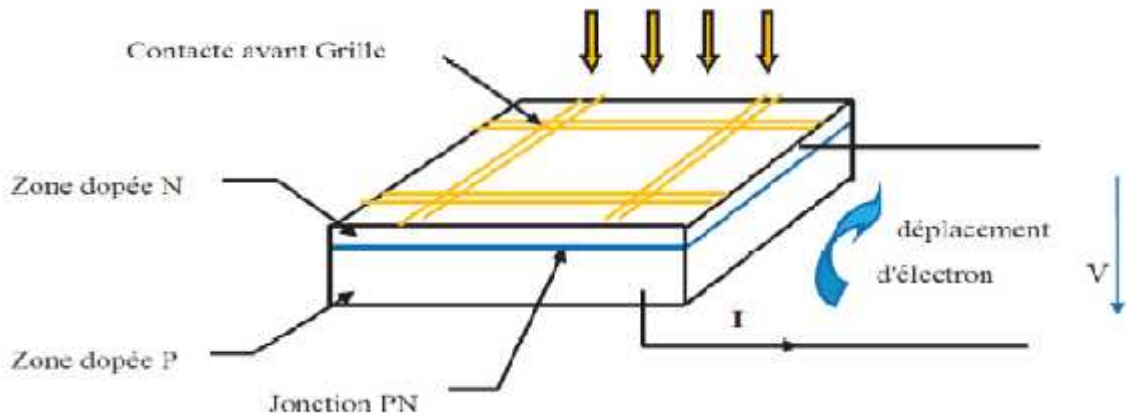


Figure II-21 Schéma d'une cellule photovoltaïque

Lorsque le rayonnement solaire atteint le capteur solaire photovoltaïque, la lumière est absorbée par les cristaux de silicium. Cette absorption décolle les électrons de leurs atomes, faisant circuler les électrons à travers les cristaux de silicium et produit de l'électricité. [31]

II.3.5.1. Différents types de cellules PV :

Il existe plusieurs familles de cellules photovoltaïques. Actuellement, les plus utilisées sur le marché sont les cellules en silicium cristallin et les cellules en couches minces. D'autres sont encore en phase de recherche et développement.

A. Cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont fabriquées à partir d'un seul cristal cylindrique de silicium (**Figure III 3**). Le principal avantage de ces cellules est leur rendement élevé, typiquement autour de 15 %. Cependant, le processus de leur fabrication est compliqué et entraînant des coûts plus élevés par rapport aux autres technologies.



Figure II-22 : Cellule en silicium monocristallin.

B. Cellules poly-cristallines :

Dans le processus de fabrication des cellules poly-cristallines, le silicium fondu est coulé en lingots de silicium poly-cristallin. Ces lingots sont ensuite sciés en tranches très fines et assemblés en cellules complètes (**figure III.4**). Ce processus aboutit à des cellules qui sont nettement moins chères que les cellules monocristallines, par contre, l'efficacité est plus faible

Par 12 % en raison de la résistance interne aux limites des cristaux de silicium

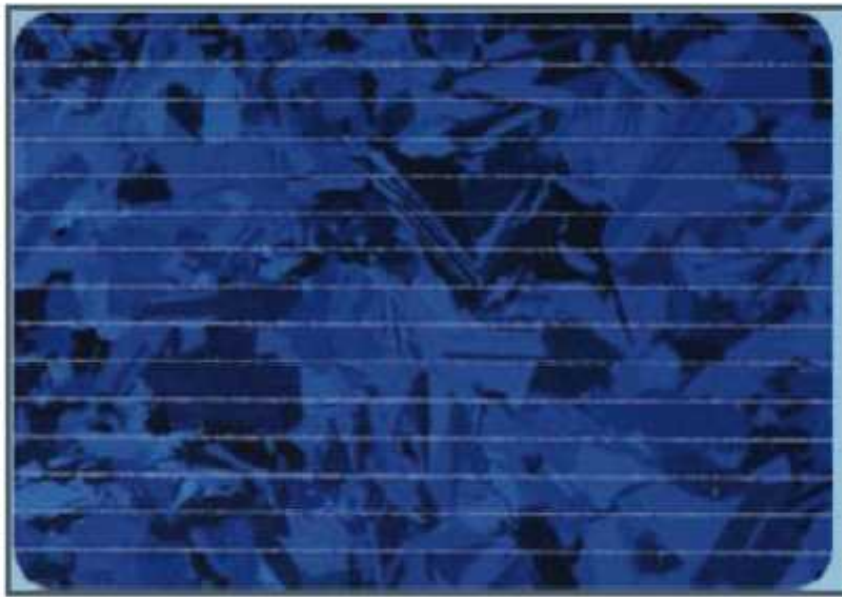


Figure II-23 : Cellule en silicium poly-cristalline.

C. Cellules amorphes :

Les cellules de silicium amorphe incluent des atomes de silicium dans une couche mince homogène plutôt qu'une structure cristalline. Le silicium amorphe absorbe la lumière solaire plus efficacement que le silicium cristallin, les cellules peuvent donc être plus minces. Pour cette raison, le silicium amorphe est connu sous le nom de technologie PV « les cellules à couche mince » (**figure II.24**). Puisque les cellules de silicium amorphe n'ont aucune structure cristalline, l'efficacité de ces cellules n'est actuellement que d'environ 6 % en raison de pertes d'énergie internes importantes.



Figure II-24 La cellule en silicium amorphe.

II.3.5.2. Cellules en couche mince :

Les cellules en couches minces sont fabriquées en déposant une ou plusieurs couches semi-conductrices et photosensibles sur un support (acier, verre, plastique ...etc.). Cette technologie permet de diminuer le coût de fabrication, mais son rendement est inférieur à celui des cellules en silicium cristallin (il est entre 5 et 13 %). Les cellules en couches minces les plus connues sont en silicium amorphe, composée de silicium projeté sur un matériel souple.

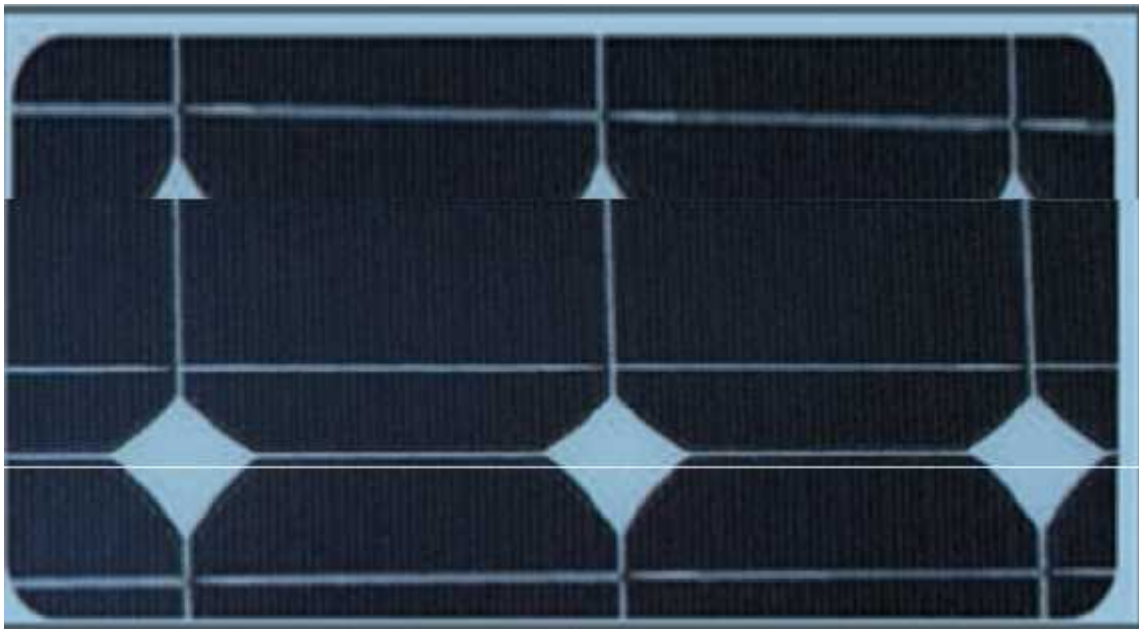


Figure II-25 Cellule en couches minces.

II.3.5.3. Cellules à concentration :

Elles sont placées au sein d'un foyer optique qui concentre la lumière. Leur rendement est élevé, qui atteint 20 à 30 %, mais nécessite un support mobile afin de traquer la position du soleil.



Figure II-26 Capteur PV avec des cellules à concentration

II.3.5.4. Cellules organiques :

Composées de semi-conducteurs organiques déposés sur un substrat en verre ou en plastique, ces cellules offrent un rendement moyennement de l'ordre de 5 à 10 %. Bien qu'elles soient encore au stade expérimental, ces cellules présentent des perspectives intéressantes en termes de réduction de coûts.

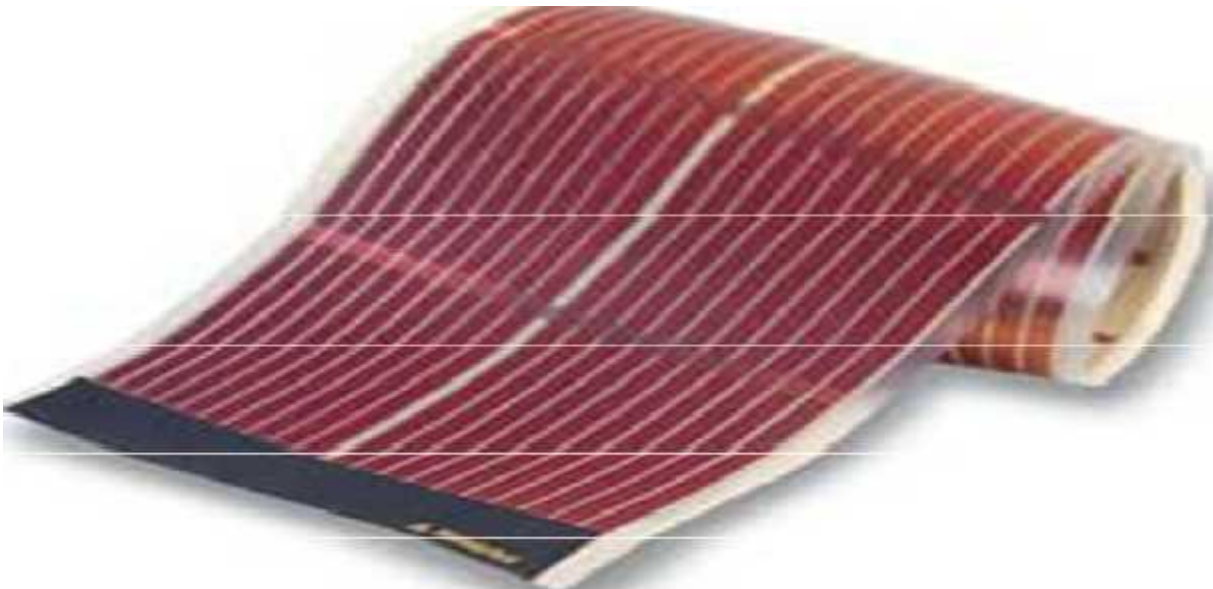


Figure II-27 : Capteur PV avec des cellules organiques.

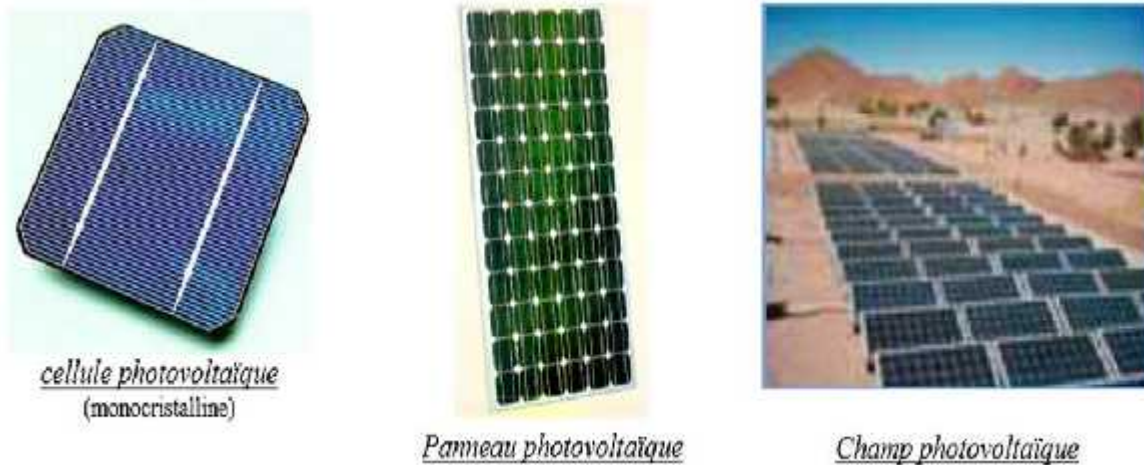


Figure II-28 :Cellule, panneau, champ photovoltaïque [32]

II.3.6. Les différentes technologies :

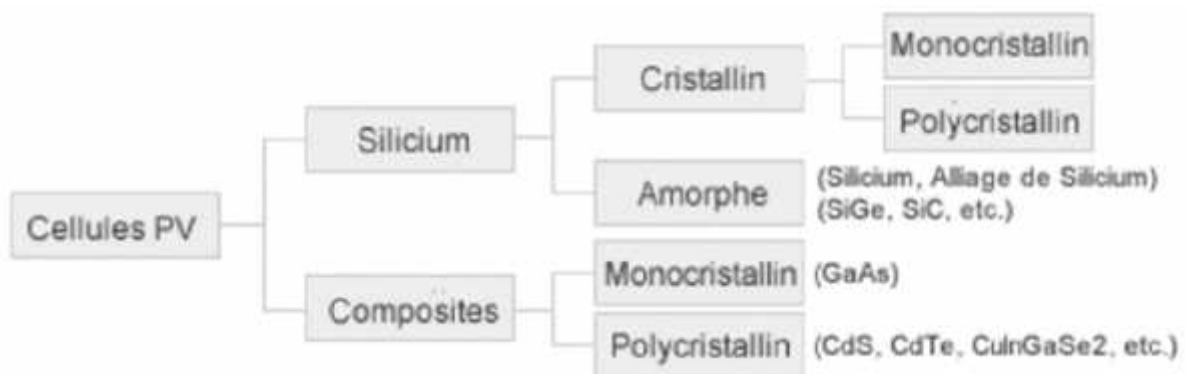


Figure II-29: Type de cellule photovoltaïque

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

II.3.7. Les systèmes photovoltaïques :

Les systèmes photovoltaïques transforment directement la lumière du soleil en électricité, et ce silencieusement et sans pièce mécanique en mouvement. Les cellules photovoltaïques exploitent les propriétés semi-conductrices de certains matériaux comme le silicium. Soumises à la lumière, elles produisent un courant électrique continu. Si nécessaire, il peut être transformé en courant alternatif selon les caractéristiques des applications électriques à

raccorder. Les systèmes photovoltaïques peuvent ainsi alimenter de petits équipements portables (montres, calculatrices, ...), des applications en site isolé (habitations éloignées du réseau électrique, équipements de télécommunication, électrification rurale), ou être raccordées au réseau électrique. La simplicité de l'installation, la facilité d'exploitation et le caractère silencieux de la production électrique sont des atouts considérables pour des applications dans le bâtiment [18].

Le module photovoltaïque est l'élément de base des systèmes photovoltaïques. Un générateur solaire est composé de modules photovoltaïques connectés en séries parallèles qui déterminent la puissance, la tension de fonctionnement et le courant qui sera délivré par l'ensemble. De manière générale, il existe deux types de systèmes photovoltaïques.

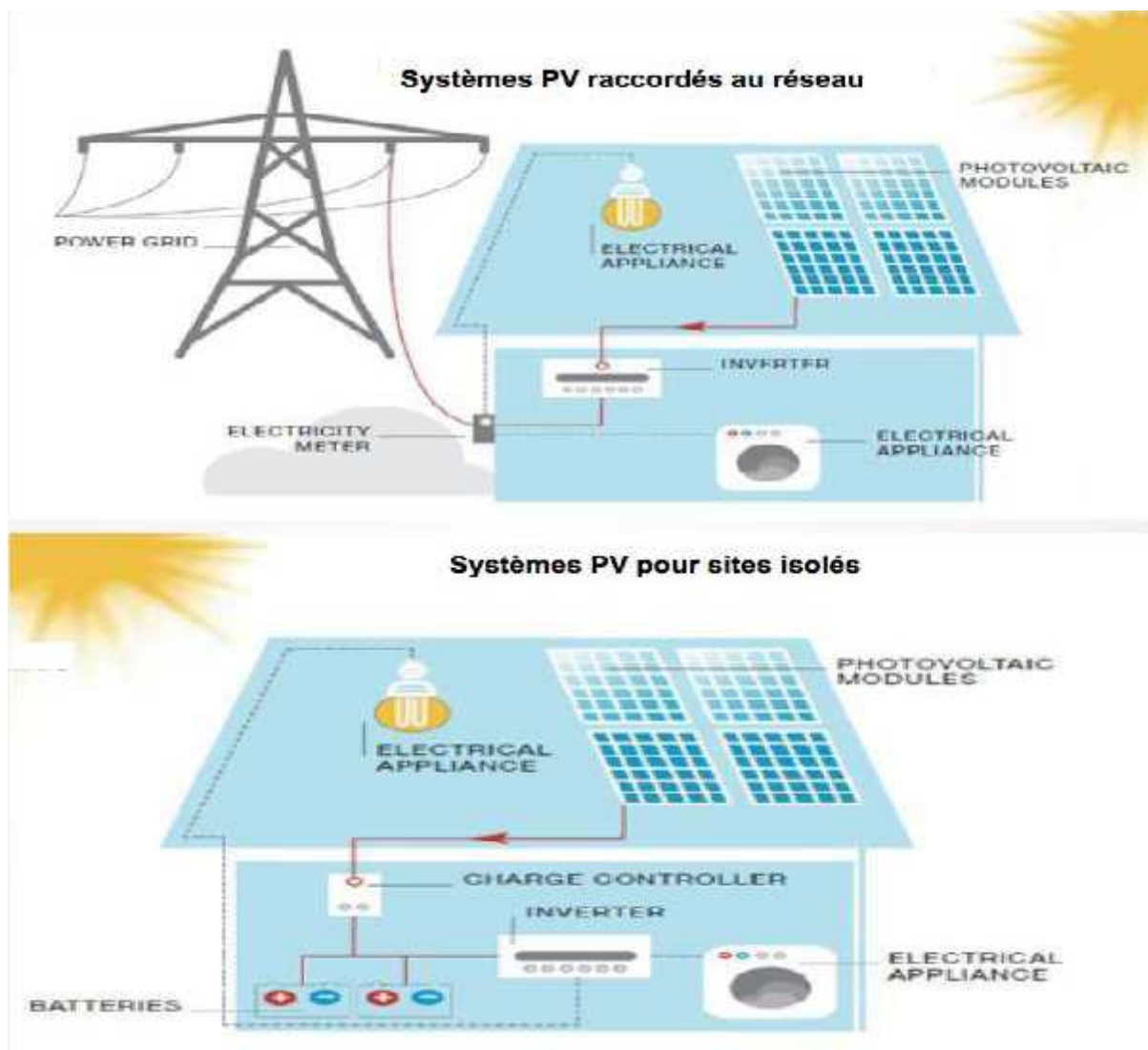


Figure II-30 : systèmes PV pour raccordes au réseau et isolés [33]

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants :

- ⌋ Un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- ⌋ Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- ⌋ Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- ⌋ Un convertisseur DC/AC
- ⌋ Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard. Figure (II-6) représente symboliquement les divers éléments du système le plus général.

Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales. [20]

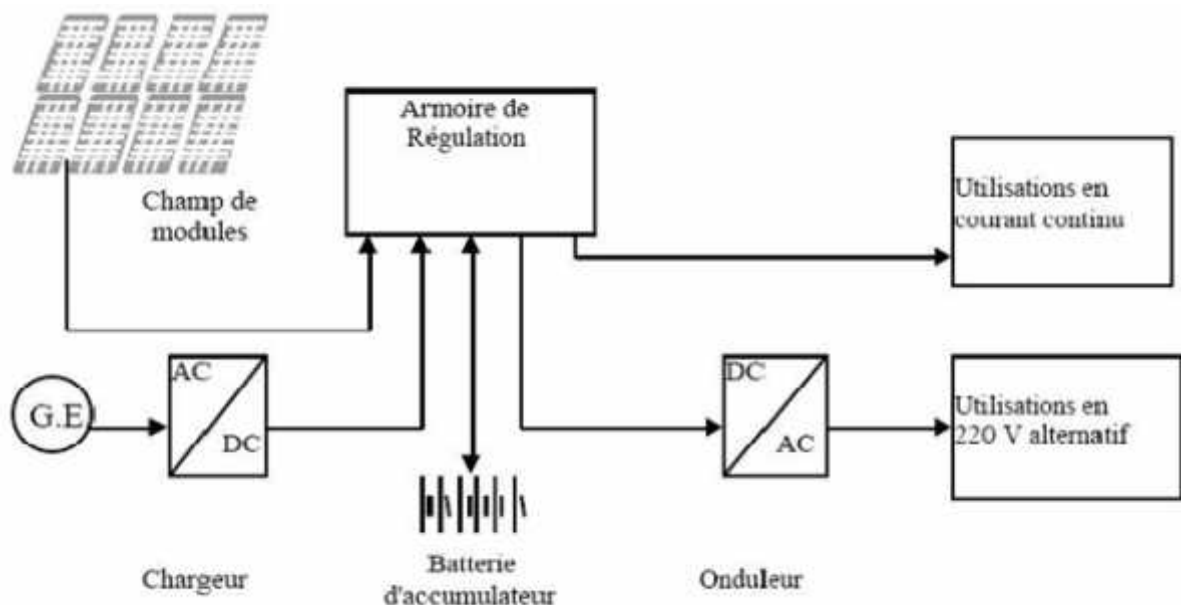


Figure II-31 : Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général

II.4. Les capteurs solaires hybrides PVT plan :

Les capteurs solaires hybrides PVT plan peuvent être classés selon le fluide caloporteur utilisé (l'eau, l'air ou les deux simultanément).

III.4.1. Les capteurs solaires hybrides PVT à eau :

En 2015, Baloch et al [34] ont étudié expérimentalement et numériquement l'influence de l'écoulement d'air dans un passage convergent à différents angles sur le refroidissement du module PV. Par rapport au système non refroidi, ce système permet une réduction de

Température de 26 et 12 °C durant les mois de juin et de décembre, respectivement (**Figure II.32**).

Fujisawa et Tani[35] ont conçu un capteur solaire PVT hybride à eau placé dans un cité universitaire à Tokyo, Japon. Il s'agit d'un capteur plan (1,3m de longueur et 0,5 m de largeur) avec un absorbeur en aluminium non-sélective et de modules PV en silicium monocristallin (rendement électrique 13%), **Fig(II.33)** Concernant le gain total d'énergies (thermique et électrique), les auteurs ont montré que le système le plus performant est le capteur solaire hybride vitré avec une production totale de 615 KWh/an, suivi par le capteur solaire hybride non vitré (480 KWh/an) et enfin le capteur solaire PV (72,6 KWh/an).

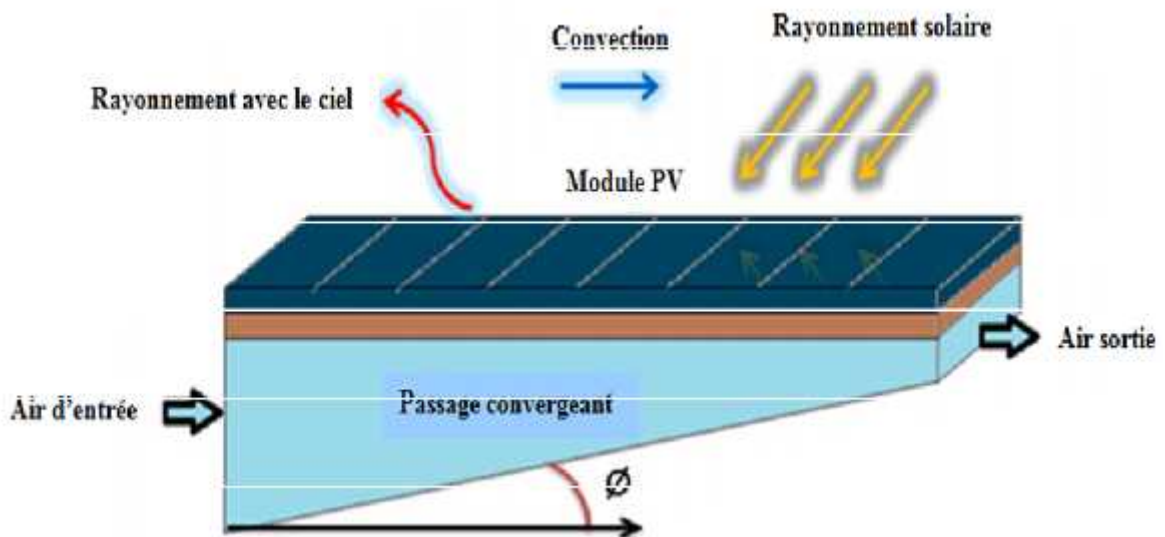


Figure II-32 :Schéma de l'échangeur de chaleur à canal convergent avec des modes de transfert de Chaleur [34].

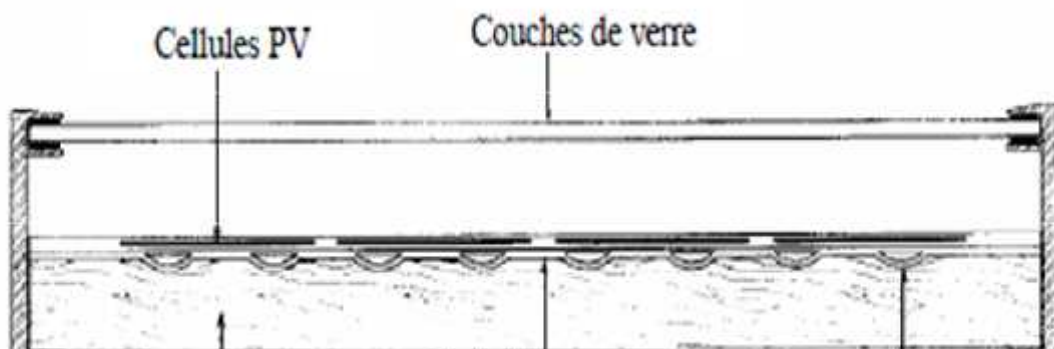


Figure II-33 :Capteur hybride à eau [35]

Trip Anagnostopoulos et al [36] ont réalisé une étude expérimentale sur des systèmes PVT (Figure II-34) en utilisant l'eau pour extraire la chaleur de la surface arrière du module PV.

Ceci permet de maintenir son efficacité électrique à un niveau satisfaisant par la réduction de sa température de fonctionnement. Les résultats ont montré que le refroidissement des cellules

PV permet d'augmenter leur efficacité électrique, et d'augmenter ainsi l'efficacité totale des systèmes. L'amélioration des performances du système peut être obtenue par l'utilisation d'un

vitrage supplémentaire pour augmenter la puissance thermique et d'un réflecteur pour Augmenter la puissance électrique et thermique

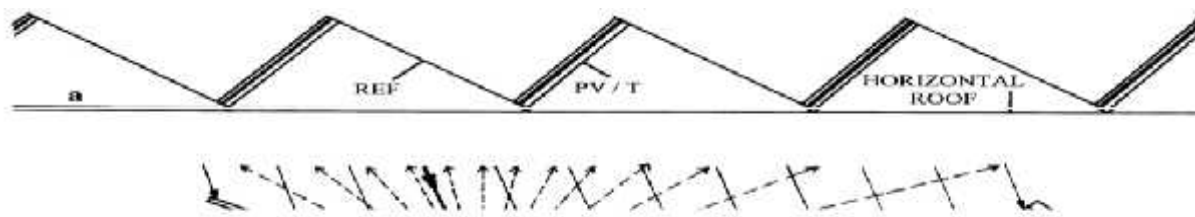


Figure II-34 :Système PVT avec réflecteur [36]

alzaabi et al[37].ont proposé une conception pour améliorer l'efficacité électrique des panneaux PV à l'aide d'un système PVT hybride refroidi à eau, (Figure II-35) Les performances électriques et thermiques du système sont étudiées dans des conditions de température ambiante dans SHARJAH (Emirats Arabes Unis) en avril 2014. Le système est composé d'un panneau PV poly-cristallin avec un capteur solaire thermique adhérent à son arrière. Les expériences ont été effectuées avec et sans processus de refroidissement pour observer l'amélioration de l'efficacité du panneau PV. Les résultats ont montré que la puissance électrique du système PVT a augmenté de 15 à 20% par rapport au panneau PV. L'efficacité thermique du système est située entre 60 et 70%.



Figure II-35 :Photo du système PVT à eau [37]

Un système PVT contenant un module PV sur un absorbeur avec écoulement d'eau en spirale a été étudié par Ibrahim et al[38]. (FigureII-36)Les résultats montrent que l'efficacité énergétique varie entre 55 et 62% et que l'efficacité électrique varie entre 12 à 14%.L'amélioration de la production électrique augmente entre 98 et 404 W avec l'augmentation du rayonnement solaire. D'autre part, l'efficacité énergétique du système PVT a été d'environ 73 à 81%.



Figure II-36 : Photo du système de PVT [38].

Une analyse de la performance d'un système PVT refroidi à eau (**Figure. II-37**) a été réalisée par Kiran et Devadiga. [39] L'efficacité électrique moyenne développée sans refroidissement est de 7,58 % et celle avec le refroidissement est de 8,16%. L'efficacité thermique moyenne du panneau est de 50,81 %. L'efficacité globale du panneau est la somme des efficacités électrique et thermique, 58,97%. Elle est plus importante que celle d'un chauffe-eau conventionnel et du panneau PV autonome.

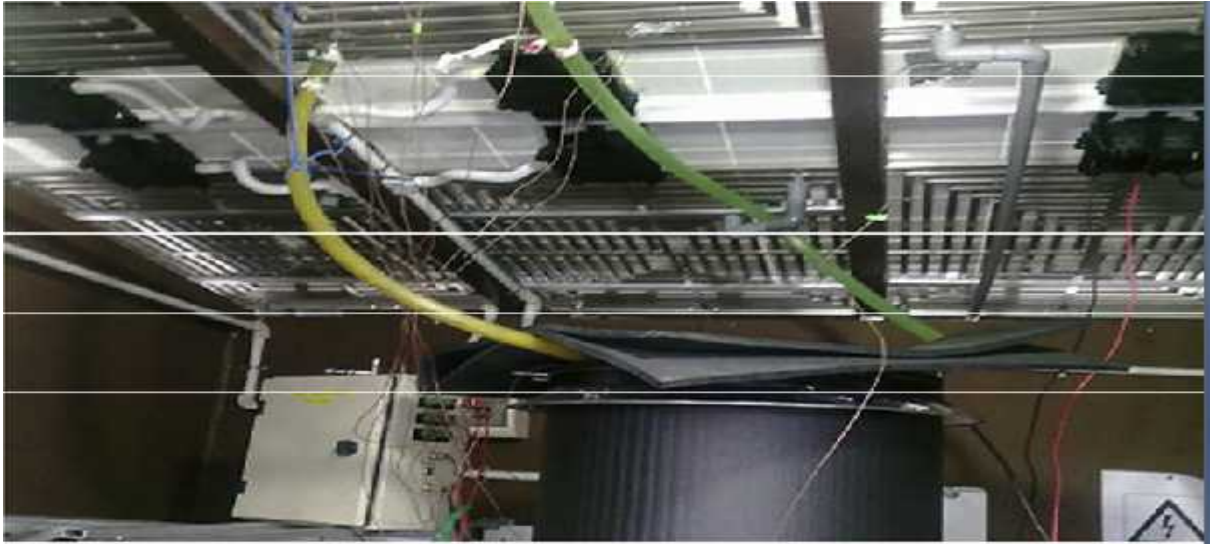


Figure II-37 :Système PVT et de la plate-forme d'essai extérieure [39]

Hazami et al. [40] ont étudié le potentiel offert par l'utilisation d'un capteur solaire PVT (**Figure.II.38**) dans les foyers tunisiens pour fournir simultanément l'électricité et l'eau chaude domestique. Les expériences sont faites sous différentes conditions climatiques pendant des jours sélectionnés en juillet 2014 durant le mode passif (sans refroidissement) et actif (avec refroidissement). Les résultats ont montré que l'efficacité énergétique thermique et électrique instantanée maximale en mode actif est d'environ 50 et 15%, respectivement. On a également constaté que le rendement électrique maximum en mode passif était d'environ 14,8%. La deuxième approche consiste à évaluer les performances mensuelles et annuelles des systèmes solaires PVT en utilisant le code TRNSYS. Les résultats ont montré que les modes actifs améliorent l'efficacité électrique du système PVT de 3%.



Figure II-38 :Capteur PVT avec ballon de stockage [40]

III.4.2. Les capteurs solaires hybrides PVT à air :

Le capteur hybride PVT à air produit l'énergie électrique et l'énergie thermique sous forme d'air chaud. Ce dernier est utilisé dans plusieurs applications (chauffage, séchage, etc). Tiwari et Sodha[41] proposent une étude paramétrique et comparative de quatre types de capteurs solaires à air (Figure II-39). Les systèmes étudiés se différencient par la présence ou non d'un vitrage et d'un support en Tedlar. Les modèles thermiques développés ont été validés avec une étude expérimentale menée à New Delhi. Les résultats obtenus ont montré que le capteur à air vitré et sans Tedlar est le plus performant avec une amélioration significative du rendement global (thermique et électrique). Les capteurs solaires à air non vitré avec et sans Tedlar donnent des températures des cellules PV assez identiques.

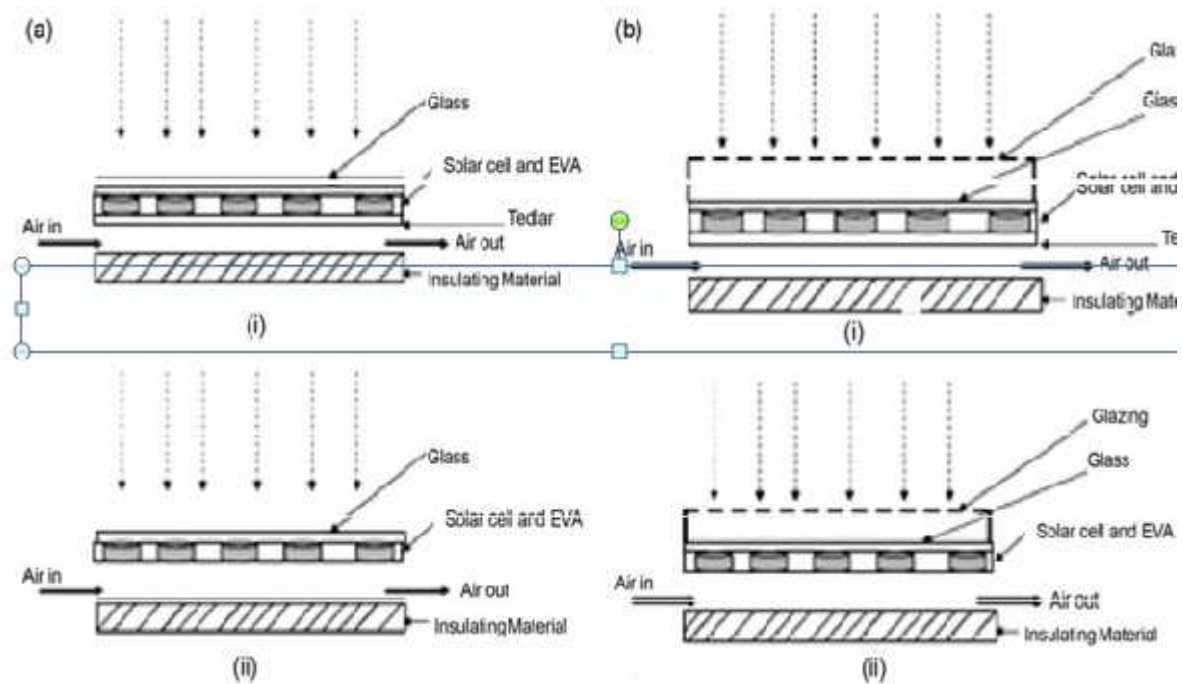


Figure II-40 : PVT à air avec et sans vitrage, avec et sans tedlar[41]

Joshi et Tiwari[42] présentent l'étude des rendements énergétique et exégétique d'un capteur solaire hybride PVT à air sans vitrage et comportant une couche de Tedlar. Les résultats validés expérimentalement indiquent que les rendements thermique et électrique du capteur solaire varient entre 55 à 65 % et 14 à 15 %, respectivement (**Figure II-41**). Une étude expérimentale qui porte sur la conception et le développement des systèmes PVT avec circulation d'air intégrée dans un toit (**Figure II-42**) a été réalisée par Aste et al. [43] Les expériences sont faites dans le site expérimental Parco Lambro à Milan. Les efficacités thermique et électrique sont évaluées pendant plusieurs jours. Les auteurs ont analysé l'effet des paramètres suivant : débit d'air, inclinaison du capteur et l'épaisseur du canal d'air. Le but

est de définir les performances du collecteur en termes d'efficacité électrique et thermique dans plusieurs conditions de travail.



Figure. (II-41) Photographie de l'installation expérimentale d'un collecteur d'air hybride PV / T [42]



Figure II-42 : Systèmes PVT avec circulation d'air [43]

Tonui et Tripanagnos topoulos[44] ont présenté un système de capteur solaire PVT avec refroidissement à air (**Figure.II-43**). Ils proposent d'utiliser une mince feuille métallique avec des ailettes dans le canal d'air pour améliorer l'extraction de la chaleur des modules PV. Un modèle numérique a été développé et validé expérimentalement. Les systèmes proposés présentent de meilleures performances par rapport à un système classique. Les résultats montrent que les deux systèmes contribuent de manière positive à améliorer l'extraction de la chaleur à partir du module PV avec une meilleure production d'énergie électrique et thermique.

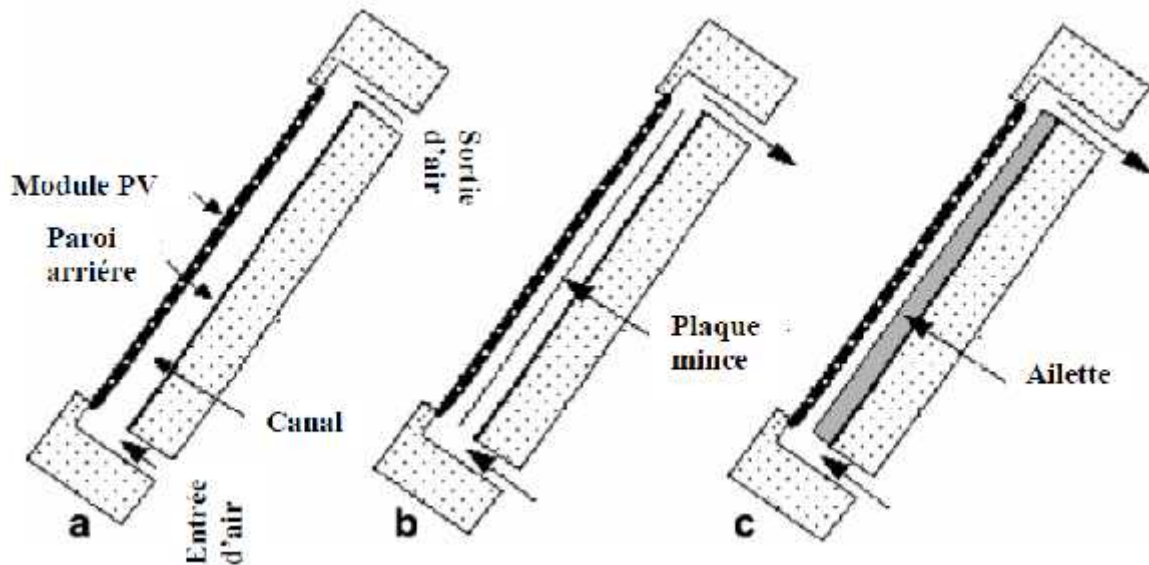


Figure. II-43 : Les différentes configurations étudiées : (a) système conventionnel (b) système avec une feuille de métal (c) système avec ailettes [44].

Agwaral et Tiawri[45] ont étudié un système PVT installé comme toit d'un bâtiment (Figure. III.44). La performance de ce système est comparée avec celle d'un système PV simple. Bien que le système BIPVT (building integrated photovoltaic thermal) monocristallin soit plus performant pour les consommateurs résidentiels du point de vue efficacité thermique et électrique, le système BIPVT au silicium amorphe s'avère plus économique. Les efficacités thermique et électrique du système BIPVT en silicium amorphe se situent respectivement à 33,54 et 7,13 % dans les conditions climatiques de New Delhi.

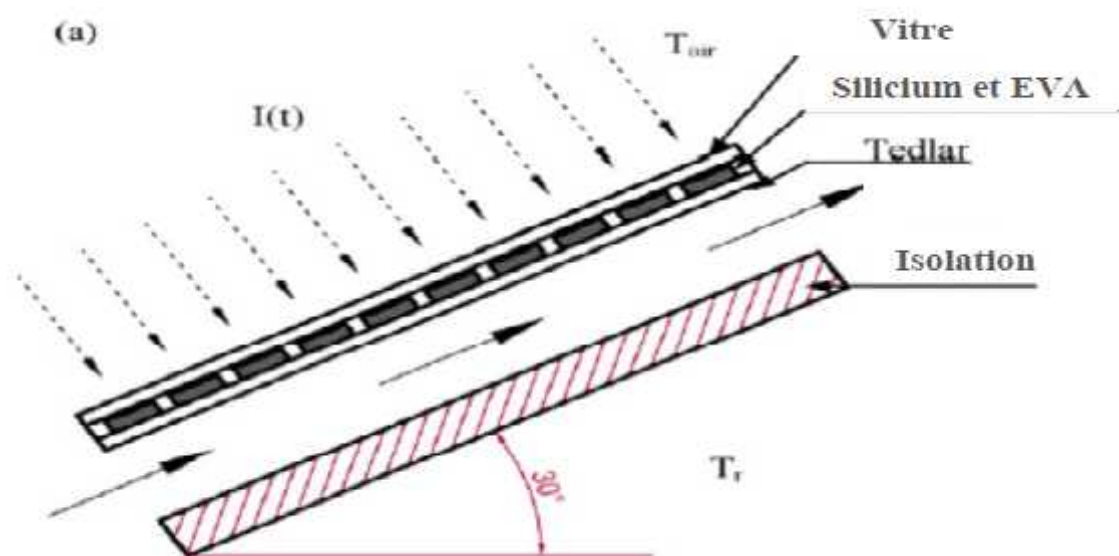


Figure II-44 : Section transversale du système PV [45]

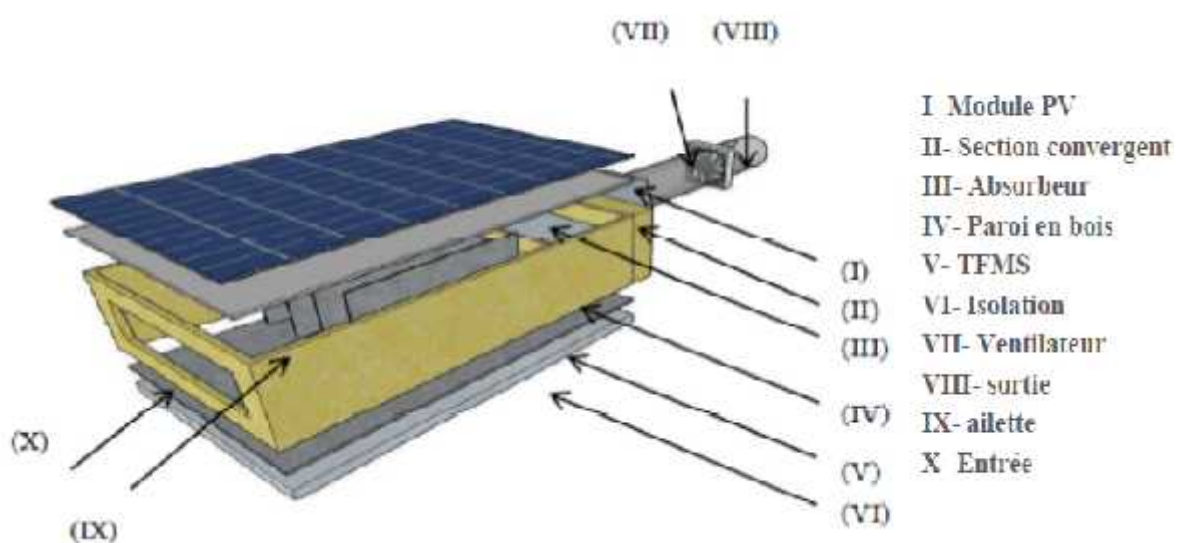
Ahn et al.[46] ont couplé un capteur PVT à air avec un système de ventilation à récupération de chaleur (VRC) (Figure II-45). Les résultats expérimentaux montrent que les performances

thermique et électrique du capteur PVT sont respectivement de 23 et 15%. Par conséquent, l'efficacité globale du système couplé est de 38%. Alors, l'efficacité du système VRC a été améliorée par environ 20%. Les auteurs ont conclu que le système VRC couplé avec un capteur PVT a donné une efficacité supérieure à un système VRC simple



Figure II-45 Photo du bâtiment expérimental [46]

Un capteur solaire PVT à air avec ailettes rectangulaires minces est proposé par Mojumder et al. [47] (**Figure II-46**) L'étude expérimentale est réalisée sous différentes conditions et configurations. Les efficacités électrique et thermique maximales obtenues (13,75 et 56,19%) étaient avec quatre ailettes, un débit massique de 0,14 kg/s et un rayonnement solaire de 700W/m².



FigureII-46 : Schéma de la conception de capteur PVT [47]

III.4.3. Les capteurs solaires hybrides PVT bi-fluide :

Tripanagnos topoulos[48] a étudié un capteur solaire hybride utilisant deux types de fluide caloporteurs (air et eau) disposés de manière superposée. Trois configurations ont été conçues et analysées expérimentalement afin d'évaluer le comportement de chacune des formes de production thermique. Le système le plus performant (**Figure II-47**) comporte un absorbeur avec des tubes en cuivre, une plaque métallique plane et des ailettes disposées sur la paroi inférieure de la lame d'air. Des cellules PV en silicium poly-cristallin ont été utilisées à cause de leur bon rendement et du coût réduit par rapport aux cellules PV en silicium monocristallin. Les résultats des tests ont montré une augmentation de la production d'énergie totale du système d'environ 30 %.

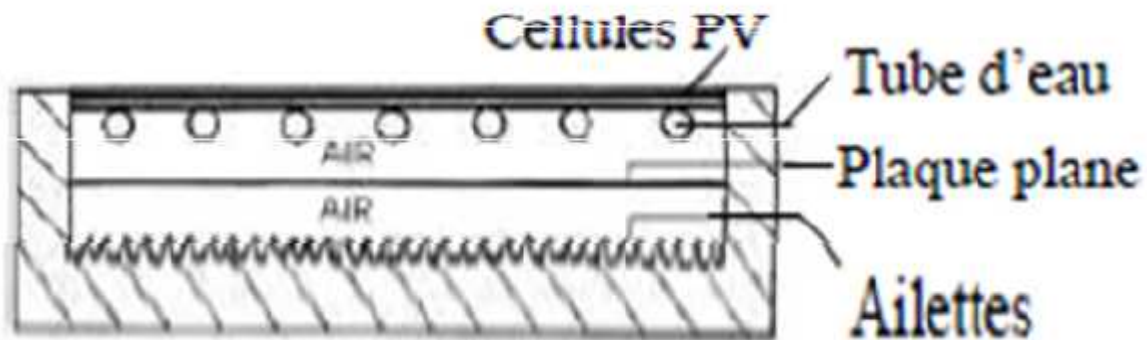


Figure II-47 : Capteur solaire PVT à deux fluides et à fonctions superposées [48]

Une étude comparative expérimentale et numérique a été effectuée par Assoa et al. [49]. **Figure (II-48)** Le capteur hybride étudié se compose d'un échangeur thermique à air avec un absorbeur plan en acier, un module PV poly-cristallin (240 × 1980mm), isolation (avec du polystyrène et un réflecteur mince) et un tuyau d'eau. Ils ont conclu que le débit massique influence sur le comportement de l'échangeur thermique à air à cause des pertes thermiques avec l'échangeur thermique à eau. Ils proposent d'améliorer l'isolation et la forme des échangeurs. Les performances de l'échangeur thermique montrent que l'efficacité thermique peut atteindre approximativement 80 % avec un débit massique et une longueur de l'échangeur optimisés. L'estimation de rendement électrique indique un refroidissement des cellules PV satisfaisant avec possibilité d'amélioration.

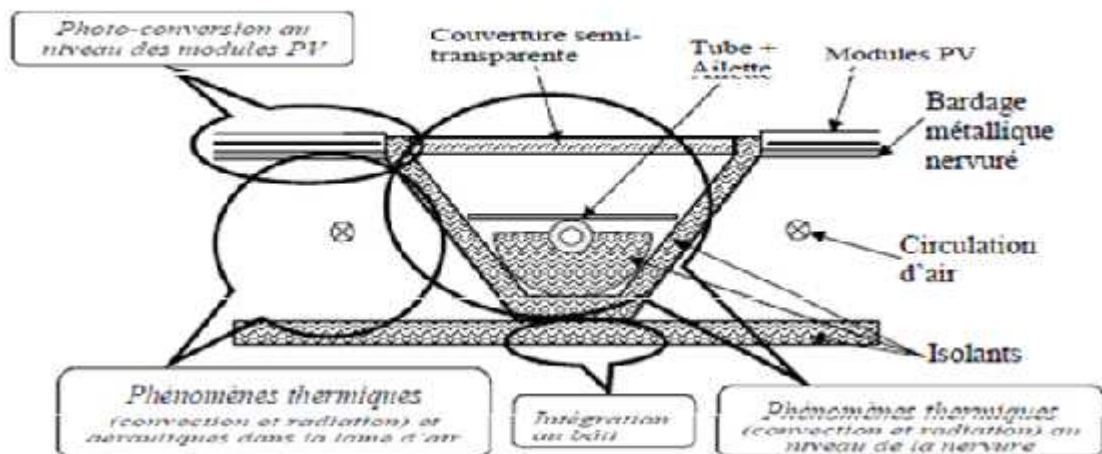


Figure II-48 :Section du prototype bi-fluide initial et localisation interdépendants [49]

Otman et al[50] présenté un système PVT bi-fluide (eau-air) (Figure.II-49). Les principaux composants du système sont deux modules PV transparents connectés en parallèle pour générer de l'électricité, un canal d'air plat à double passage, un tube d'eau en cuivre et un réservoir pour stocker l'eau chaude produite. Les températures des cellules solaires, de l'eau et de l'air dans les deux canaux ont été mesurées. Dans un environnement contrôlé (assurant un rayonnement de 800 W/m^2 , un débit d'air de $0,05 \text{ kg/s}$ et un débit d'eau de $0,02 \text{ kg/s}$) la température de sortie enregistrée était de $27,4 \text{ }^\circ\text{C}$. L'efficacité électrique atteignait 17% avec une puissance électrique moyenne de 145 W et une efficacité thermique de 76% .

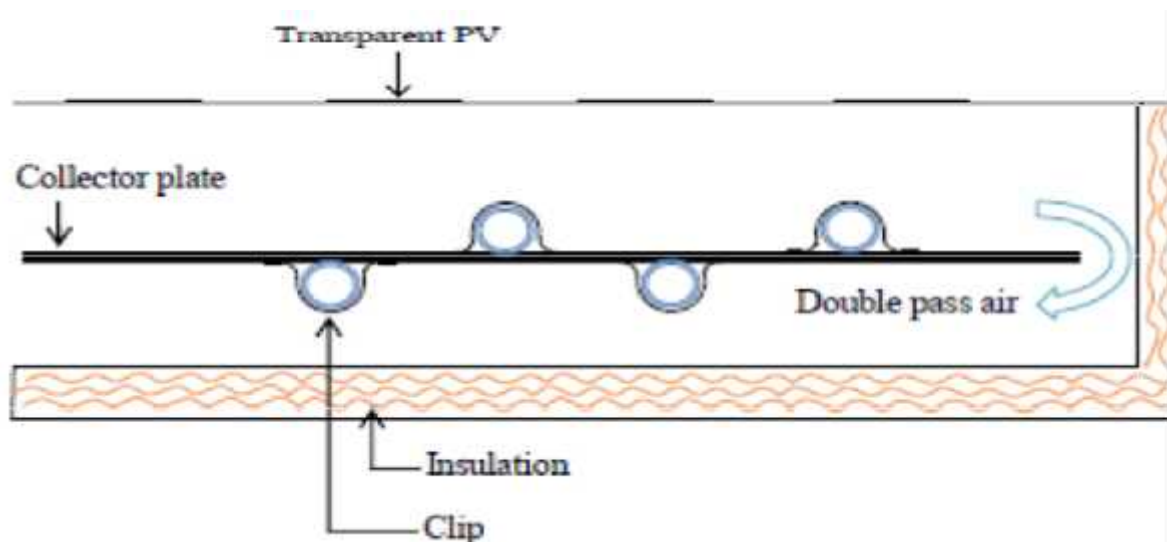


Figure II-49 : Schéma du capteur PVT [50]

Su et al.[51] ont étudié les performances d'un capteur solaire (PVT) à double canalisation avec différents fluides (**Figure.II-50**). Les caractéristiques électriques et thermiques du capteur (températures de la cellule solaire et des fluides à la sortie, efficacités électrique et thermique) sont analysées pour quatre capteurs PVT avec différents fluides. Ils ont constaté que le capteur PVT refroidi à eau-eau est le plus efficace en termes de performance électrique et thermique en fournissant la plus grande quantité d'eau chaude. La température de l'eau dans le cas air-eau est la plus élevée. Le capteur PVT refroidi à air-air peut fournir la plus grande quantité d'air chaud. Ils constatent également qu'une augmentation du débit massique de l'eau conduit à un meilleur rendement global du capteur PVT refroidi à eau-eau.

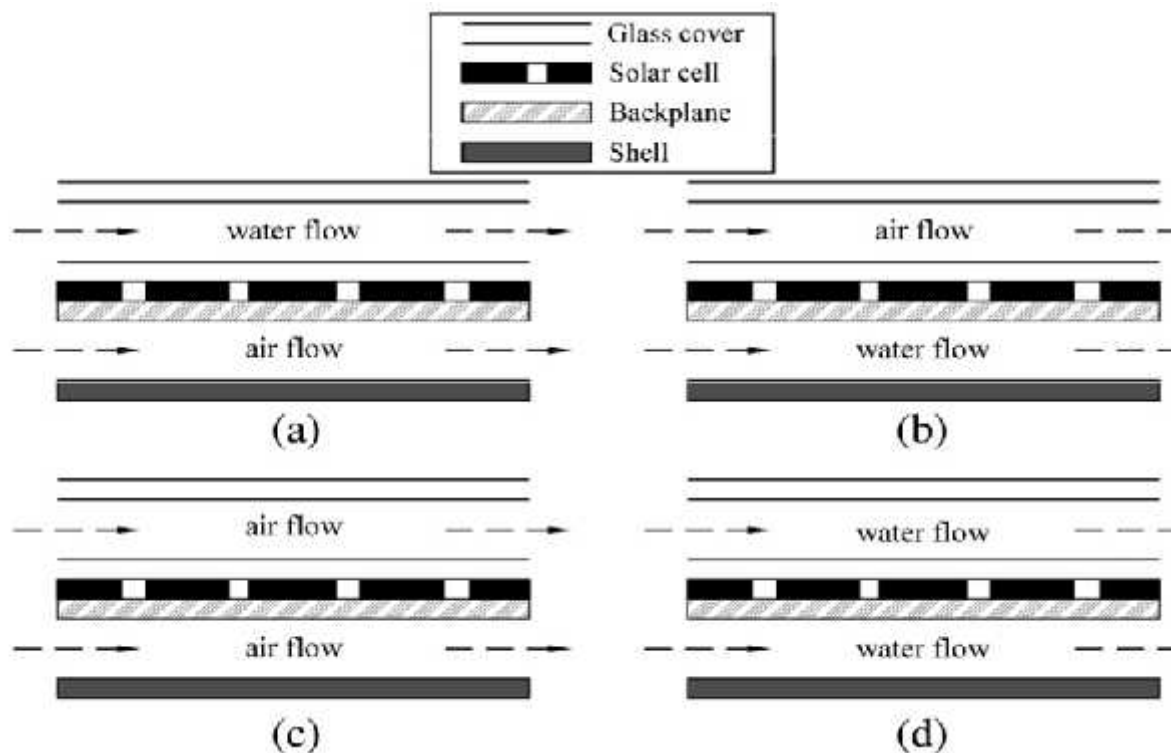
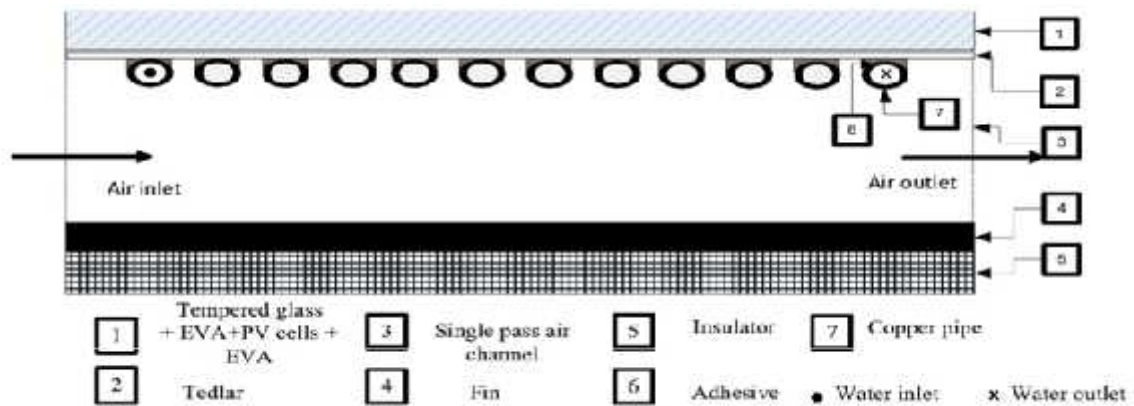
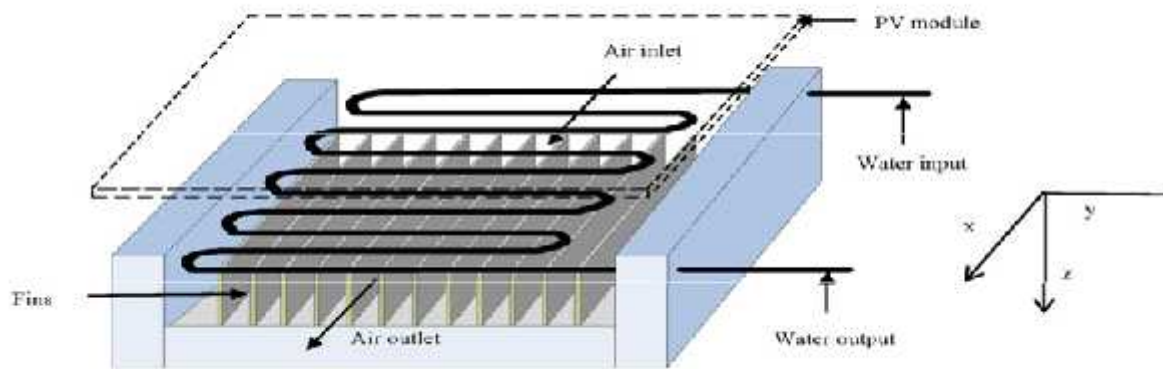


Figure II-50 La vue en coupe du capteur PVT avec deux canaux pour différents fluides [51]



(a)



(b)

Figure II-51 : a) Vue en coupe b) Vue en perspective du capteur PVT bi-fluide [52]

Une étude expérimentale et théorique d'un capteur solaire PVT de type bi-fluide (**Figure II-51**)a été réalisée par Jarimi et al. [52]. Une simulation 2D en régime permanent a été développée en utilisant MATLAB. Les essais comprennent les trois modes de fonctionnement du fluide sous le même système PVT, à savoir, les modes à air, à eau et à eau-air. Les résultats de la simulation ont été validés avec l'expérimentale et un bon accord a été observé. Le capteur PVT conçu à travers cette étude peut avoir une variété d'applications puisqu'il fonctionne dans trois modes différents.

Ainsi le but de notre travail est de simuler numériquement un panneau photovoltaïque hybride à eau ou air en utilisant l'outil de simulation les logiciel fluent et Gambit .

Chapitre III

Formulation Mathématique

Et

Simulations numériques

III.1. Introduction :

La simulation numérique d'un système à étudier donne les échanges thermiques dont l'interprétation repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles. Le système hybride photovoltaïque /thermique à eau ou air regroupe un panneau photovoltaïque, qui produit de l'électricité, à un capteur thermique, disposé derrière ce panneau. La chaleur résiduelle qui vient du capteur photovoltaïque sera communiquée par rayonnement et convection à l'air ce qui permet aussi de ventiler les cellules du capteur photovoltaïque afin d'améliorer sa productivité électrique.

Dans ce chapitre, nous allons voir la géométrie de la configuration étudiée, ainsi que les équations de conservation régissant le problème traité dans ce mémoire. Elles sont fondées sur les principes de conservation de la masse (continuité), de la quantité de mouvement (Navier-Stokes), de l'énergie, et les conditions aux limites ainsi que l'équation du modèle du rayonnement thermique.

III.2 Configuration étudiée :

La géométrie considérée est illustrée dans la figure(III.1) qui est celle d'un micro-canal de dimensions (18x18x3) cm, schématisant un panneau photovoltaïque dans lequel circule un fluide caloporteur qui dans notre cas l'eau ou l'air. Il est constitué des éléments suivants :

-) Un vitrage : C'est la plaque supérieure du panneau, il s'agit d'un verre trempé de faible teneur en fer. Ceci permet une meilleure transmission optique.
-) Une cellule photovoltaïque : son rôle est de transformer le rayonnement solaire en électricité.
-) L'EVA (éthylène-acétate de vinyle) est une résine transparente pour à couvrir les cellules photovoltaïques. Chimiquement, elle est formée de chaînes de copolymère d'éthylène et de vinyle d'acétate.
-) Une couche :son rôle est de transférer la chaleur vers le fluide caloporteur.
-) Un micro-canal contenant le fluide caloporteur.

) Un isolant à l'arrière : pour minimiser les pertes thermiques.

Dans notre problème, on s'intéresse au transfert de chaleur associé au rayonnement solaire dans le fluide caloporteur lorsque le panneau est soumis à une irradiation solaire sous les conditions normales. Dans ce chapitre on va formuler notre modèle mathématique, les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions initiales et aux limites appropriées à notre configuration.

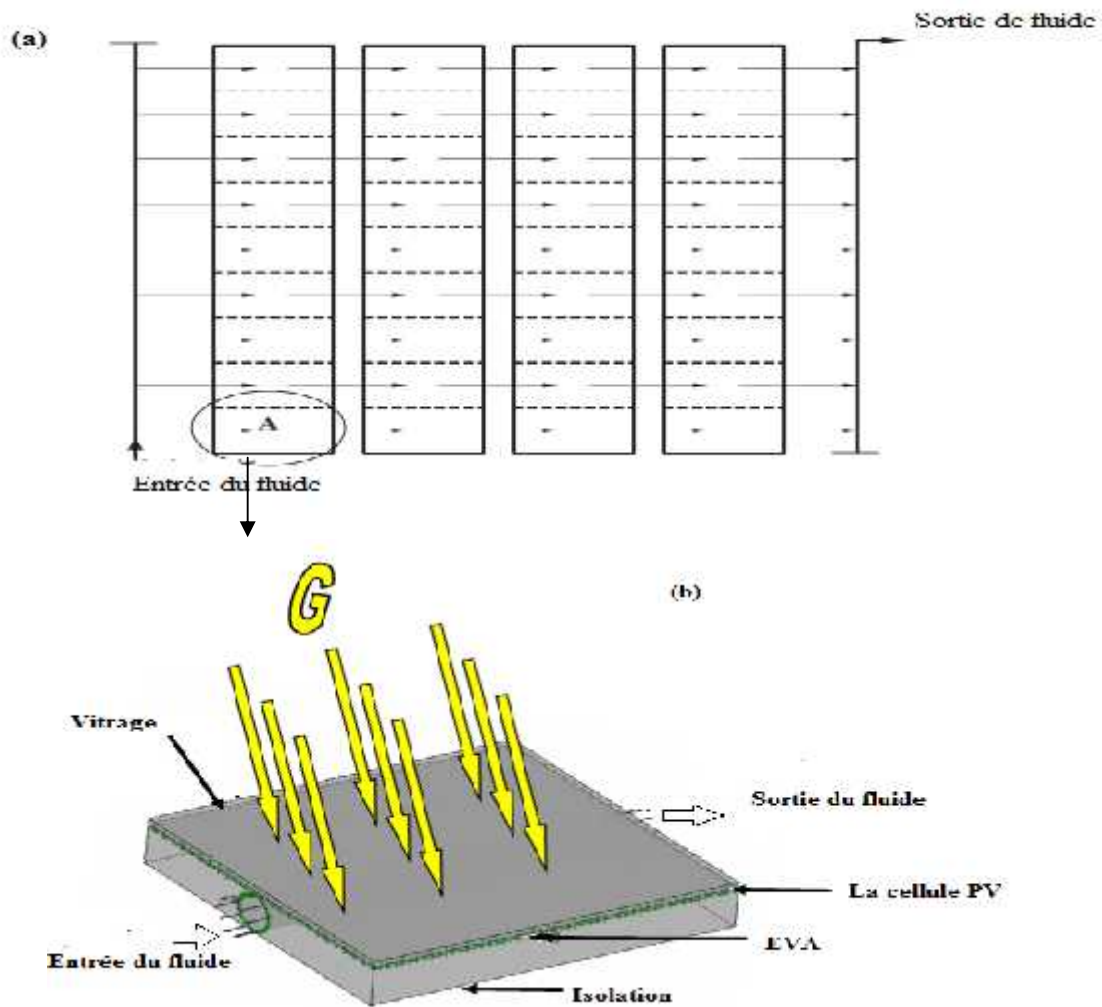


Figure III.1 : Configuration du micro-canal du panneau PV (a), Géométrie étudiée de la section A (b)

III.3 Hypothèses :

Afin de simplifier la formulation mathématique de notre problème, nous adapterons les hypothèses simplificatrices suivantes :

-) L'écoulement du fluide et le transfert de chaleur sont permanents ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$).
-) Le régime est laminaire à 3 dimensions
-) Le fluide est Newtonien et incompressible.
-) Les dissipations visqueuses sont négligeables.
-) Les propriétés physiques du fluide sont supposées constantes sauf pour la masse volumique dont l'approximation de Boussinesq étant adoptée. Tel que la masse volumique varie en fonction de la température comme suit

$$\rho = [\rho_0 (1 - \beta (T - T_0))]$$

T_0 : Température de référence.

ρ_0 : Masse volumique du fluide.

β : Le coefficient d'expansion thermique à pression constante.

Sachant que $\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)$ est le coefficient de dilatation à pression constante

ρ_0 : la masse volumique à T_0 .

-) Le transfert de chaleur par rayonnement n'est pas négligeable.
-) Le milieu fluide est absorbant.

III.4 Equations générales de conservation :

Compte tenu des hypothèses simplificatrices formulées ci-dessus les équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement, d'énergie. Ces équations en coordonnées cylindriques dans les directions (x, y, z) s'écrivent comme suit :

➤ **Équation de continuité**

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

➤ **Équations de quantités de mouvement suivant x**

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

➤ **Équations de quantités de mouvement suivant y**

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

➤ **Équations de quantités de mouvement suivant z**

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \beta (T - T_0) \quad (\text{III.4})$$

➤ **Équation d'énergie**

$$\rho C_p \left(\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.5})$$

Equation de l'énergie dans le cas du couplage convection-rayonnement

$$\rho C_p \left(\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho c} \Delta q_r \quad (\text{III.6})$$

Plusieurs études ont montré que le rayonnement a un effet sur les écoulements et le transfert de chaleur. Le couplage convection-rayonnement considère uniquement les échanges radiatifs entre les différentes surfaces du domaine, associant le fluide à un milieu transparent non-participatif. Aussi, il ne s'effectue qu'au niveau des parois. Pour la modélisation du rayonnement thermique, le code CFD FLUENT propose cinq modèles différents : modèle de rayonnement de transfert discret (DTRM), modèle de rayonnement P-1, modèle des ordonnées discrètes DO, modèle de rayonnement surface-to-Surface (S2S) et le modèle de rayonnement de Rosseland qu'on a opté pour cette étude.

III.5 Modèle de transfert radiatif de Rosseland :

L'approximation de Rosseland ou de diffusion pour le transfert radiatif est valable quand le milieu est optiquement épais $((\alpha + \sigma)L \gg 1)$. Ce modèle est recommandé pour être utilisé dans les problèmes où l'épaisseur optique est plus grande que 3.

III.6 .1Equation de modèle Rosseland :

Le flux de chaleur radiatif dans un milieu gris peut être décrit par l'équation suivante :

$$q_r = -\frac{16}{3} n^2 T^3 \nabla T \quad (III.7)$$

est donnée par l'équation suivante

$$\Gamma = \frac{1}{3(\alpha + \sigma_g) - c\sigma_g}$$

Le modèle de transfert radiatif de Rosseland suppose que l'intensité est celle du corps noir à la température du gaz.

$$G = 4 n^2 T^4 \quad (III.8)$$

Où n est l'indice de réfraction.

$$q_r = -\frac{16}{3} n^2 T^3 \nabla T \quad (III.9)$$

III.7 Simulation numérique :

III.7.1 Introduction :

Pour obtenir une solution numérique du problème étudié, on doit transformer les équations différentielles du modèle mathématique au moyen d'un processus de discrétisation en un format facile pour le processus numérique. Ce format n'est autre que le système d'équations algébriques obtenu après la discrétisation.

Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis.

La méthode des volumes finis est à l'origine de la majorité des codes de calculs (Fluent, CFD,...). La méthode des volumes finis qui se distingue par sa fiabilité quand aux résultats, son adaptation au problème physique, sa garantie pour la conservation de la masse et de quantité de mouvement et de tout scalaire transportable sur chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes numériques.

III.7.2Présentation du code de calcul :

Il existe un certain nombre de codes industriels, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulement de fluides (FLUENT, CFX, PHOENICS, STARCD, TRIO, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, N3S, CFDS-FLOW3D ...).

Le code de calcul "FLUENT" est commercialisé par le groupe FLUENT. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétences en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics) généralistes qui simulent tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe "FLUENT" aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques

Ce code est largement utilisé dans l'industrie mécanique, aéronautique, automobile et offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Le logiciel "FLUENT" modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Il est composé, comme tout logiciel du type CFD, de trois éléments clés qui sont : le pré-processeur, le solveur et le post-processeur. Nous détaillons ci-dessous ces trois éléments.

III.7.3 Pré - processeur GAMBIT :

Il permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau.

III.7.4 Solveur FLUENT

Pour des fluides incompressibles, les calculs se font en pression relative. La méthode utilisée est la méthode des volumes finis. Les étapes de calcul dans le solveur sont les suivantes :

-) Intégration des équations continues sur chaque volume de contrôle.
-) Discrétisation en espace (pour les écoulements non permanents) des équations.
-) Substitution des dérivées partielles par des approximations en différences finies transformation du système d'équations en système algébrique,
-) Résolution du système algébrique par un processus itératif ; utilisation d'un algorithme pour corriger la pression et les composantes de la vitesse afin d'assurer la conservation de la masse.

III.7.5 Post-processeur FLUENT

Le Post-processeur permet de visualiser les différents résultats à l'écran (champs de vitesse, champs de température, ligne de courant ...etc.).

III.8 Etapes principales de simulation :

GAMBIT possède une interface facile à manipuler et qui est constituée de plusieurs fenêtres d'outils d'opération destinées à construire le modèle, générer le maillage et incorporer les conditions aux limites.

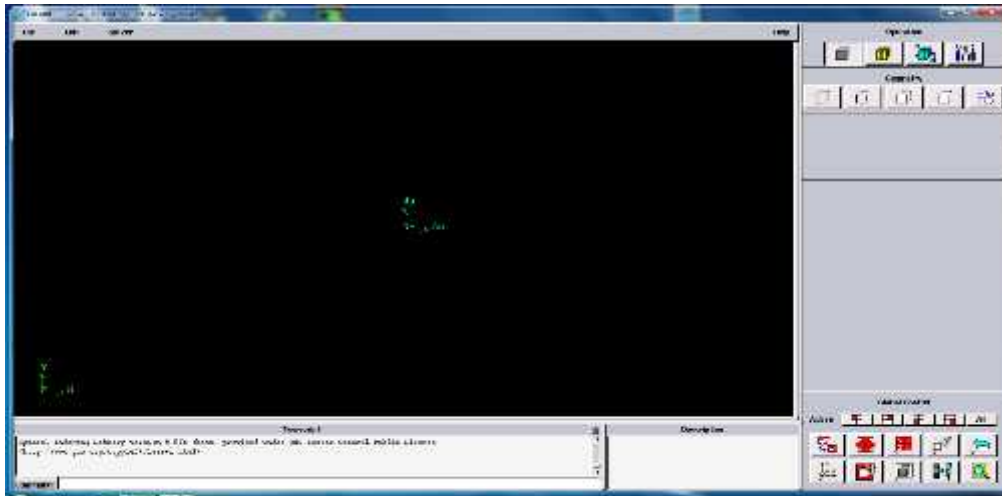


Figure III.2 : Lancement de Gambit

III.8.1 Construction de la géométrie :

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

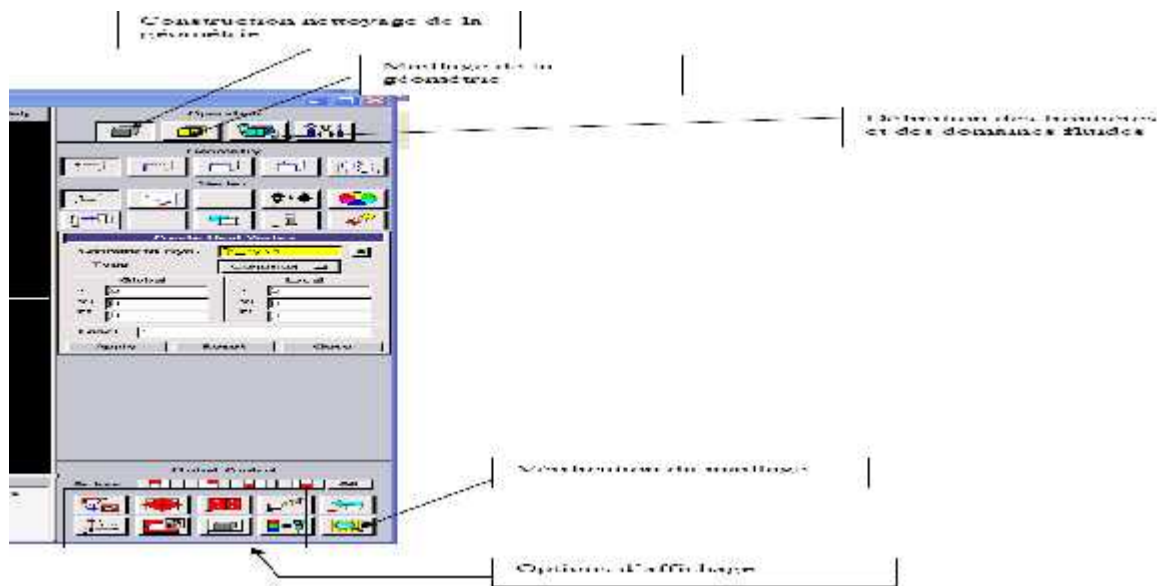
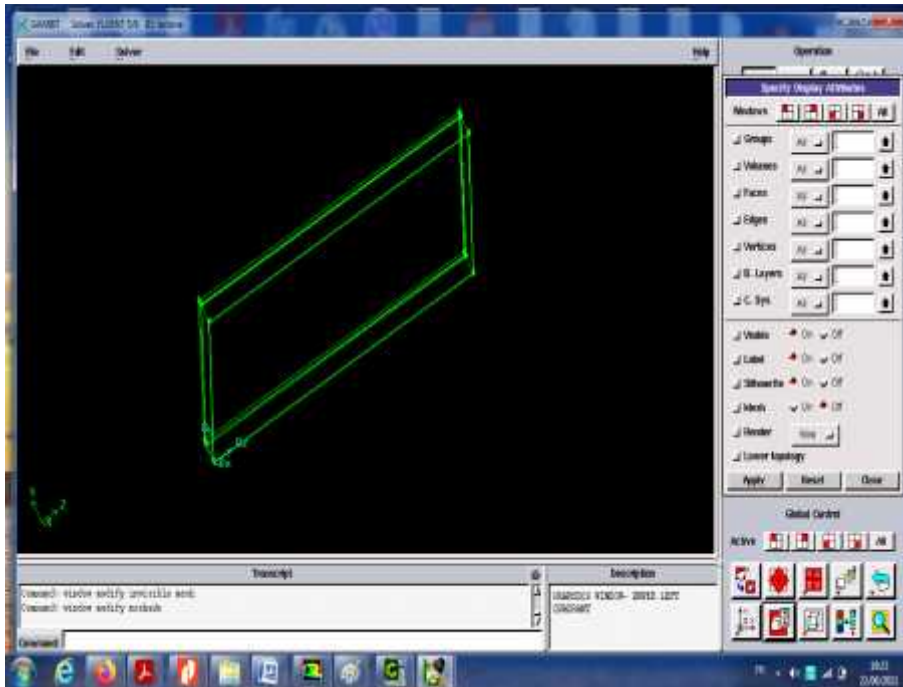


Figure III.3 : Les différentes options de Gambit**Figure III.4 :** La Forme géométrique.

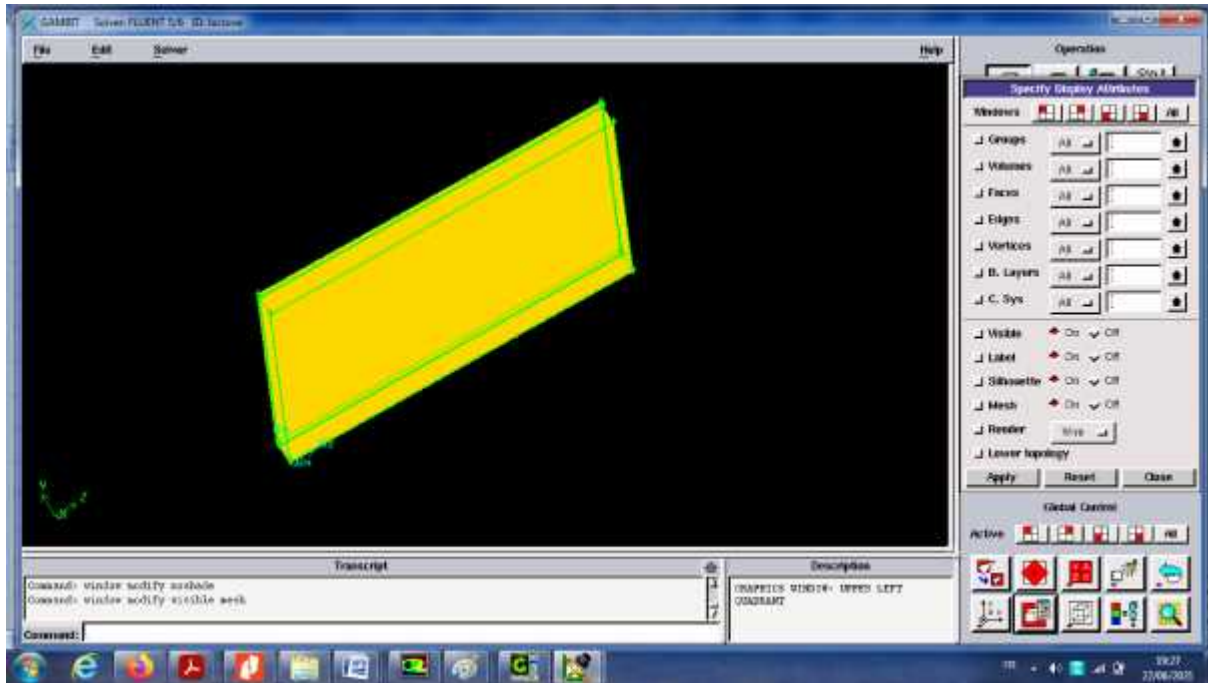
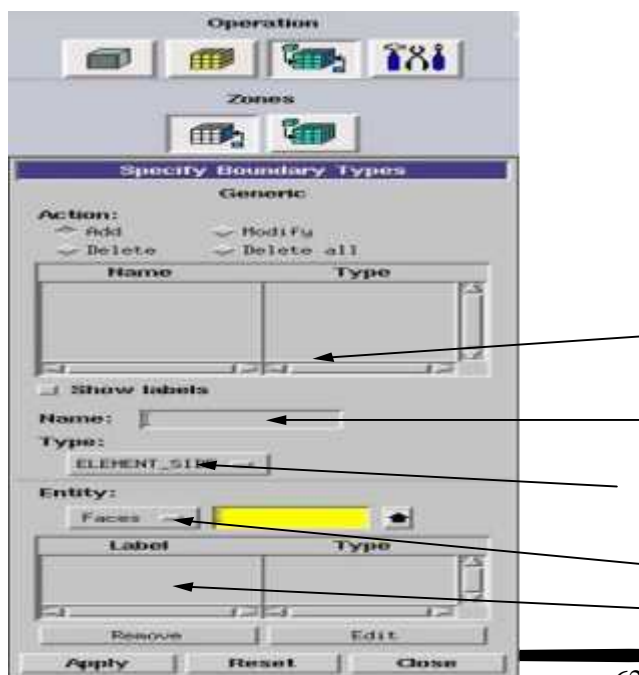


Figure III.5 : Maillage de géométrie

III.8.2. Conditions aux limites et définition des domaines :

Le mailleur Gambit peut générer des maillages que beaucoup de solveurs peuvent utiliser, ainsi nous devons spécifier le logiciel solveur avec lequel on veut traiter le fichier maillage.

Ce menu permet de définir les conditions physiques aux limites du domaine, à savoir si les lignes (en 2D) ou les faces (en 3D) sont des entrées, des sorties de fluide, des surfaces libres, des axes de symétries, des murs...



Ici on ne définit que la nature, les valeurs de ces conditions (vitesses, températures...) seront à définir sous Fluent.

Faces ou lignes définissant la limite.

Ensembles des faces que comprend la limite

Figure III.6 : Conditions aux limites

Nom donné à la limite en train d’être définie, ce nom est important car il sera repris sous Fluent et les noms ne sont pas clairs vous risquez de mélanger les limites (problématique pour fixer des conditions). Type de limite choisi (le choix varie en fonction du solveur choisi pour résoudre le problème).

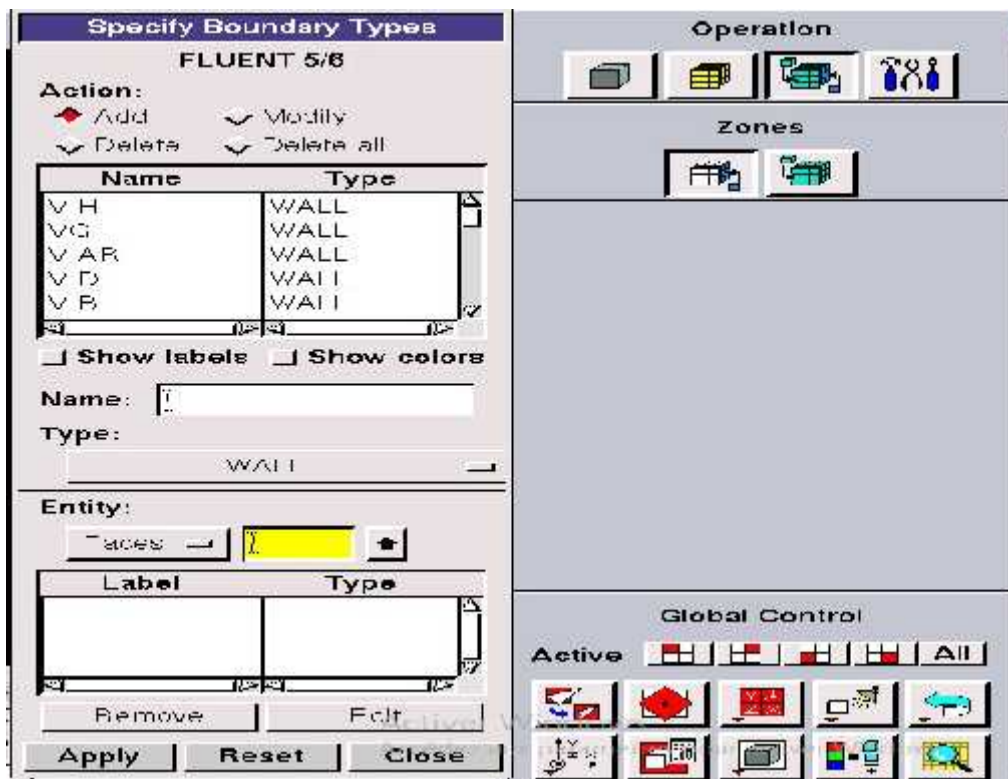


Figure III.7 : Conditions aux limites.

III.8.3 Exportation du maillage de Gambit

Une fois que la géométrie a été créée, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, en point. msh (mesh = maillage en anglais) pour que Fluent soit capable de le lire et de l’utiliser. On peut ensuite fermer Gambit en sauvegardant la session (si on souhaite la rouvrir) et lancer Fluent.



Figure III.8 : Exportation du maillage.

III.8.4 Types des fichiers qui sont créés par Gambit :

Quatre fichiers sont créés par défaut :

- **nom-fichier.dbs** : **data base** qui contient toutes les informations nécessaires à Gambit pour créer le maillage.
- **nom-fichier.jou** : journal file qui contient les commandes que l'on a effectuées.
- **nom-fichier.trn** : transcript file qui contient les messages donnés dans la fenêtre de dialogue Transcript.
- **nom-fichier.lok** : pour l'utilisation. Le fichier le plus important créé par l'utilisateur prend l'extension nom-fichier. Msh

III.9 Simulation sous FLUENT :

III.9.1 Démarrage de Fluent :

La première chose à faire quand vous entrez sous fluent est de choisir le type de résolution que Fluent va avoir à faire : résolution 2D ou 3D.

Les étapes de simulation sous Fluent sont les suivantes :

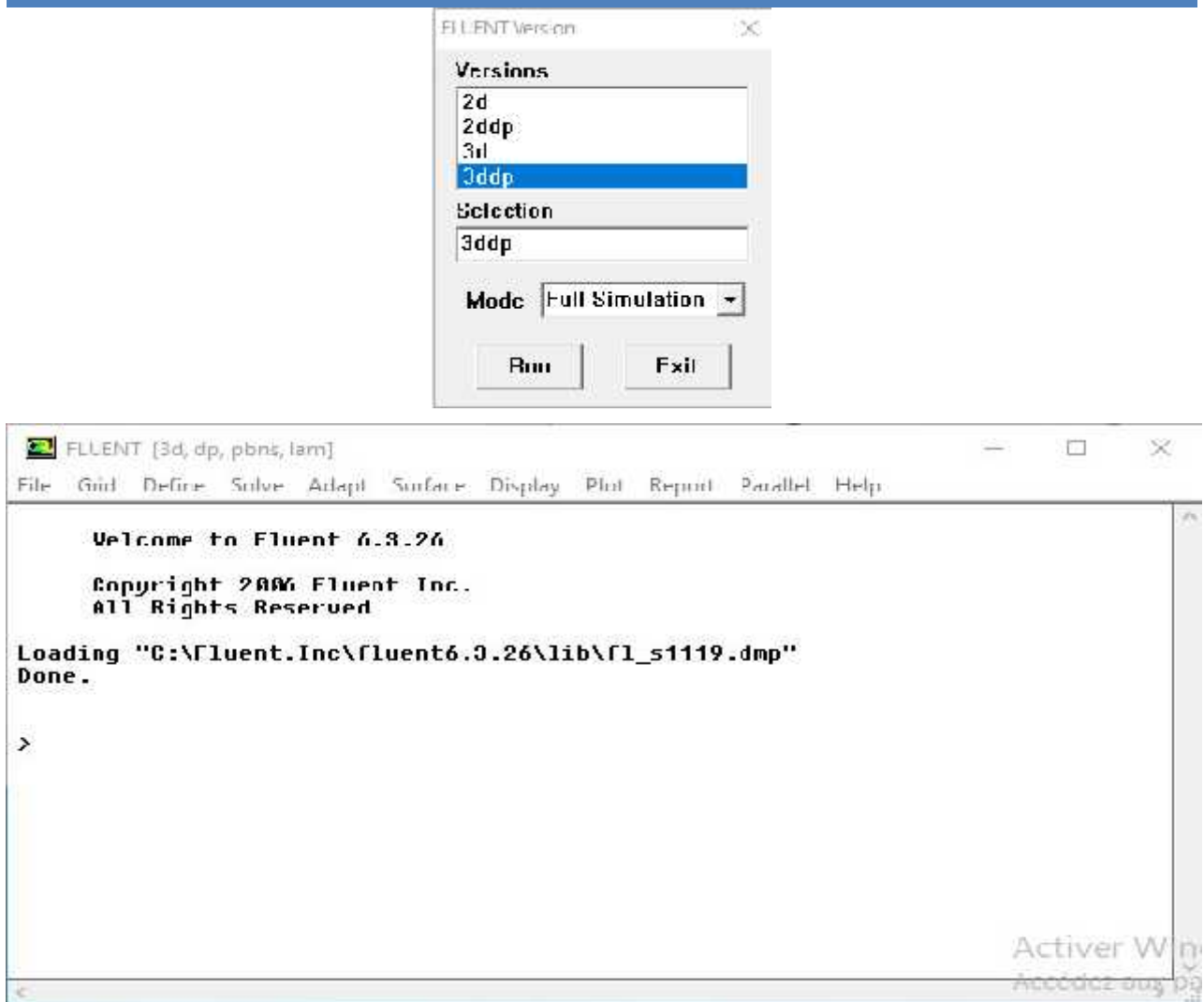


Figure. III.9 :Vue globale de Fluent.

III.9.2 Importation de la géométrie (*.msh) :

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File — **Read** — **Case...**

Figure. III.11 : vérifier la qualité de maillage.

III.9.5 Vérification de l'échelle :

Grid — Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

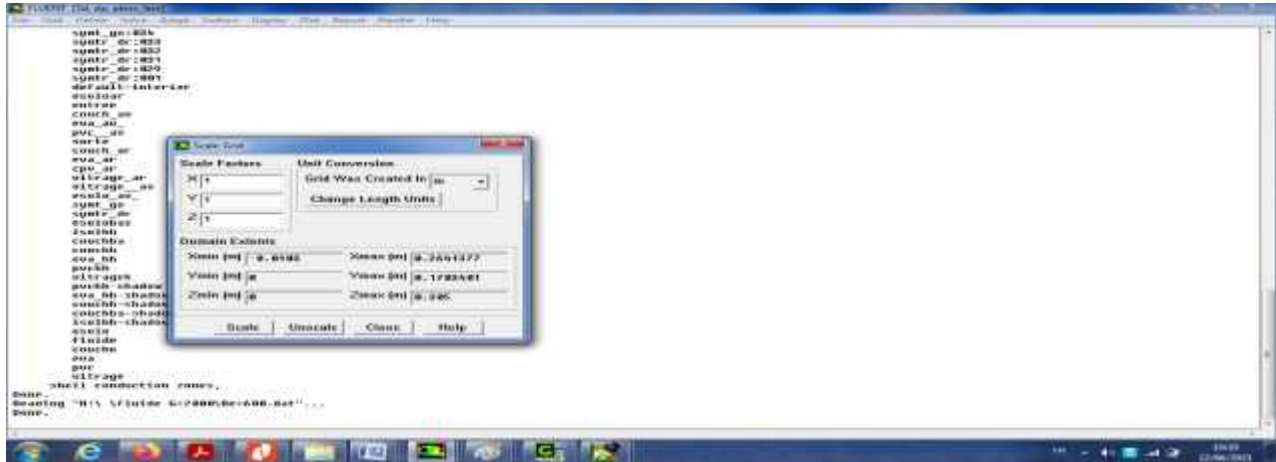


Figure. III.12 : vérification de l'échelle.

III.9.6 Présentation de la géométrie :

Display-Grid

Vous pouvez afficher le maillage et vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.

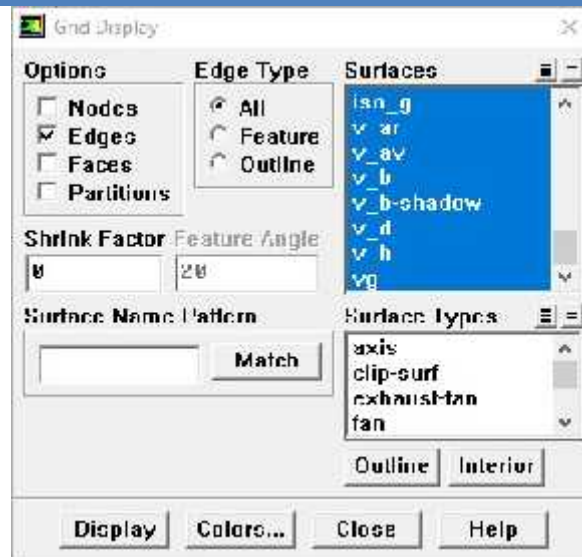


Figure. III.13 :Affichage de la grille et vérification des conditions

III.9.7 Choix du solveur :

Define Models Solver

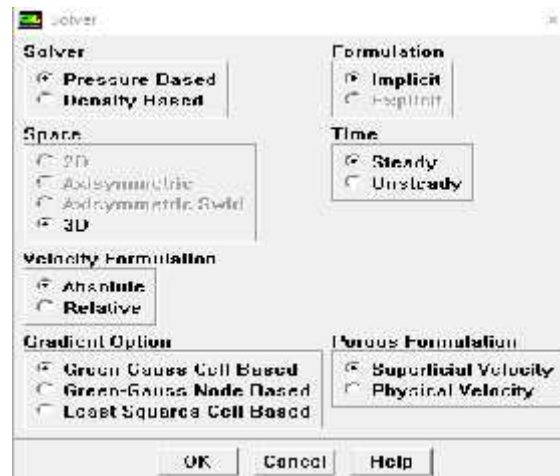


Figure. III.14 : Choix de solveur.

III.9.8 Autorisation du transfert de chaleur :

Define Models Energy

Formulation de l'équation d'énergie

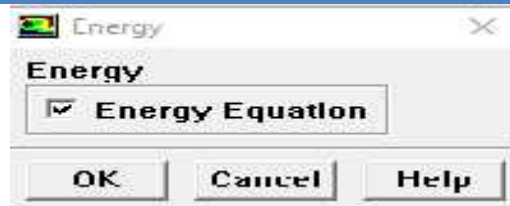


Figure. III.15 : Autorisation l'équation de l'énergie.

III.9.9 Choix du type d'écoulement :

Define Models Viscous

À écoulement **laminaire** est l'option par défaut. Nous n'avons donc pas besoin de changer quoi que ce soit dans ce menu. Cliquez sur **Cancel**.

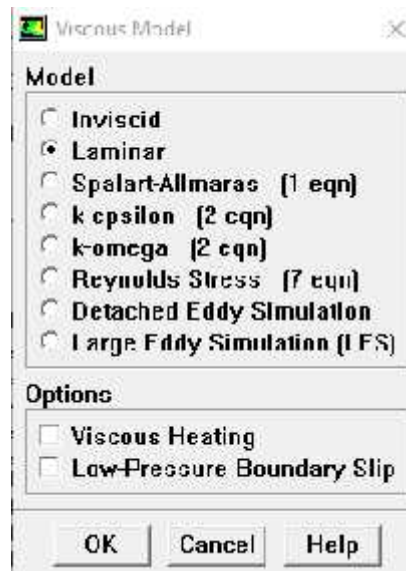


Figure. III.16 : Choix du type d'écoulement

III.9.10 Choix du modèle de rayonnement :



Figure. III.17 : Choix du modèle de rayonnement

III.9.11 Définir la position pour le calcul solaire :

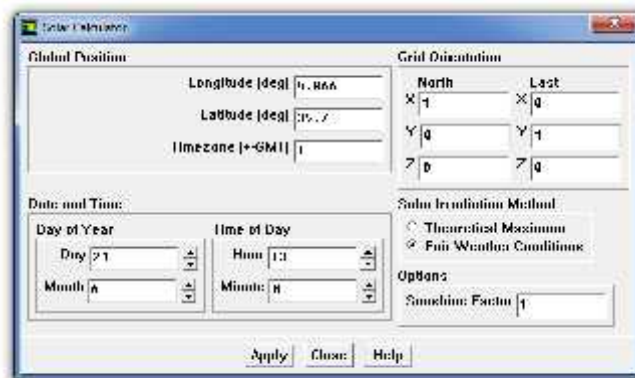


Figure. III.18 : Calculs solaires

III.9.12 Définir les propriétés des matériaux :

Define Materials...

C'est le choix du fluide ou solide utilisé avec l'introduction des données concernant les propriétés physiques.

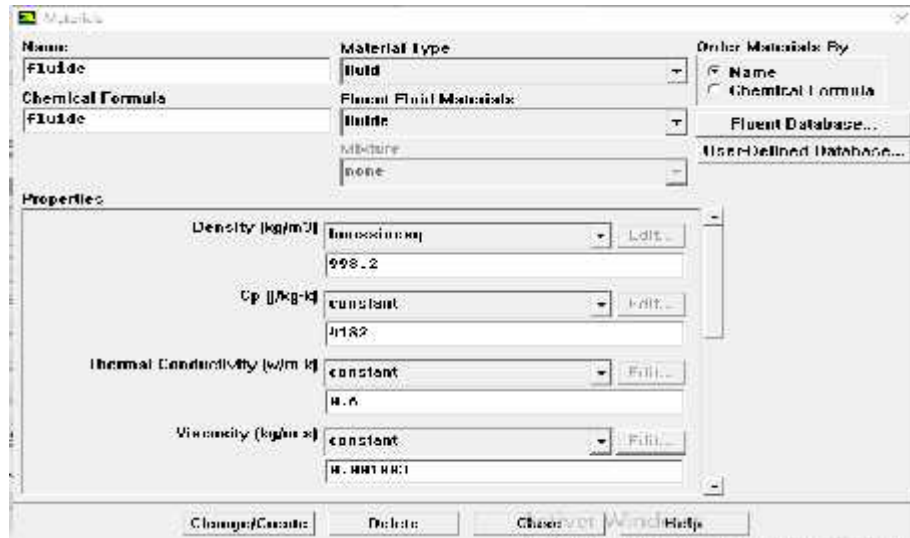


Figure III.19 : Définir les propriétés physiques des matériaux.

III.9.13 Définir les conditions aux limites :

Define Operating condition

Fluent prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme opérating pressure, en défini la gravite suivant l'axe z.

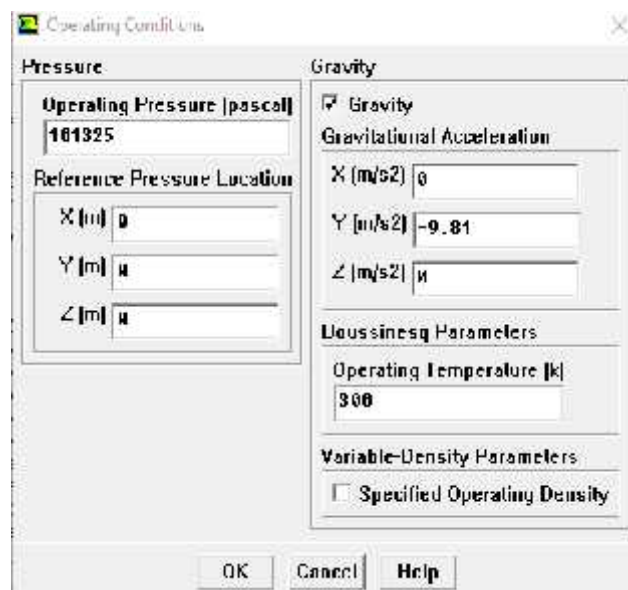
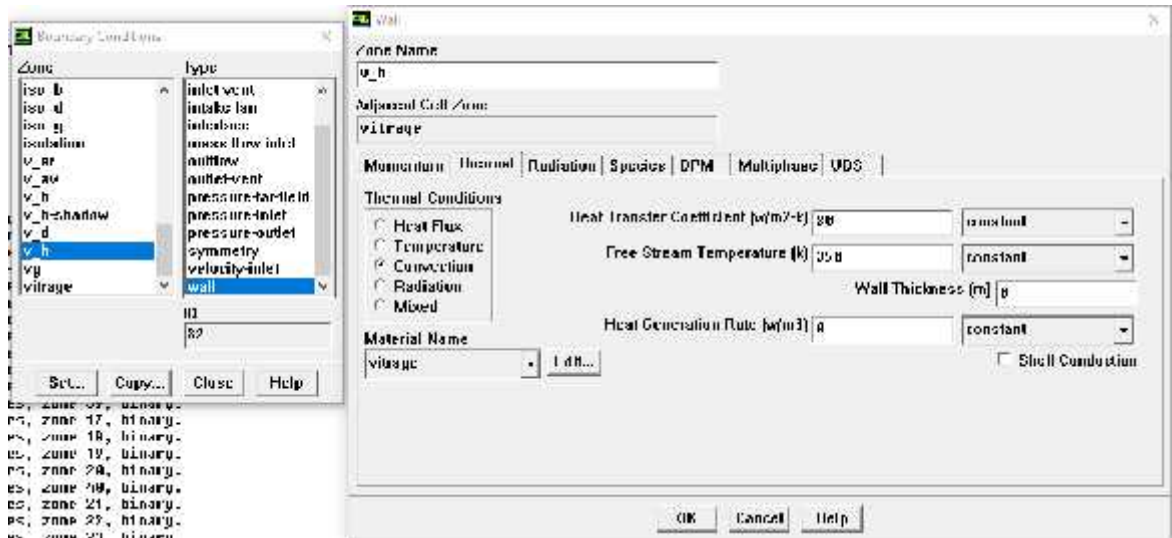


Figure III.20 : Choix de la pression de référence.

Define Boundary Conditions...

Les conditions aux limites pour chaque frontière seront définies avec la fenêtre Boundary condition, après avoir sélectionné chaque fois, la frontière concernée et faire rentrer les conditions aux limites de cette dernière ensuite valider.



FigureIII.21 : Valeurs des conditions aux limites.

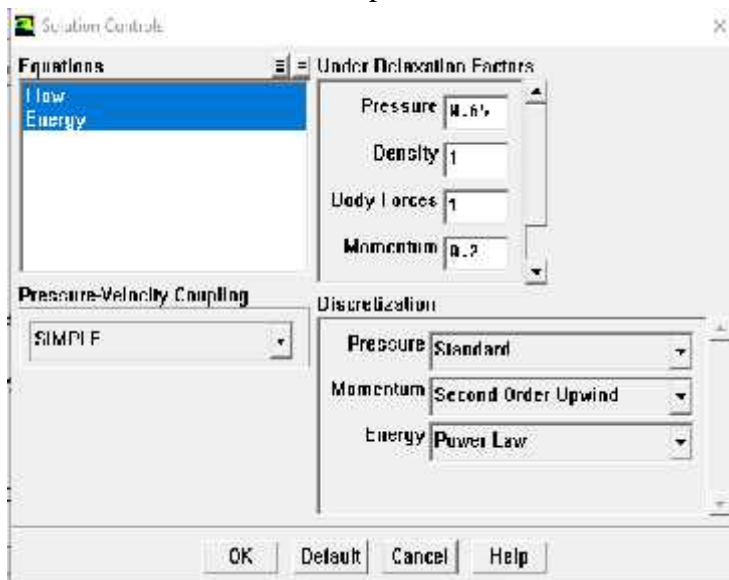
III.9.14 Les facteurs de sous- relaxation :

Solve Controls Solution

Le facteur de sous-relaxation est utilisé pour stabiliser le processus itératif et éviter la divergence dû à la forte variation de valeurs entre deux itération successive, définis en générale par :

$$new = \Phi_{old} + \alpha \Delta \Phi$$

Les facteurs de sous relaxation sont compris entre 0 et 1.



FigureIII.22 :Choix des facteurs de sous relaxation et les schémas de discrétisation

III.9.15 Initialisation du calcul :

Solve Initialize Initialize...

Initialiser le champ d'écoulement pour la valeur à l'entrée :

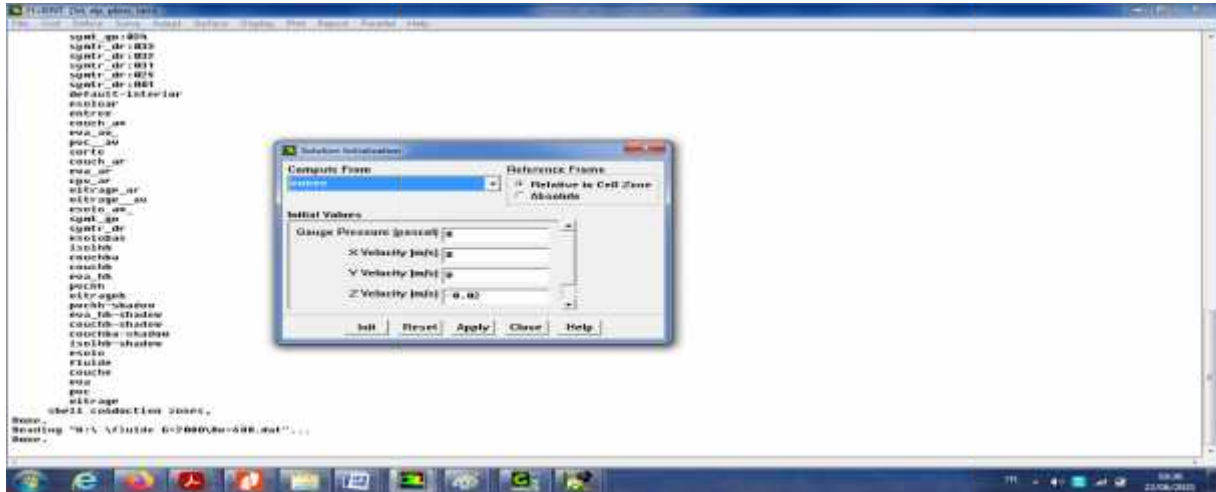


Figure. III.23 : Initialisation de la solution.

III.9.16 Choix du résidu :

Solve Monitors Residual...

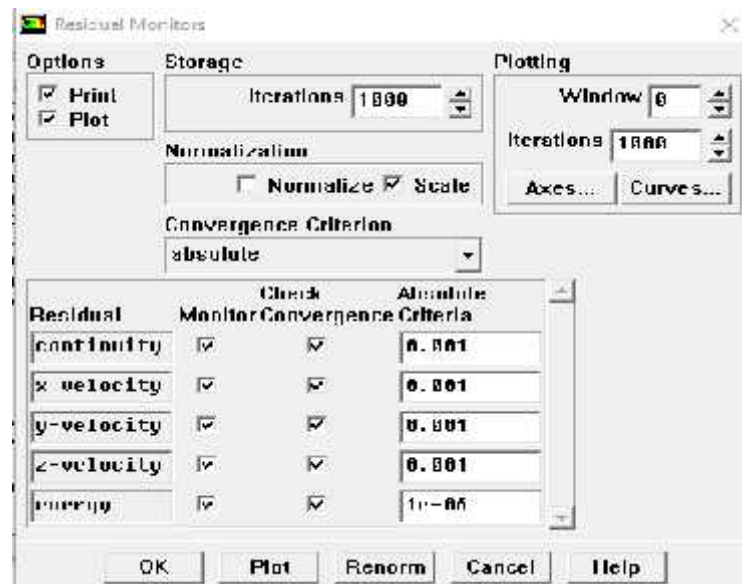


Figure.III.24: Choix des résidus

III.9.17 Calcul : Solve Iterate :

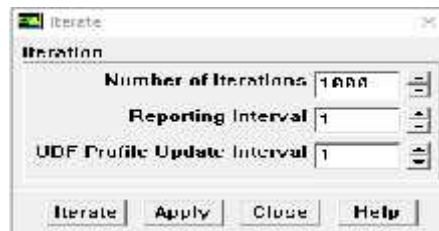


Figure. III. 25 : Choix des nombres des itérations.

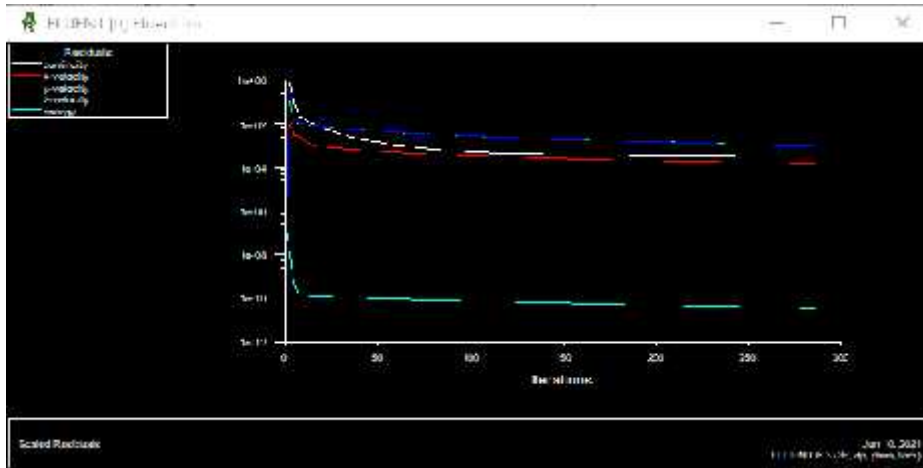


Figure. III.26 : Allure de l'évolution des résidus de calcul.

On choisit un nombre d'itération et clique sur « iterate ». Vous recliquez sur « iterate » tant que vous ne voyez pas de plateau sur le graphique des résidus affiché par Fluent.

III.9.18 Visualisation des résultats :

Display **Contours Display** **vecteur** **Display** **pathline**

Ces options permettent de déterminer les vecteurs des variables, traçage des profils, ligne de courant.

III.9.19 Sauvegarde de fichier :

File **Write** **Case& Dat**

III.10 Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons présenté Gambit et le code calcul Fluent ainsi que les étapes de simulation en utilisant les préprocesseurs Gambit pour créer la géométrie et maillage et le code Fluent pour la résolution des équations gouvernantes. Les résultats de ces simulations seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Résultats et Discussions

CHAPITRE IV

Résultats et Discussions

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de simulations d'un panneau photovoltaïque à eau ou air. Notre travail a porté sur la variation de la température des différentes parties du panneau photovoltaïque en fonction du rayonnement incident, la température externe du vitrage ainsi que le débit pour les fluides l'eau ensuite l'air.

Les calculs sont effectués dans la ville de m'sila de coordonnées géographiques sont :

Latitude de $35^{\circ}18'N$ et une Longitude de $4^{\circ}14'E$ et un décalage horaire de 1heure. Pour une date le 20 Juin à 13h dans les conditions normales.

La fluide eau et l'air sont portés à la température ambiante $T_a=300K$, dont les propriétés physiques sont présentées dans le tableau suivant :

les propriétés thermo-physiques	Air	eau
La masse volumique $[\text{kg}/\text{m}^3]$	1.122	998
La chaleur spécifique $C_p [\text{J}/\text{kg.K}]$	1006.6	4182
La conductivité thermique $k [\text{W}/\text{m.K}]$	0.0262	0.6
La viscosité dynamique $\mu [\text{kg}/\text{m.s}]$	$1.85 \cdot 10^{-5}$	0.001003
Coefficient de dilatation thermique $[1/K]$	0.003355	0.00021

TableauIV. 1: Propriétés Physiques de l'air et l'eau

Les calculs ont été réalisées pour cette configuration avec un maillage de 972000_{noeuds} pour laquelle nous avons effectués les simulations pour des différents débits de fluides c'est-à-dire des nombres de Reynolds $Re=200,433, 600,1000$ et 1500 .

Lees principaux paramètre des panneaux solaires utilisés dans nos simulations sont classés dans le tableau(IV.2).

IV.2.Champs de températures :

Les figures (IV.2, IV.3, et IV4), montrent la variation des champs de température dans le panneau pour la fluide eau et l'air à des nombres de Reynolds $Re=433, 600$ et 1500 pour une irradiation solaire $IS=1900\text{W}/\text{m}^2$ et une température du vitrage $T_v=320K$. Nous constatons d'après ces figures que la face externe du vitrage est plus chaude que les autres éléments du panneau et la température

du fluide est légèrement chauffée pour l'air est plus élevée que l'eau pour tous les nombres de Reynolds.

Les figures (IV.5, IV.6, IV.7, IV.8 et IV.9) montrent pour $Re=1500$ et des températures du vitrage $T_v=320K$, $380K$, et $400K$ et $IS=2000W/m^2$ les contours de température montrent que la température du vitrage augmente. On peut le voir aussi dans les figures (IV.10, IV.11) qui montrent la variation de la température des éléments du panneau pour des différentes températures du vitrage et les irradiances solaire $IS = 1900W/m^2$ et $IS = 2000W/m^2$. Il est clair que la température la plus élevée est celle du vitrage ensuite celle de la cellule puis l'EVA, la couche, le fluide et enfin l'isolation.

Paramètres	Vitrage	Cellule	Eva	couche	Isolant
Coefficient d'absorption (m^{-1})	$\nu=0.04$	$c=0.9$	$c=0.04$		-
Coefficient de transmission (m^{-1})	$\nu=0.9$	$c=0.09$	$\nu=0.2$	$\nu=0.9$	-
Emissivité	$\nu=0.86$	$\nu=0.7$			
Épaisseur (mm)	3mm	0.3mm	0.3mm	1mm	1mm
Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	$k_v= 1.8$	148	0.35	202.4	0.034
Densité ($kg.m^{-3}$)	$\nu= 3000$	2330	960	2719	24
Chaleur spécifique ($J.kg.K$)	500	677	900	871	919

Tableau IV. 2 : Paramètres utilisés dans les simulations

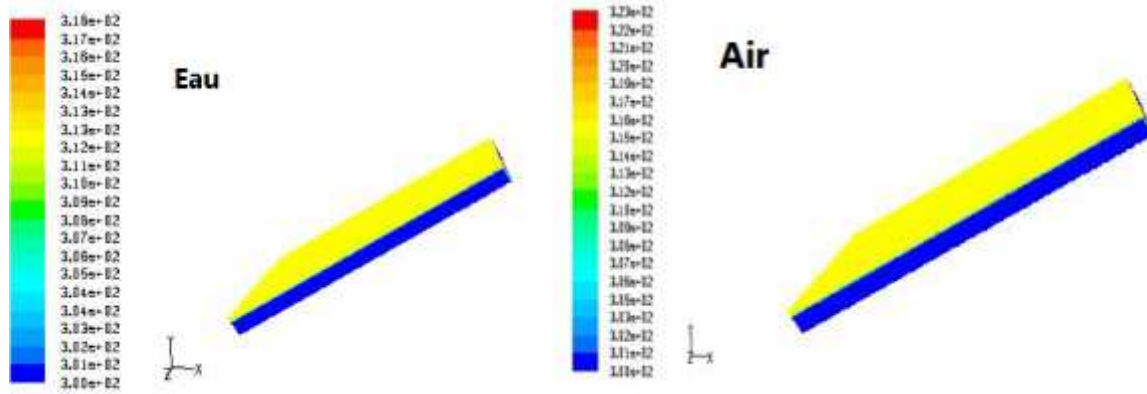


Figure IV.2 : Contours de Températures pour $Re = 433$, $T_v = 320$ K et $IS = 1900$ W/m²

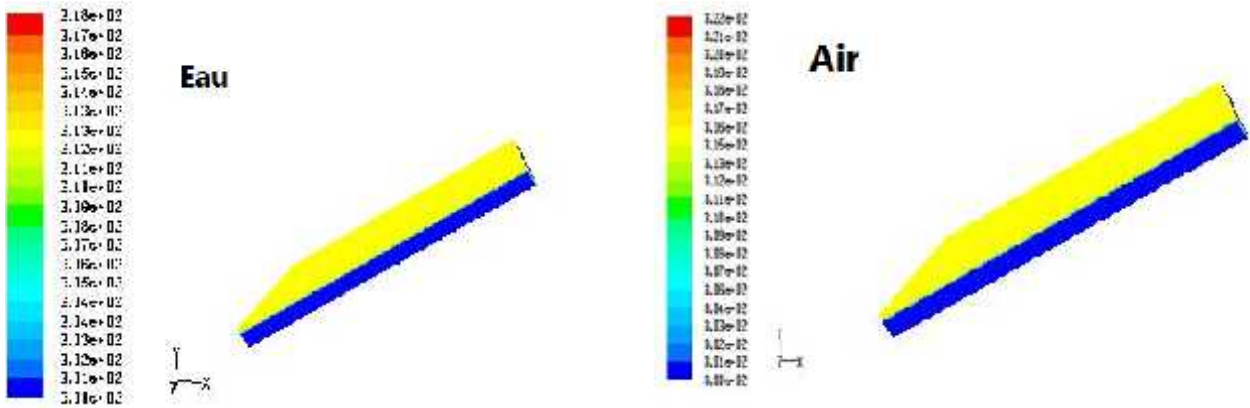


Figure IV.3 : Contours de Températures $Re = 600$, $T_v = 320$ K et $IS = 1900$ W/m

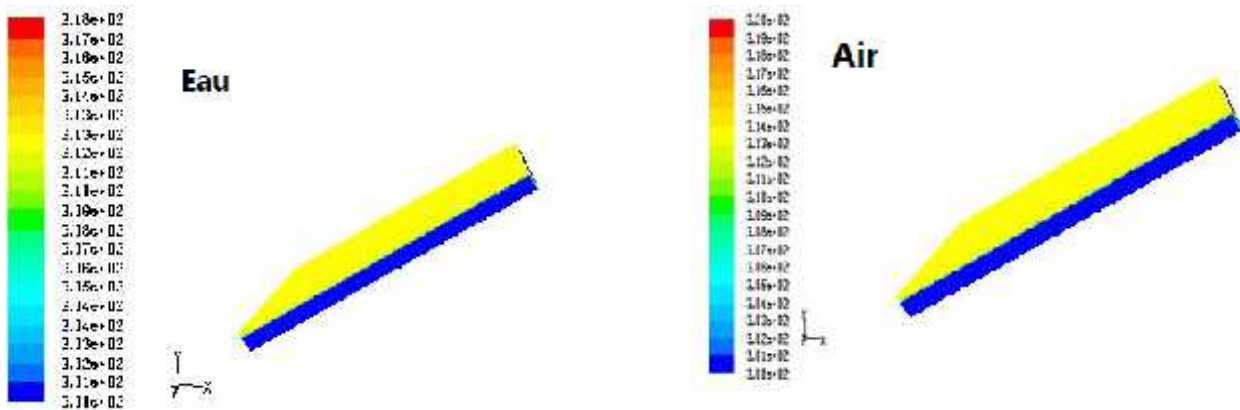


Figure IV.4 : Contours de Températures $Re = 1500$, $T_v = 320$ K et $IS = 1900$ W/m

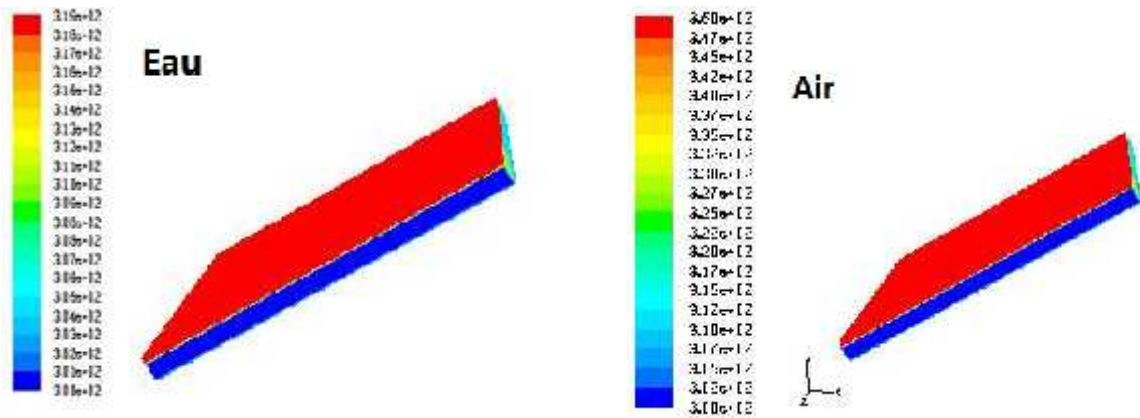


Figure IV.5 :Contours de Températures $Re = 1500, T= 320 \text{ K}$ et $IS = 2000 \text{ W/m}^2$

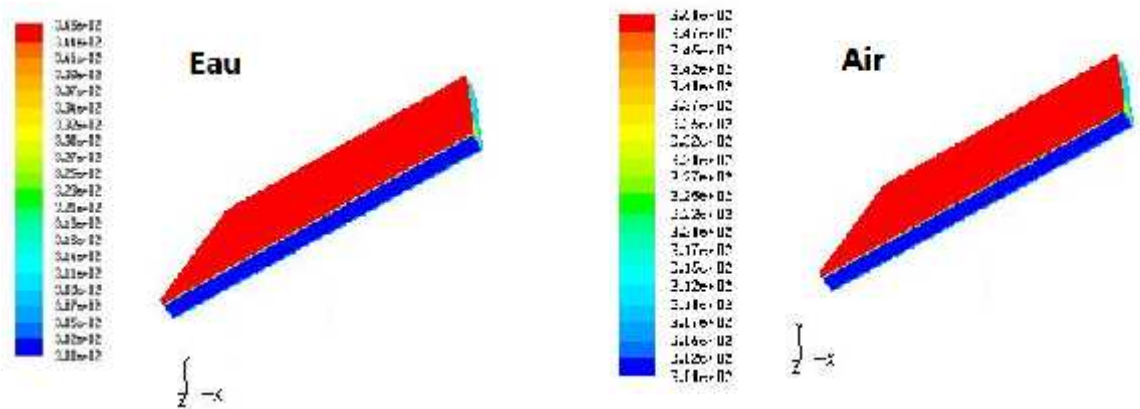


Figure IV.6 :Contours de Températures $Re = 1500, T= 380 \text{ K}$ et $IS = 2000 \text{ W/m}^2$

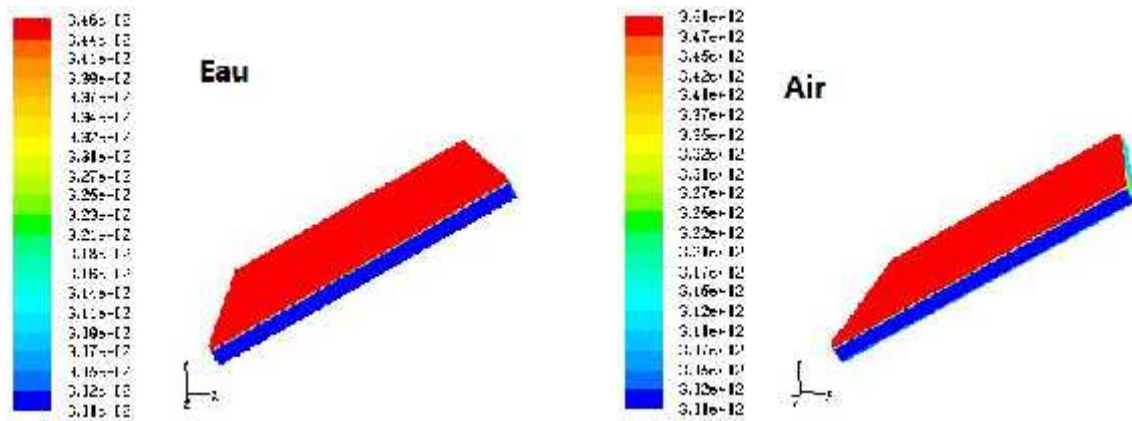


Figure IV.7 :Contours de Températures $Re = 1500, T= 380$ Ket $IS = 1900W/m^2$

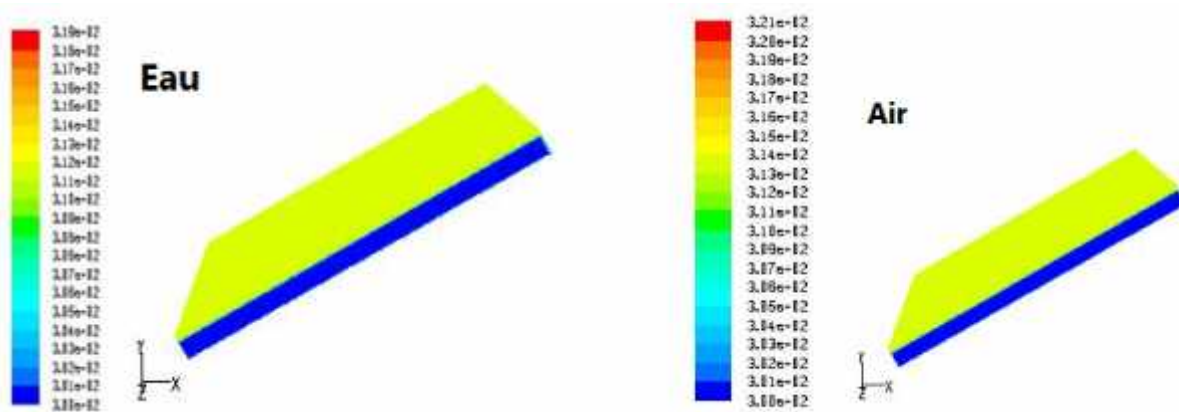


Figure IV.8 :Contours de Températures $Re = 1500, T= 320$ Ket $IS = 2000W/m^2$

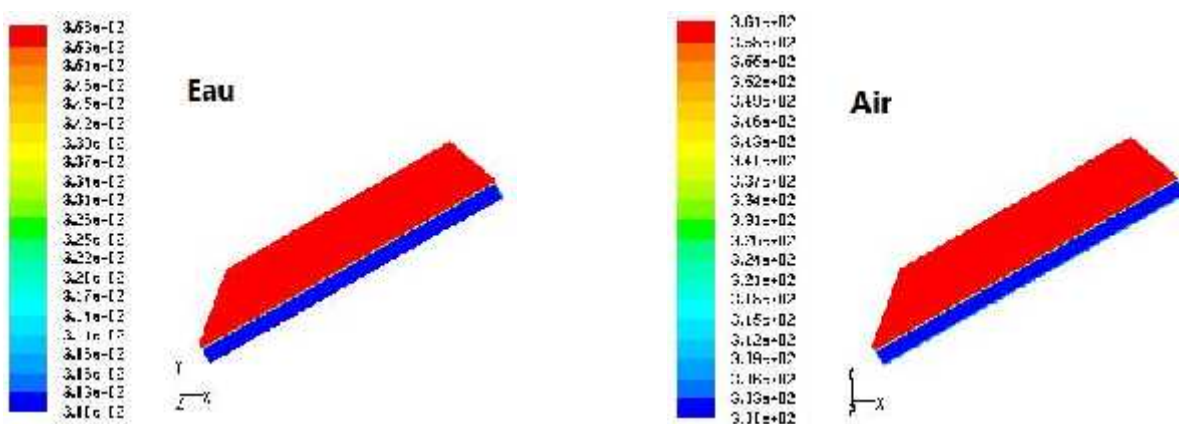


Figure IV.9 :Contours de Températures $Re = 1500, T= 400$ Ket $IS = 2000W/m^2$

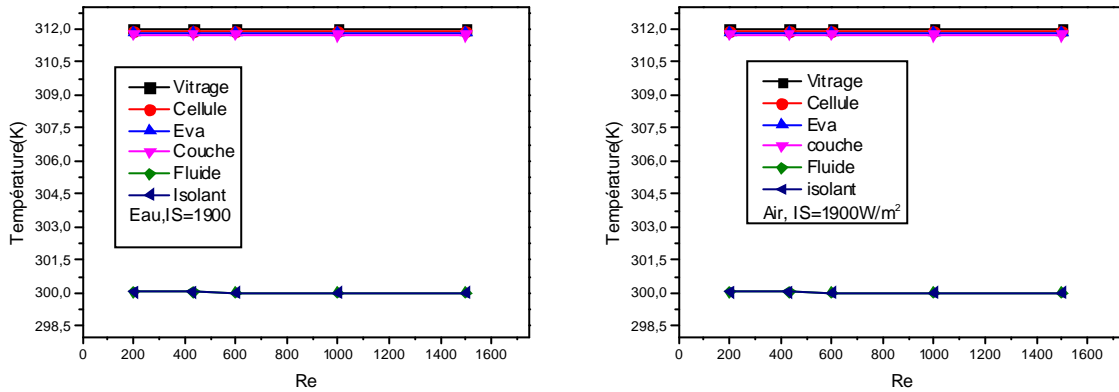


Figure IV.10 : Variation de la Températures du panneau en fonction de Re

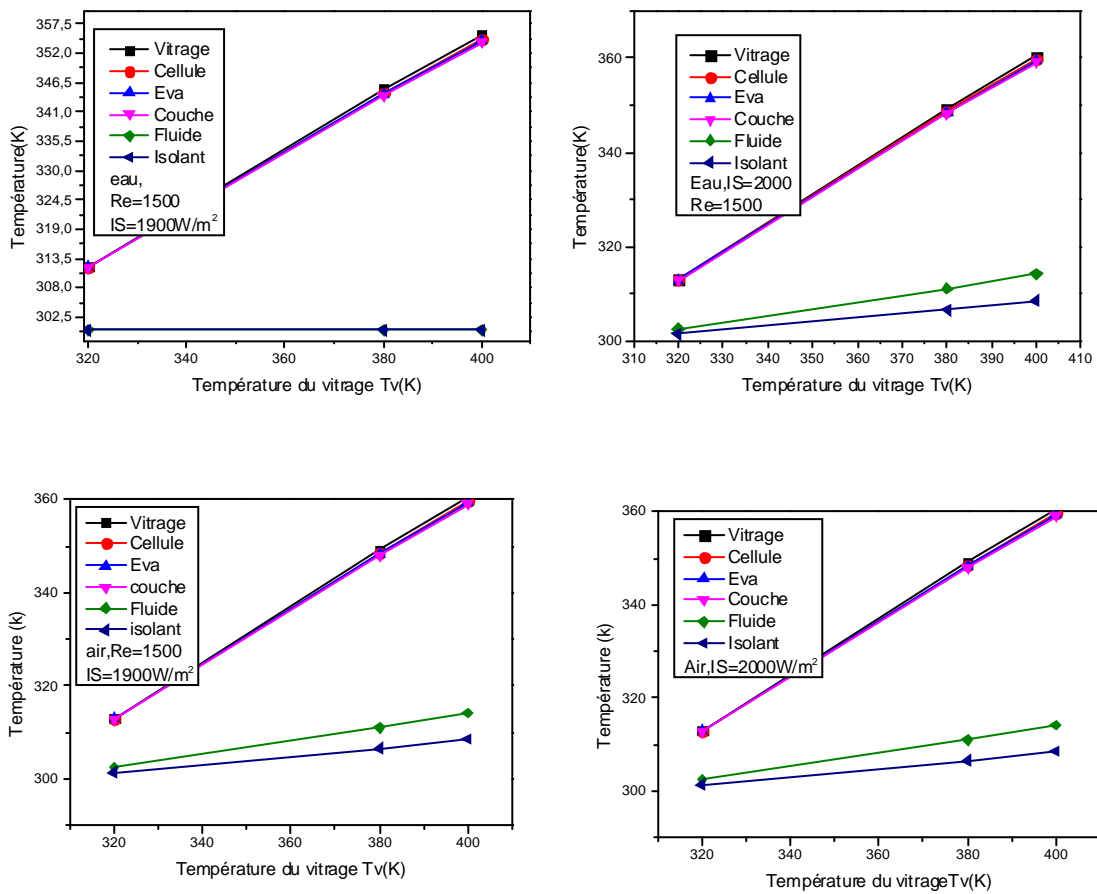


Figure IV.11 : Variation de la Températures du panneau en fonction de la température du vitrage

IV.2 Champs de vitesses pour l'eau et l'air

Les figures (IV.12, IV.13, IV.14) Montrent les contours de vitesses pour les différents nombres de Reynolds et différentes températures, nous constatons que la vitesse du fluide augmente quand le nombre de Reynolds augmente, aussi la vitesse est plus élevée pour l'air que pour l'eau.

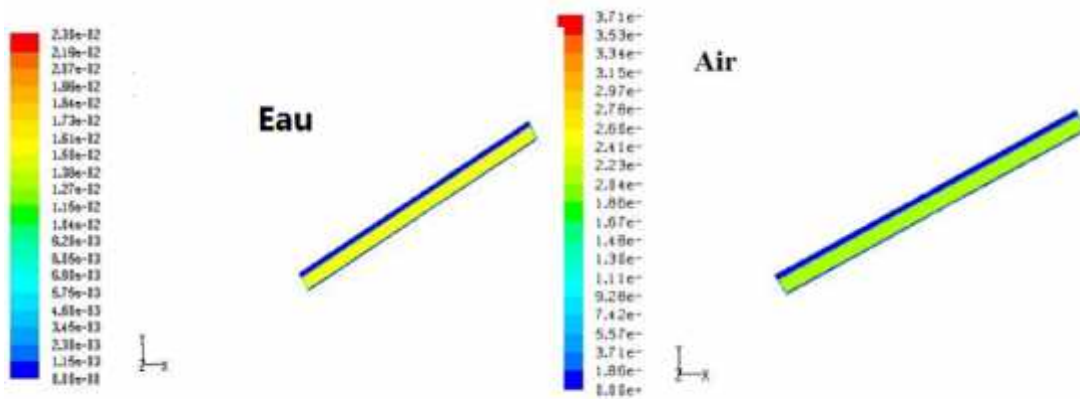


Figure IV.12 :Contours de Vitesse $Re = 433, T = 320 K$ et $IS = 1900 W/m^2$

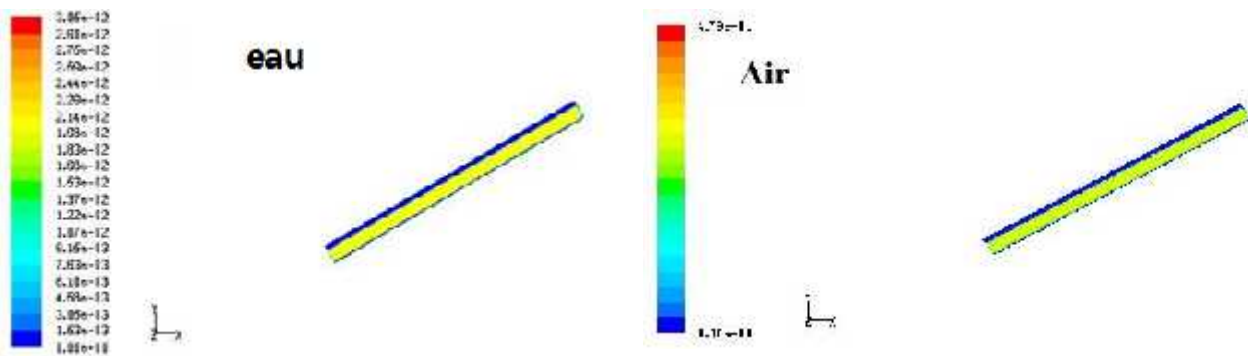


Figure IV.13 :Contours de Vitesse $Re = 433, T = 320 K$ et $IS = 1900 W/m^2$

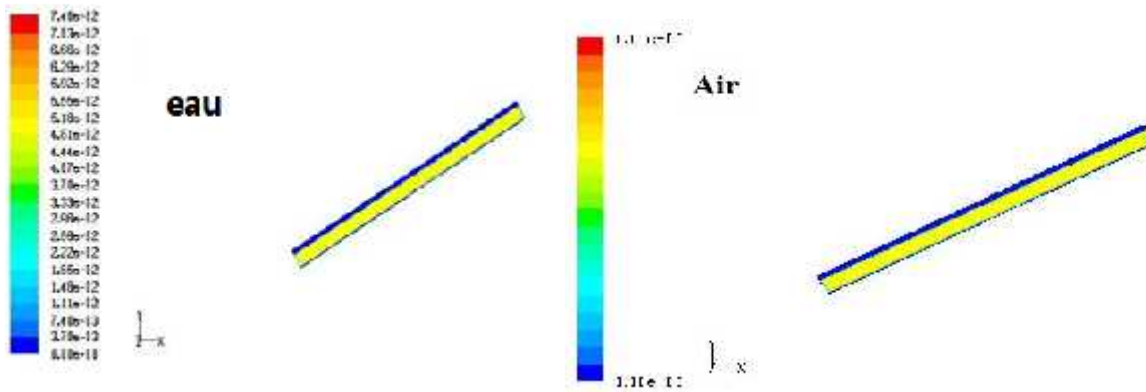


Figure IV.14 :Contours de Vitesse Re = 433,T= 320 Ket IS = 1900W/m²

IV.3 Le rendement

L'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané, le rendement η_{th} 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_{ub}).il est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ub}} = \frac{P_u}{A \times G} \tag{IV.1}$$

P_u = la puissance utile récupérée par le fluide

P_{ub} : la puissance solaire arrivant sur le capteur.

A : surface du capteur(m²).

G : flux solaire global incident.

La puissance récupérée par le fluide est donnée par

$$P_u = \dot{m} C_p (T_{fs} - T_e) \tag{IV.2}$$

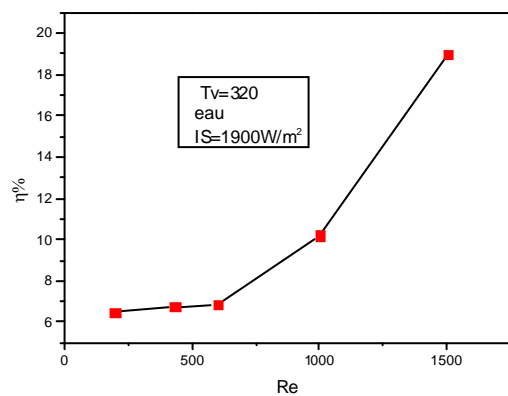
\dot{m} : le débit massique du fluide

C_p : La chaleur massique

T_{fs} et T_e la température du fluide à la sortie et à l'entrée

La figure (IV.15) montre la variation du rendement du panneau en fonction du nombre de Reynolds pour une température du vitrage $T_v=320$ et la fluide eau. Nous remarquons que le rendement augmente quand le nombre de Reynolds augment on a un rendement de 19% pour $Re=1500$ et environs 6.48% pour $Re=200$.

La figure (IV. 16) montre la variation du rendement du panneau en fonction de la température pour une irradiation solaire de $2000W/m^2$ et $Re=1500$ pour l'eau et l'air. Nous remarquons d'après cette figure que on voit qu'un panneau avec comme fluide l'air donne un bon rendement par rapport à l'air



FigureIV.15 : Rendement du panneau pour $T_v=320K$

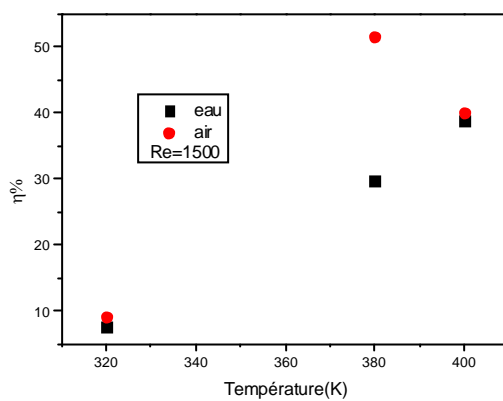


Figure IV. 16 : Rendement du panneau pour $Re=1500$ et $IS=2000W/m^2$

Conclusion Générale

Ce travail représente, une étude numérique du comportement thermique d'un panneau photovoltaïque hybride. Afin de caractériser les performances des capteurs PV/T qui produisent à la fois de la chaleur et de l'électricité à partir d'un seul système.

Les logiciels Gambit et Fluent 6.3.26 ont été utilisés pour la construction de la géométrie et les simulations numériques.

Notre travail a porté sur la variation de la température des différentes parties du panneau photovoltaïque en fonction du rayonnement incident, la température externe du vitrage ainsi que le débit pour les fluides l'eau ensuite l'air.

Les calculs ont été réalisées pour cette configuration avec un maillage de 972000_{nœuds} pour laquelle nous avons effectués les simulations pour des différents débits de fluides c'est-à-dire des nombres de Reynolds $Re=200,433, 600,1000$ et 1500. Notre intérêt est de caractériser la distribution de la température des différents éléments du capteur. Les résultats obtenus ont montrés que :

- La température la plus élevée est celle du vitrage ensuite celle de la cellule puis l'EVA, la couche, le fluide et enfin l'isolation.
- la vitesse du fluide augmente quand le nombre de Reynolds augmente, aussi la vitesse est plus élevée pour l'air que pour l'eau.
- Le rendement augmente quand le nombre de Reynolds augment on a un rendement de 19% pour $Re=1500$ et environs 6.48% pour $Re=200$.
- Un panneau avec comme fluide l'air donne un bon rendement par rapport à l'eau

Références

- [1] Mefti, A., Bouroubi, M. Y., & Mimouni, H. (2002). Evaluation du potentiel énergétique solaire. *Bulletin des énergies renouvelables*, (2).
- [2] **J.M Chassériau**, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [3] **R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz**, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
- [4] **MR Maouedj Rachid**, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah , Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd Faculté des Sciences Département de physique 2005.
- [5] **Charles Chauliagnet** : L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981P22, 32 et p147-148.
- [6] **Khoudrane Ismail** " Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques ". Mémoire de master en énergétique. Université de Ksdi Merbah Ouargla 2014.
- [7] **J.M Chassériau, 1984** : Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod
- [8] **J.A Duffie & W.A Beckman, 1974** : Solar Energy Thermal Processes; 2nd edition, Wiley Interscience, New York,
- [9] **P. Rivet**, Le Rayonnement solaire ; CNRS..
- [10] Mohamed, S. A. L. M. I. (2015). LE GISEMENT SOLAIRE.
- [11] **S. BEKKOUCHE**. "Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs". Solaires. Option « Electronique et Modélisation » . Thèse doctorat. l'université Abou- bakrBelkaid – Tlemcen. (2008).
- [12] : L, AICHE-HAMAE.A.KHELLAF. « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie » congrée sur le photovoltaïque et l'énergie éolienne (IPCWE) Tlemcen, Algérie (Novembre2003).
- [13] :N. KASBADJI MERZOUK « Evaluation du Gisement énergétique éolien contribution a

REFERENCE

la détermination du profile vertical de la vitesse de vent en Algérie» thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, 2006

[14] **A, Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni.** Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).

[15] : **BELAId, W. A. H. I. B. A.** (2014). *Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire* (Doctoral dissertation).

[16] : **A. Khelifa K. Touafek H. Ben Moussa, M. Adouane, I. Tabet** *Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133 Ghardaïa, Algeria*

[17] ; mémoire < l'énergie solaire et fonctionnement de la centrale solaire de cheikh zayed >

[18] Etude et conception d'une centrale solaire photovoltaïque (Faculte de technologie /Universite Mohamed Boudiaf - M'sila)

[19]: **Kalla fayçal** « Conversion thermodynamique de l'énergie solaire : Etude et modélisation d'un capteur solaire ». Mémoire magistère. 2015

[20] : **Azeddine, Hamidi** (Faculte de technologie / Universite Mohamed Boudiaf - M'sila, 2017)

[21] : **abdeldjear, Charik** (UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016)

[22] : **L. Bouragbi**, "Étude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire ", mémoire de magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA , 2008

[23] : **N. Moumami, A. Moumami, Belgacem Abed, a. Hachemi et M. Le Ray.** "Prévision systématique des performances des capteurs solaire plans à air dans divers sites de climats différents en Algérie", National Energie Conférence, Neptur Roumani, - juillet 1995

[24] : Aide au dimensionnement Capteurs solaires, www.garantie-de-performance.ch

[25] : L'installation chauffe eau solaire individuelle (C.E.S.I) (Chauffe Eau Solaire Individuel), <http://www.2027plomberie.com/>

[26]: **A.A. El-Sebaii, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, S.M. Shalaby, B.M. Moharram,** "Investigation of thermal performance of double pass- flat and v- corrugated plate solar air heaters", Energy Vol. 36, pp. 1076–1086, 2011

[27] : **D. Dovicé, M. Andrassy**, "Numerically assisted analysis of flat and corrugated plate solar collectors thermal performances", Solar Energy, Vol. 86, pp. 2416–2431, 2012.

[28] : **K. Aoues, N. Moumami, M. Zellouf, A. Moumami, A. Labed, E. Achouri et A. Benchabane**, "Amélioration des Performances Thermiques d'un Capteur Solaire Plan à Air - Etude Expérimentale dans la Région de Biskra", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12,

REFERENCE

pp. 237 - 248, 2009.

[29] :A. Ahmed-Zaid, A. Moulla, M. S. Hantala et J.Y. Desmons, “Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à Air: Application au Séchage de l’Oignon Jaune et du Hareng”, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 4, pp. 69 – 78, 2001.

[30]: F. Chabane, N. Moumami, S. Benramache, “Experimental study of heat transfer and thermal performance with longitudinal fins of solar air heater”, *Journal of Advanced Research*, Vol.5,pp.183–192,2014.

[31]: Villalva M. G. & al, 2009. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *Journal of power electronics*, 24 (5) 1198-1208.

[32] : mémoire de magister < contribution à l’étude de conception d’une centrale photovoltaïque de puissance 1 MW. (AMARA karima).

[33] : Lincot, D. (2007). la conversion photovoltaïque de l’énergie solaire. *Découverte n0344-345*,(2007), 47, 65.

[34]: [Ahmer A.B. Baloch, Haitham M.S. Bahaidarah, Palanichamy Gandhidasan and Fahad A. Al-Sulaiman, 2015. Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. *Energy Conversion and Management*, 103 14–27.

[35] :Fujisawa T & T.Tani, 1997. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47 135–48.

[36]: Tripanagnostopoulos Y, Nousia TH, Souliotis M, Yianoulis P, 2002. Hybrid PV/thermal solar systems. *Solar Energy*, 72 (3) 217–234.

[37]: Amna A. Alzaabi, Nadine K. Badawiyeh, Hind O. Hantoush, A. K. Hamid, 2014. Electrical/thermal performance of hybrid PVT system in Sharjah, UAE. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3 385-389.

[38]: Adnan Ibrahim, Ahmad Fudholi, Kamaruzzaman Sopian, Mohd Yusof Othman, Mohd Hafidz Ruslan, 2014. Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system. *Energy Conversion and Management*, 77 527–534.

[39]: Kiran S, U Devadiga, 2014. Performance Analysis of Hybrid Photovoltaic/Thermal Systems. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 80-86.

[40]: Majdi Hazami, Ali Riahi, Farah Mehdaoui, Omeima Nouicer, Abdelhamid Farhat, 2016. Energetic and exergetic performances analysis of a PVT (photovoltaic thermal) solar system tested and simulated under to Tunisian (North Africa) climatic conditions, *Energy*, 107 78-94.

[41]: Tiwari A, Sodha MS, 2007. Parametric study of various configurations of hybrid PV/

REFERENCE

Thermal air collector : experimental validation of theoretical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91 17–28.

[42]: **Joshi** A.S., Tiwari A, 2007. Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic thermal (PVT) air collector. *Renewable Energy*, 32 (13) 2223-2241.

[43] :**Aste** N, M. Beccaliand G. Chiesa, 2002. Experimental evaluation of the performance of a prototype hybrid solar photovoltaic-thermal (PVT) air collector for the integration in sloped roof.

[44]: **Tonui** J. K, Y. Tripanagnostopoulos, 2008. Performance improvement of PVT solar collectors with natural air flow operation, *Solar Energy*, 82 1–12.

[45] :**Basant** Agrawal, G.N. Tiwari, 2010. Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems. *Energy and Buildings*, 42 1472–1481.

[46]: **Jong-Gwon** Ahn, Jin-Hee Kim, Jun-Tae Kim, 2015. A Study on Experimental Performance of Air-Type PVT Collector with HRV, *Energy Procedia*, 78 3007 – 3012.

[47]: **Mojumdera** JC, Chonga WT, Onga HC, Leong KY, Al-Mamoon A, 2016. Experimental investigation on performance analysis of air type PV thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy and Building*, 130 272–285.

[48]: **Tripanagnostopoulos** Y. & al, 2001. Hybrid PVT systems with dual heat extraction operation. In: proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference, Munich, Allemagne, 2515-2518.

[49] : **Assoa** Y B, Menezo C, Fraisse G, Yezou R, Brau J, 2007. Study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy*, 81(9) 1132–43.

[50]: **Othman** M.Y, S.A. Hamid, M.A.S. Tabook, K. Sopian, M.H. Roslan, Z. Ibarahim, 2016.

Performance analysis of PVT Combined with water and air heating system: An experimental study. *Renewable Energy*, 86 716-722.

[51]: **Di Su**, Yuting Jia, Xiang Huang, Guruprasad Alva, Yaojie Tang, Guiyin Fang, 2016. Dynamic performance analysis of photovoltaic–thermal solar collector with dual channels for different fluids, *Energy Conversion and Management*, 120 13–24.

[52]: **Hasila** Jarimi, Mohd Nazari Abu Bakar, Mahmud Othman, Mahadzir Hj Din, 2016. Bifluid photovoltaic/thermal (PVT) solar collector: Experimental validation of a 2D theoretical model. *Renewable Energy*, 85 1052-1067.

Résumé

Dans ce travail nous avons simulé numériquement le comportement thermique d'un panneau photovoltaïque hybride. Afin de caractériser les performances des capteurs PV/T qui produisent à la fois de la chaleur et de l'électricité à partir d'un seul système.

Les logiciels Gambit et Fluent 6.3.26 ont été utilisés pour la construction de la géométrie et les simulations numériques.

Notre travail a porté sur la variation de la température des différentes parties du panneau photovoltaïque en fonction du rayonnement incident, la température externe du vitrage ainsi que le débit pour les fluides l'eau ensuite l'air.

Les résultats obtenus ont montrés que, la température la plus élevée est celle du vitrage et la vitesse du fluide augmente quand le nombre de Reynolds augmente.

Un panneau avec comme fluide l'air a donné un bon rendement par rapport à l'eau.

Mots clés : Panneaux photovoltaïques hybrides, énergie solaire, simulation numérique, Fluent.