



Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de génie mécanique

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de master académique en génie
mécanique option énergétique

Intitulé :

Étude du refroidissement par eau d'un panneau solaire photovoltaïque

Proposé et encadré par : M. R. NEBBALI
Étudié par : M. Mohand CHERIFI
M^m. Houa OUNOUH

Promotion 2017-2018

Remerciements

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

Nos vifs remerciements s'adressent à notre promoteur M. NEBBALI Rezki pour son aide, ses conseils, sa disponibilité durant toute la période de ce projet de fin d'études.

Nous avons à cœur également de remercier les enseignants de laboratoire LEMM qui ont eu la gentillesse de nous aider et de nous orienter.

Nous remercions également les membres de jury qui ont l'aimabilité d'accepter d'examiner ce travail.

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, mes frères, mes sœurs

Mon neveu Aziz,

Mon cher frère Yahia

Toute ma famille

Mon ami et mon collègue Mohand

Salem, Hayet, Kahina et mes ami(e)s sans exception.

Je ne vais pas oublier une personne qui compte pour moi.

*Qui me confie, qui m'aide à avancer dans la vie, à
poursuivre mes objectifs et m'a soutenu à surmonter les
difficultés.*

Une personne qui est tout simplement indispensable

Houa

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes parents, qui sont toujours à mes côtés, qui m'ont
encouragé et soutenu dès mon enfance, grâce à eux que
j'ai pu atteindre ce succès*

Que Dieu les protège

Mes frères et ma sœur

Mon beau-frère et ma belle-sœur, mes neveux et ma nièce

*Ma grande mère et à la mémoire de mes grands-parents
et toute ma famille*

Ma chère amie et ma collègue Houa

*Saïd, Thinehinane, tous mes amis et mes collègues sans
exception*

Mohand

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I: gisement solaire	
1. Introduction	3
2. Gisement solaire.....	3
2.1. Caractéristiques du soleil	3
2.2. Structure du soleil	4
3. Mouvement apparent du soleil	5
3.1. Position géométrique du soleil.....	5
3.2. Système de coordonnées pour le repérage du soleil	5
3.2.1. Coordonnées horizontales	6
3.2.2. Coordonnées géographiques	6
3.2.3. Coordonnées équatoriales	7
4. Donnés astronomiques	8
5. Rayonnement solaire	9
5.1. Rayonnement solaire extraterrestre.....	10
5.2. Rayonnement solaire au sol	11
5.2.1. Rayonnement direct	11
5.2.2. Rayonnement diffus	11
5.2.3. Rayonnement réfléchi R_{Gr}	12
5.2.4. Rayonnement global	12
5.3. Masse d'air.....	13
6. Rayonnement solaire incident sur un capteur plan incliné	13
6.1. Angle d'incidence	13
6.2. Irradiation globale incidente sur un plan incliné.....	14

6.3.	Indice de clarté moyenne	14
7.	Gisement solaire en Algérie	14
8.	Conclusion	15

Chapitre II: conversion photovoltaïque

1.	Introduction	16
2.	Fonctionnement des panneaux solaires	16
2.1.	Panneau solaire thermique	16
2.2.	Panneau solaire photovoltaïque	17
3.2.1.	Technologie des panneaux PV	17
3.2.2.	Type de cellules photovoltaïques	18
3.3.	Effet photovoltaïque	19
3.2.1.	Semi-conducteur	19
3.2.2.	Le dopage du silicium	20
3.2.3.	Dopage de type N.....	20
3.2.4.	Dopage de type P	20
3.2.5.	La jonction PN	21
3.4.	Application de l'effet photovoltaïque pour une cellule solaire .	21
3.	Caractéristiques et modélisation d'une cellule photovoltaïque	22
3.1.	Modèle électrique de la cellule	22
3.2.	Caractéristiques électriques de la cellule	23
3.2.1.	Courant de court-circuit	23
3.2.2.	Tension de circuit ouvert.....	23
3.2.3.	Puissance de la cellule.....	24
3.2.4.	Puissance maximale	24
3.2.5.	Facteur de forme	24
3.2.6.	Rendement de la cellule	24
3.3.	Modules photovoltaïques	25

3.3.1.	Association en série	25
3.3.2.	Association en parallèle	25
4.	Paramètres influents sur le fonctionnement d'une cellule PV	26
4.1.	Ensoleillement	26
4.2.	Température	26
5.	Composition d'un système PV	27
5.1.	Générateur	27
5.2.	Batteries	27
5.3.	Régulateur de charge	27
5.4.	Onduleur	28
5.5.	Conducteurs	28
5.6.	Récepteurs.....	28
6.	Conclusion	28
Chapitre III: simulation numérique		
1.	Introduction	29
2.	Description du domaine d'étude.....	29
3.	Transfert de chaleur par rayonnement	29
4.	Evaluation de la température du panneau non refroidi	30
5.	Transfert de chaleur par convection.....	31
6.	Simulation numérique	31
6.1.	Code Fluent (panneau refroidi).....	32
6.1.1.	Préprocesseur Gambit	32
6.1.2.	Solveur Fluent	34
6.1.3.	Post solveur	35
6.1.4.	Critère de la convergence.....	35
6.2.	Programme du calcul MATLAB (panneau non refroidi)	35
6.2.1.	Algorithme de calcul.....	36

6.2.2. Organigramme de calcul	37
7. Conclusion	37
Chapitre IV: discussion des résultats	
1. Introduction	38
2. Interprétation et discussion des résultats	38
2.1. Paramètres fixés pour la simulation	38
2.2. Résultats de la simulation	38
3. Conclusion	56
Conclusion générale.....	57
Références bibliographiques	

Tables des illustrations

Chapitre I :

Figure I.1 : structure du soleil	4
Figure I.2 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.....	5
Figure I.3 : système de coordonnées horizontales	6
Figure I.4 : Longitude et latitude d'un point de la sphère céleste.....	7
Figure I.5 : Déclinaison δ d'un point de la sphère céleste	7
Figure I.6 : Angle horaire ω d'un point de la sphère céleste	8
Figure I.7 : composition du rayonnement solaire	10
Figure I.8 : la constante solaire	11
Figure I.9 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	12
Figure I.10 : représentation schématique de la quantité de rayons solaires traversés par l'atmosphère.....	13

Chapitre II:

Figure II.1 : les différents composants d'un capteur thermique.....	16
Figure II.2 : composantes basique d'un capteur PV.....	17
Figure II.3 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un module PV au silicium.....	18
Figure II.4 : différents types des cellules PV.....	19
Figure II.5 : extraction des électrons	19
Figure II.6 : dopage de type N.....	20
Figure II.7 : dopage de type P.....	20
Figure II.8 : migration des charges mobiles vers le plan de jonction	21
Figure II.9 : différence entre un matériau semi-conducteur par rapport au métal ou isolant.	22
Figure II.10 : le modèle électrique d'une cellule PV	22
Figure II.11 : la courbe caractéristique de la cellule PV.....	24
Figure II.12 : caractéristique résultante des cellules en série.....	25
Figure II.13 : caractéristique résultante obtenue en association en parallèles	25
Figure II.14 : influence de l'ensoleillement	26

Figure II.15: influence de la température	27
--	----

Chapitre III:

Figure III.1: Les différentes options du Gambit.....	32
---	----

Figure III.2: Maillage 3D de domaine de calcul.....	33
--	----

Figure III.3 : vue globale de l'interface Fluent.....	34
--	----

Figure III.4 : la courbe des résidus	35
---	----

Figure III.5 : organigramme du calcul sous MATLAB.....	37
---	----

Chapitre IV:

Figure IV.1 : courbe des résidus pour un débit $m = 0.125 \text{ kg.s}^{-1}$	38
---	----

Figure IV.2 : Contours des températures pour $m=0.025 \text{ kg/s}$ et $R_G=1000\text{w/m}^2$	39
--	----

Figure IV.3 : Contours des températures pour $m=0.025\text{kg/s}$ et $R_G =800\text{w/m}^2$	40
--	----

Figure IV.4 : Contours des températures pour $m=0.025 \text{ kg/s}$ et $R_G=600\text{w/m}^2$	41
---	----

Figure IV.5 : Contours des températures pour $m=0.050 \text{ kg/s}$ et $R_G=1000\text{w/m}^2$	42
--	----

Figure IV.6 : Contours des températures pour $m=0.050 \text{ kg/s}$ et $R_G=800\text{w/m}^2$	43
---	----

Figure IV.7 : Contours des températures pour $m=0.050 \text{ kg/s}$ et $R_G=600\text{w/m}^2$	44
---	----

Figure IV.8: Contours des températures pour $m=0.100 \text{ kg/s}$ et $R_G=1000\text{w/m}^2$	45
---	----

Figure IV.9: Contours des températures pour $m=0.100 \text{ kg/s}$ et $R_G=800\text{w/m}^2$	46
--	----

Figure IV.10 : Contours des températures pour $m=0.100 \text{ kg/s}$ et $R_G=600\text{w/m}^2$	47
--	----

Figure IV.11 : Contours des températures pour $m=0.125\text{kg/s}$ et $R_G=1000\text{w/m}^2$	48
---	----

Figure IV.12 : Contours des températures pour $m=0.125 \text{ kg/s}$ et $R_G=800\text{w/m}^2$	49
--	----

Figure IV.13 : Contours des températures pour $m=0.125 \text{ kg/s}$ et $R_G=600\text{w/m}^2$	50
--	----

Figure IV.14 : Contours des températures pour $m=0.150 \text{ kg/s}$ et $R_G=1000\text{w/m}^2$	51
---	----

Figure IV.15 : Contours des températures pour $m=0.150 \text{ kg/s}$ et $R_G=800\text{w/m}^2$	52
--	----

Figure IV.16: Contours des températures pour $m=0.150 \text{ kg/s}$ et $R_G=600\text{w/m}^2$	53
---	----

Figure IV.17 : évolution la température du panneau refroidi et non refroidi pour des débits donnés sous un éclairement $R_G=1000\text{W/m}^2$	54
--	----

Figure IV.18: évolution la température du panneau refroidi et non refroidi pour des débits donnés sous un éclairement $R_G=800\text{W/m}^2$	54
--	----

Figure IV.19 : évolution la température du panneau refroidi et non refroidi pour des débits donnés sous un éclairement $R_G=600W/m$	54
Figure IV.20 : la variation de la température du panneau refroidi en fonction du débit de l'eau.....	55

Nomenclature

<i>Symboles</i>	<i>Désignations</i>	<i>Unités</i>
A_M	<i>Masse d'air</i>	/
C_p :	<i>Chaleur spécifique</i>	$J/kg.K$
C :	<i>Célérité de la lumière</i>	m/s
D_j :	<i>Durée de jour</i>	<i>heure</i>
E_g :	<i>Energie de gap pour le silicium cristallin</i>	J
FF :	<i>Facteur de forme</i>	/
h :	<i>Coefficient d'échange convectif</i>	$W/m^2.K$
I :	<i>Courant de la cellule</i>	A
I_{cc} :	<i>Courant de court-circuit</i>	A
I_D :	<i>Courant de la diode</i>	A
I_{ph} :	<i>Courant photo-courant</i>	A
I_0 :	<i>Courant de la saturation</i>	A
K :	<i>Constante de Boltzmann</i>	J/K
K_T :	<i>Indice de clarté moyenne</i>	/
m :	<i>Masse</i>	kg
N_p :	<i>Nombre de modules PV connectés en séries</i>	/
N_s :	<i>Nombre de modules PV connectés en parallèles</i>	/
P_{max} :	<i>Puissance maximale</i>	W
q :	<i>Charge d'électron</i>	F
R_G :	<i>Rayonnement solaire</i>	W/m^2
R_{Gcs} :	<i>Constante solaire journalier</i>	W/m^2
R_{Gh} :	<i>Rayonnement solaire sur un plan horizontal</i>	W/m^2
$R_{G\ dir}$:	<i>Rayonnement solaire direct</i>	W/m^2

R_{GO} :	<i>Rayonnement solaire global</i>	W/m^2
$R_{G\ diff}$:	<i>Rayonnement solaire diffus</i>	W/m^2
R_S :	<i>Résistance en série</i>	Ω
R_{Sh} :	<i>Résistance en parallèle</i>	Ω
S :	<i>Surface</i>	m^2
T :	<i>Température</i>	$^{\circ}C$
T_a :	<i>Température de l'air ambiant</i>	$^{\circ}C$
T_L :	<i>Temps légal</i>	<i>heure</i>
T_{SM} :	<i>Temps solaire moyen</i>	<i>heure</i>
T_{SV} :	<i>Temps solaire vrai</i>	<i>heure</i>
T_U :	<i>Temps universel</i>	<i>heure</i>
T_v :	<i>Température de la voûte céleste</i>	$^{\circ}C$
V_i :	<i>Tension thermique</i>	V
V_{co} :	<i>Tension du circuit ouvert</i>	V
Z :	<i>Hauteur de soleil</i>	<i>degré</i>
ΔT :	<i>Equation du temps</i>	<i>degré</i>
Ψ :	<i>Azimut solaire</i>	/
ω :	<i>Angle horaire</i>	<i>degré</i>
α :	<i>Coefficient d'absorption</i>	/
β :	<i>Coefficient de dilatation volumique</i>	K^{-1}
δ :	<i>Déclinaison</i>	<i>degré</i>
ε :	<i>Coefficient d'émissivité</i>	/
η :	<i>Rendement électrique</i>	%
θ :	<i>Angle zénithal</i>	<i>degré</i>
λ :	<i>Conductivité thermique</i>	$W/m.K$
μ :	<i>Viscosité dynamique</i>	$kg/m^3.s$
ν :	<i>Viscosité cinématique</i>	m^2/s

ρ :	<i>Masse volumique</i>	kg/m^3
σ :	<i>Constante de Boltzmann</i>	$W/m^2.K^4$
φ :	<i>Latitude de lieu</i>	<i>degré</i>
φ_a :	<i>Flux de chaleur absorbé</i>	W
φ_e :	<i>Flux de chaleur émit</i>	W
φ_r :	<i>Flux de chaleur rayonné</i>	W

Nombre adimensionnel

Nu	<i>Nombre de Nusselt</i>
Ra	<i>Nombre de Rayleigh</i>

Introduction générale

Depuis sa création, l'Homme a été à la recherche des sources d'énergie, il a constaté qu'elle lui permet d'effectuer un travail, de fabriquer de la chaleur, de la lumière, de produire un mouvement.

Au début, les seules énergies disponibles étaient la force musculaire humaine et l'énergie de la biomasse utilisable grâce au feu, et puis l'énergie des animaux pour tirer des charrettes ou labourer des champs par exemple, ensuite, l'énergie du vent est utilisée pour le transport (des bateaux à voile) ainsi que des moulins (pour moulin de grain) aussi la force de l'eau a été utilisée dans les moulins à eau.

Au temps actuel, de nombreuses sources d'énergie sont élaborées et qui sont entrain d'être utilisées, soit des combustibles comme le pétrole, le charbon et le gaz qui sont utilisées pour faire fonctionner nos voitures ou les centrales électriques, l'énergie nucléaire est utilisée dans les centrales nucléaires qui permettent de produire de l'électricité en grande quantité.

Les stocks de ces sources sont limités, et elles sont responsables du changement climatique, et les déchets radiatifs sont très dangereux pour l'environnement et l'Homme.

Vu ces inconvénients que présentent les énergies fossiles, l'Homme s'efforce de trouver des solutions, il se tourne ainsi vers l'énergie renouvelable, c'est une énergie propre et moins chère, elle est dite renouvelable vu qu'elle est inépuisable et qu'elle se renouvelle dans la nature. On cite l'énergie hydraulique qui utilise la force de l'eau, l'énergie éolienne qui utilise la force du vent, la géothermie qui utilise la chaleur de la terre (cas d'une pompe à chaleur qui exploite les échanges d'air pour générer de la chaleur) et l'énergie solaire. Cette dernière permet de produire de la chaleur grâce au panneau solaire thermique ou de produire de l'électricité en utilisant des panneaux solaires photovoltaïques (PV).

Le panneau solaire PV est un assemblage de cellules PV qui transforment directement la lumière (le rayonnement) en électricité, il s'est épanoui dans l'industrie spatiale (satellites). Les cellules PV, dans les conditions de référence ($T_{pv}=25^{\circ}\text{C}$, $RG=1000\text{w/m}^2$), ont un rendement compris entre 10 et 16%. Sachant qu'hors l'atmosphère la puissance reçue par un mètre carré de surface orientée perpendiculairement aux rayons du Soleil est d'environ 1400 W/m^2 , les panneaux solaires ne produisent que $140\text{ à }160\text{ Wc /m}^2$.

Il existe beaucoup de paramètres qui peuvent influencer négativement sur le rendement des cellules photovoltaïques, la mauvaise orientation du panneau vers le soleil par exemple, et les températures élevées de l'air.

L'objectif de ce travail consiste à refroidir par eau un panneau solaire photovoltaïque (PV). Pour ce faire, on a scindé ce travail en quatre chapitres. Le chapitre I porte sur des rappels des notions de base sur le gisement solaire. Par la suite on s'est intéressé dans le deuxième chapitre, à la composition et aux caractéristiques des panneaux PV et au principe de leur fonctionnement.

La complexité des équations mises en jeu a fait appel au code de calcul CFD-FLUENT. La simulation des échanges de chaleur entre l'eau et le panneau PV fait l'objet du chapitre III.. Les résultats obtenus sont alors exploités au quatrième chapitre.

Chapitre I

Gisement solaire

1. Introduction

Les technologies solaires les plus répandues au monde s'observent majoritairement dans le domaine de l'immobilier, que ce soit : solaire thermique, solaire photovoltaïque, thermodynamique, concentrateurs solaire paraboliques et bien évidemment éclairage naturel. Les diverses applications sur l'énergie solaire nécessitent des données précises pour la conception, la simulation et une bonne performance de tout projet impliquant cette énergie.

Dans ce premier chapitre, nous abordons ainsi en premier temps quelques notions sur le gisement solaire, à savoir les différentes coordonnées nécessaires pour le repérage du soleil. Par la suite nous décrirons le rayonnement solaire et sa composition, l'estimation de l'irradiation solaire sur une surface horizontale et inclinée enfin, nous allons parler de gisement solaire en Algérie.

2. Gisement solaire

2.1. Caractéristiques du soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire la plus proche de la terre, elle est située à une distance de 150 millions de km et sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre, cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre. [1], [2]

Cet astre résultant de la condensation d'un nuage gazeux interstellaire sous l'effet gravitationnel, essentiellement se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus Les caractéristiques principales du soleil sont indiquées dans le tableau ci-dessus : [1].

Diamètre (km)	$13,92.10^5$
Masse (kg)	2.10^{30}
Surface (km ²)	$6,09.10^{12}$
Volume (km ³)	$1,41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1 408
Vitesse (km/s)	217
Distance de centre de la voie lactée (km)	$2,5.10^{17}$
Distance moyenne soleil/ terre (km)	$14,96.10^7$
Luminosité solaire (W)	$3,85.10^{26}$
accélération de la pesanteur à la surface solaire (m/s ²)	275
Température moyenne (°C)	5 505

Tableau I.1 : les caractéristiques principales du soleil

2.2. Structure du soleil

Bien que le soleil soit une sphère non homogène, on peut y distinguer ses régions principales :

- A l'intérieur du soleil se trouve un noyau qui est le siège des réactions thermonucléaires de fusion en convertissant l'Hydrogène en Hélium ce qui produira de l'énergie et des rayonnements (4 millions de tonnes disparaissent en une seconde selon la loi d'EINSTEIN $E = m C^2$), il occupe 15% du soleil à une température de 14 millions de degrés et une pression de $2,2 \cdot 10^{11}$ atm. [3], [4]
- Au-dessus du noyau se trouve une zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative. Son épaisseur est de 244 160 km, très dense où elle représente 98% de la masse du soleil avec une température variante de $50 \cdot 10^4$ °C à $10 \cdot 10^6$ °C.

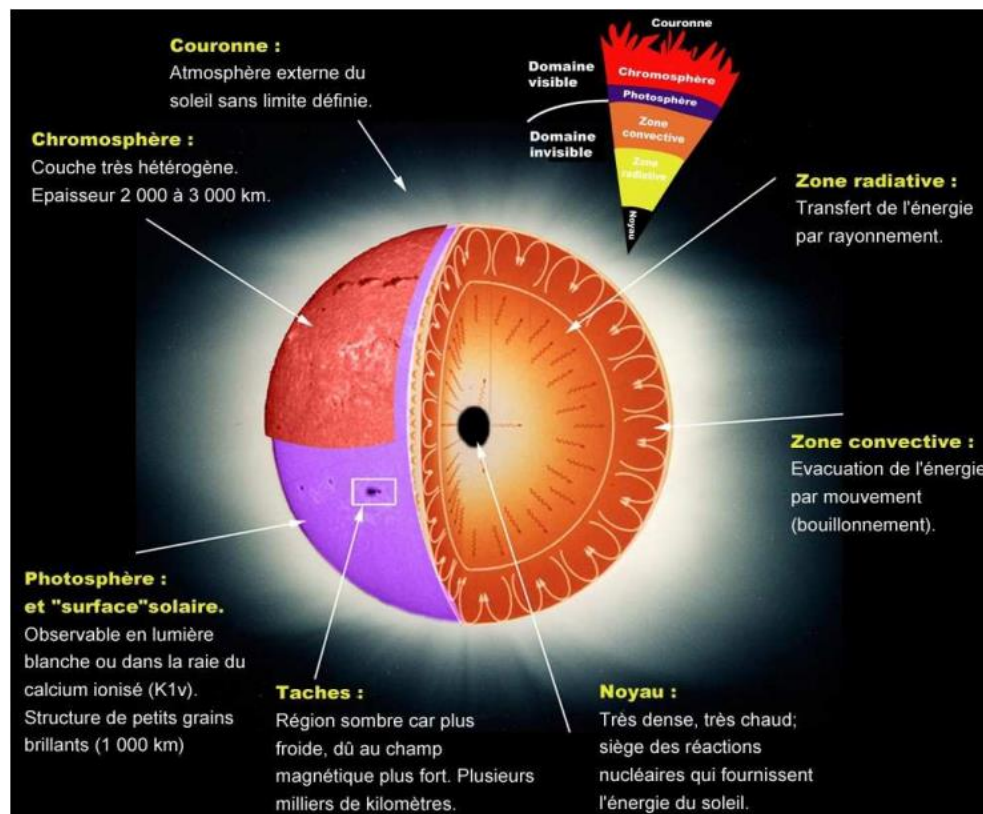


Figure I.1 : structure du soleil

- A 494 160 km du centre de soleil se trouve une zone de convection de 199 752 km d'épaisseur qui évacue la chaleur vers l'extérieur par des mouvements tourbillonnaires, sa température varie de 5 000 °C à 6 400 °C.
- La surface visible du soleil qui a environ de 500 km d'épaisseur et une température de 6 000 °C, s'appelle la photosphère, sur cette zone on y voit des taches sombres résultantes du champ magnétique interne. La surface tachée suit un cycle de 11 ans : c'est le cycle d'activité solaire avec ses maximas qui donnent naissance à une recrudescence des phénomènes dynamiques et éruptifs.

- Au-dessus de la photosphère se trouve la chromosphère d'épaisseur de 2 000 km à 3 000 km, c'est une région à faible densité où la matière est très diluée avec une température variante entre 4200°C à $10^4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les filaments qui apparaissent en protubérances au bord solaire sont constitués de plasma dense de type chromosphérique en suspension dans la couronne chaude sous l'influence de champs magnétiques qui les soutiennent contre la gravité.
- La couronne est la dernière couche du soleil, elle constitue l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien que la température y est très élevée ($10^6\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $2.10^6\text{ }^{\circ}\text{C}$) et sans limite définie.

3. Mouvement apparent du soleil

3.1. Position géométrique du soleil

La position du soleil dans le ciel n'est pas fixe, elle change à travers le jour et la saison. Ce changement de position est engendré par la rotation de la terre autour de son axe et de son mouvement autour du soleil où autour de son orbite. La trajectoire de la terre autour du soleil constitue une ellipse de très faible excentricité réalisée en environ 365 jours. L'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan de l'écliptique est constante et égale à $23^{\circ} 27'$, c'est à l'origine du phénomène de saison que nous connaissons. [5]

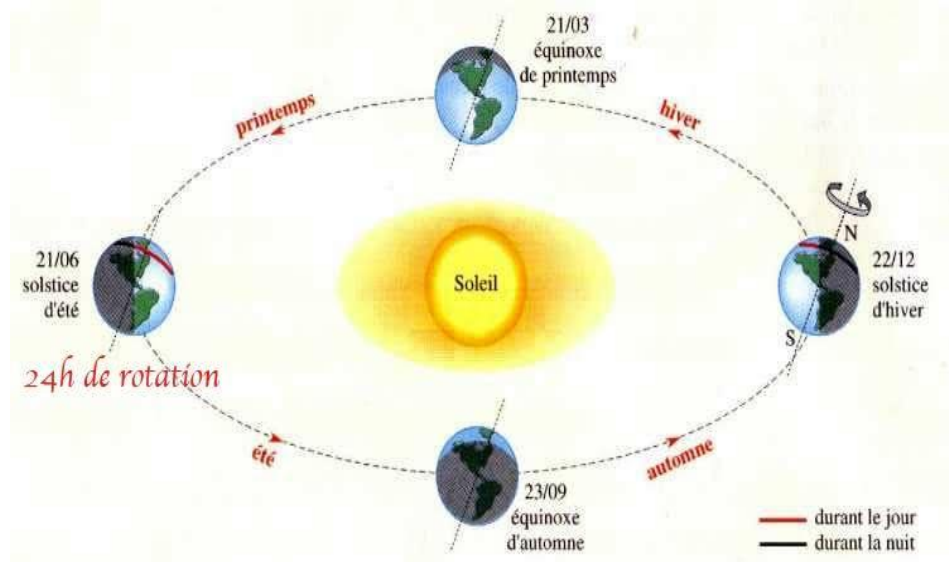


Figure I.2 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

3.2. Système de coordonnées pour le repérage du soleil

Pour repérer la position du soleil dans le ciel, il est nécessaire d'utiliser trois systèmes de coordonnées horizontales, horaires et géographiques.

3.2.1. Coordonnées horizontales [5], [1]

Azimut solaire ψ

C'est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu. On le mesure à partir du Nord vers l'Est ou de Sud vers l'Ouest (180° pour le Sud, 0° pour le Nord).

$$\sin \psi = \frac{\cos \delta \cos \omega}{\cos z} \quad (\text{I.1})$$

L'altitude z

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan d'horizontal. Elle est comptée de 0° à 90° à partir de l'horizon, positivement au-dessus et, négativement, au-dessous. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin z = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (\text{I.2})$$

Où δ , φ , ω respectivement l'angle de déclinaison, de latitude du lieu et l'angle horaire.

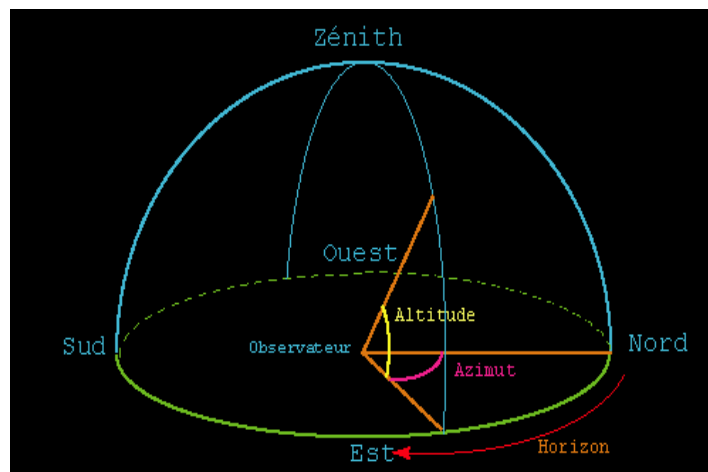


Figure I.3 : système de coordonnées horizontales

Angle zénithal θ

C'est le complément de l'altitude solaire pour atteindre le zénith.

3.2.2. Coordonnées géographiques [1]

Un point quelconque d'un lieu donné du globe peut être défini par les coordonnées suivantes :

Latitude du lieu φ

Correspond à l'angle entre le rayon joignant le centre de la terre à un lieu quelconque et le plan équatorial. Elle varie de -90° à $+90^\circ$, elle est positive vers le nord.

Longitude du lieu λ

Représente l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu et le plan méridien origine (Greenwich). La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et $+180^\circ$, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps

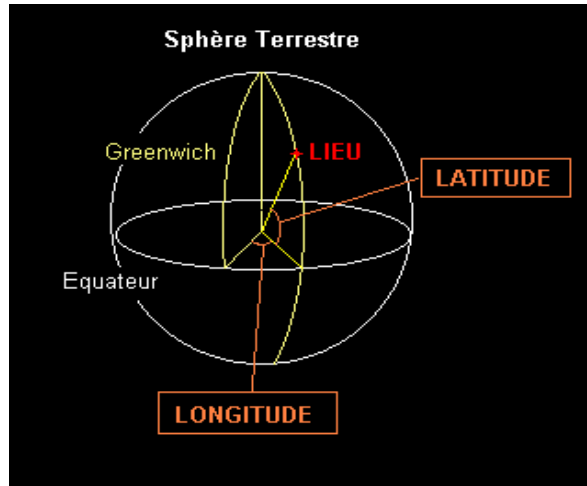


Figure I.4 : Longitude et latitude d'un point de la sphère céleste.

3.2.3. Coordonnées équatoriales

Dans ce repère la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux grandeurs [1], [6]

Déclinaison δ

C'est l'angle que fait la direction soleil-terre et le plan de l'équateur terrestre. Il est nul aux équinoxes et maximal aux solstices, il varie de $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver à $+23,27^\circ$ au solstice d'été. Il peut être évalué en approximation par l'expression suivante :

$$\delta = 23.27 \sin \left\{ \frac{360}{3655(j+284)} \right\} \quad (I.3)$$

δ : Exprimée en degré

j : Numéro du jour de l'année à partir de 1^{er} janvier

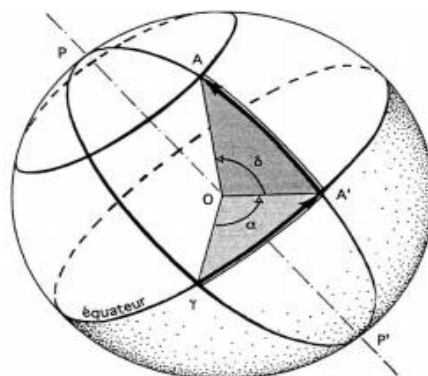


Figure I.5 : Déclinaison δ d'un point de la sphère céleste

Angle horaire ω

C'est l'angle qui fait le méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (I.4)$$

Il vaut 0° à midi solaire, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15° , car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h. Compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir. Le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

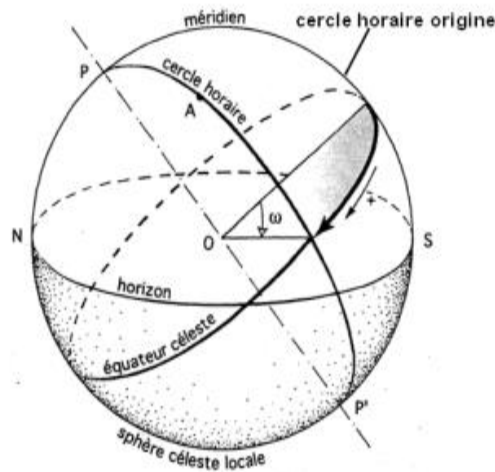


Figure I.6: Angle horaire ω d'un point de la sphère céleste

4. Données astronomiques

Durée du jour Dj

Peut être calculée en connaissant la déclinaison δ du jour considéré et la latitude φ du lieu d'observation. [7]

$$Dj = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \quad (I.5)$$

Elle est donnée en heure

Temps solaire vrai

TSV est défini par l'angle horaire ω entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24 h à partir du midi vrai lorsque le Soleil culmine en un lieu donné. [7]

Temps solaire moyen [1]

TSM en un lieu donné est l'angle horaire moyen du Soleil, il est compté de 0 à 24 h à partir de midi moyen. Le temps solaire moyen est basé sur un soleil « moyen » fictif qui se déplacerait à vitesse constante tout au long de l'année. La durée d'un jour solaire moyen est de 24h, quel que soit le jour de l'année.

Equation du temps ΔT [7]

C'est la correction positive ou négative qu'il convient d'ajouter au temps solaire moyen pour connaître le temps solaire vrai

$$TVS = TSM + \Delta T \quad (I.6)$$

Elle est donnée en degré (°) par :

$$\Delta T = 0,0072 \cos 0,984 j - 0,0528 \cos(0,984 \times 2j) - 0,0012 \cos(0,984 \times 3j) - 0,1229 \sin 0,984 j - 0,1565 \sin(0,984 \times 2j) - 0,0041 \sin(0,984 \times 3j) \quad (I.7)$$

Ou encore la formule d'approximation plus simple en (min) :

$$\Delta T = 9,9 \sin(2(0,986j + 100) - 7,7 \sin(0,986j - 2)) \quad (I.8)$$

Temps légal

(TL) est le temps que l'on utilise couramment. Il est décalé d'un nombre entier d'heures par rapport au fuseau origine, le méridien 0. [1]

Temps universel

Ce temps était anciennement désigné par GMT, c'est à dire Greenwich Mean Time (temps moyen du Méridien de Greenwich), c'est le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. Le temps universel est une échelle de temps basée sur le jour solaire, définie d'une manière aussi uniforme que possible, malgré les variations de la rotation terrestre.

Pour l'Algérie : $T_U = +1$. [5]

5. Rayonnement solaire

L'énergie dégagée par le soleil, distant de 150 millions de kilomètres de la terre est évacuée dans l'espace par rayonnement électromagnétique, ce rayonnement est émis principalement dans la partie visible. Plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la quantité d'énergie portée par les photons est grande. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

9% dans la bande des ultraviolets (< 400 nm)

47% dans la bande visible (400 nm à 700 nm)
 444% dans la bande des infrarouges (> 700 nm)

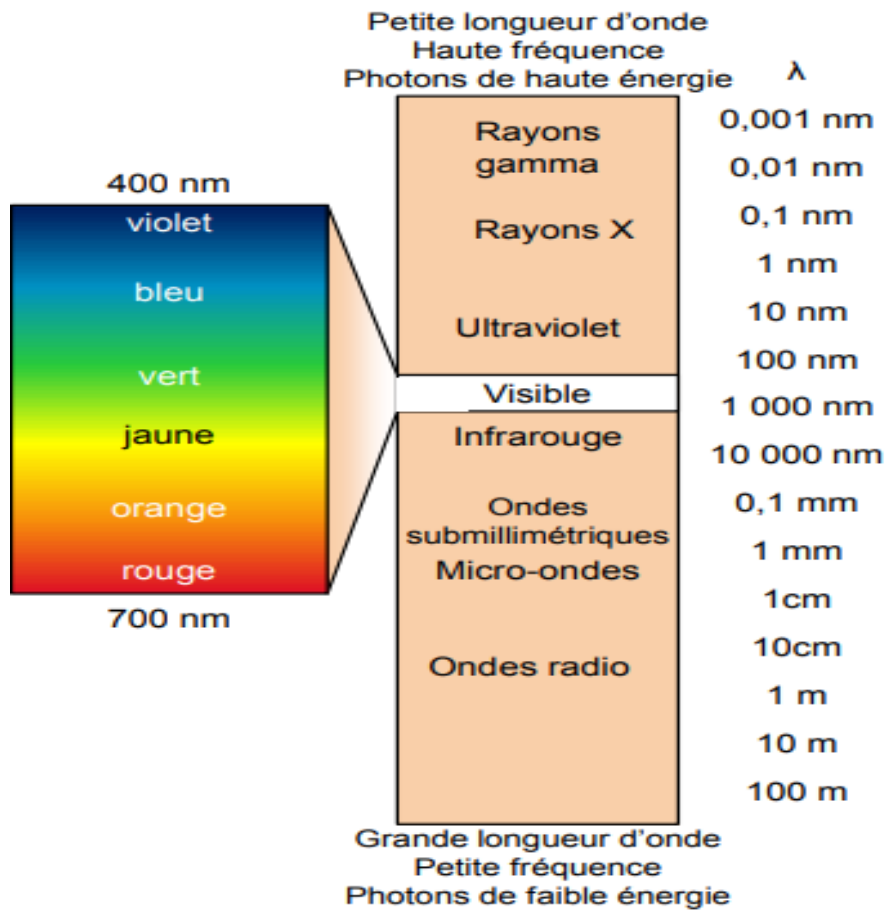


Figure I.7 : composition du rayonnement solaire

5.1. Rayonnement solaire extraterrestre

La quantité de rayons provenant du soleil et atteignant l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne Terre-Soleil, de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle constante solaire (R_{GCS}) qui vaut $1\,366.1\text{ W.m}^{-2}$. Celle-ci varie légèrement au maximum de $7\% \pm$, en fonction des activités solaires et variations de la distance Terre-Soleil dues à la trajectoire elliptique de la Terre autour du Soleil. [2]

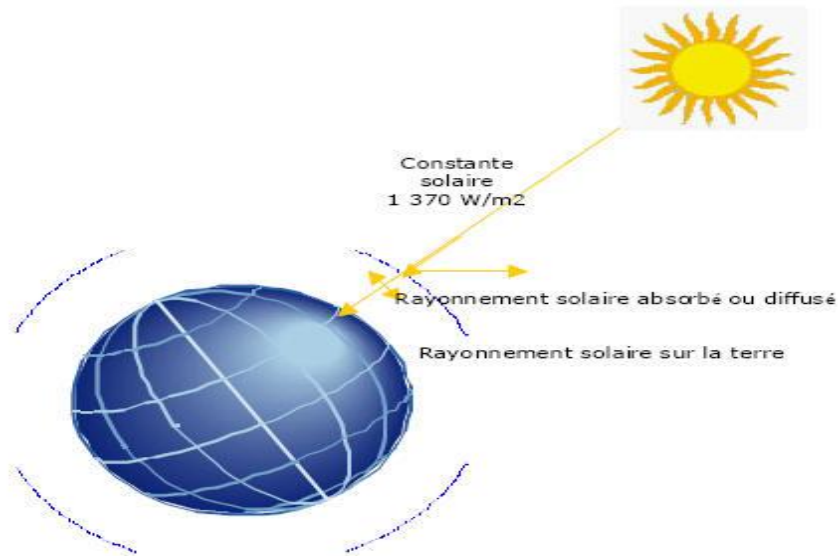


Figure I.8 : la constante solaire

5.2. Rayonnement solaire au sol [5]

Pour une puissance de $3,85 \cdot 10^6$ W, seulement 29 % de cette énergie qui parvient à la surface terrestre, le rayonnement arrivant dans l'atmosphère est d'abord diffusé par : les molécules gazeuses (dioxyde de carbone CO₂, vapeur d'eau, ozone) les aérosols et les poussières ainsi que les nuages. Une partie de l'ensemble de ces trois diffusions est renvoyée vers l'espace (34%). L'autre partie, renvoyée vers le sol, constitue le rayonnement diffus (18%). Le reste du rayonnement incident (48%) subit :

- une absorption, par les molécules gazeuses, responsable de l'échauffement de l'atmosphère, ainsi que par les aérosols et les poussières (6%) ;
- une absorption par les nuages (12%) ;
- une transmission parvenant directement au sol (30%).

5.2.1. Rayonnement direct

30 % de rayonnement est reçu directement du soleil au sol sans diffusion, ses rayons sont parallèles entre eux, soit R_{Gdir} le rayonnement direct, dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement est donné par la relation suivante [5] :

$$R_{Gh} = R_{Gdir} \cdot \sin z \quad (I.9)$$

Avec : h est la hauteur du soleil

5.2.2. Rayonnement diffus

C'est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, qui vaut 18%, il est constitué par la lumière qui est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (les molécules d'air) et à sa réflexion par les gouttes d'eau (nuages). Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

5.2.3. Rayonnement réfléchi R_{Gr}

Aussi bien dit l'albédo qui est la partie du rayonnement réfléchi par le sol et dépend donc directement de site de l'observateur ainsi la surface du sol (les forêts, sol cultivé, neige, surface d'eau...etc.). [5]

Matières	Coefficient d'albédo
Béton	0.1 à 0.2
Corps	0.0
Eau	0.05 à 0.15
Gravier	0.22
Neige	0.9
Sable	0.25 à 0.45
Vitres	0.1

Tableau I.2 : quelques valeurs d'albédo

5.2.4. Rayonnement global [7]

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme des trois composantes énumérées ci-dessus. C'est ce dernier qui est systématiquement mesuré par les stations météorologiques.

$$R_{Ggo} = R_{Gdirect} + \underbrace{R_{Gdiff} + R_{G\text{albédo}}}_{diffus} \quad (I.10)$$

Donc :

$$R_{Gglh} = R_{Gdir} + R_{Gdif} \quad (I.11)$$

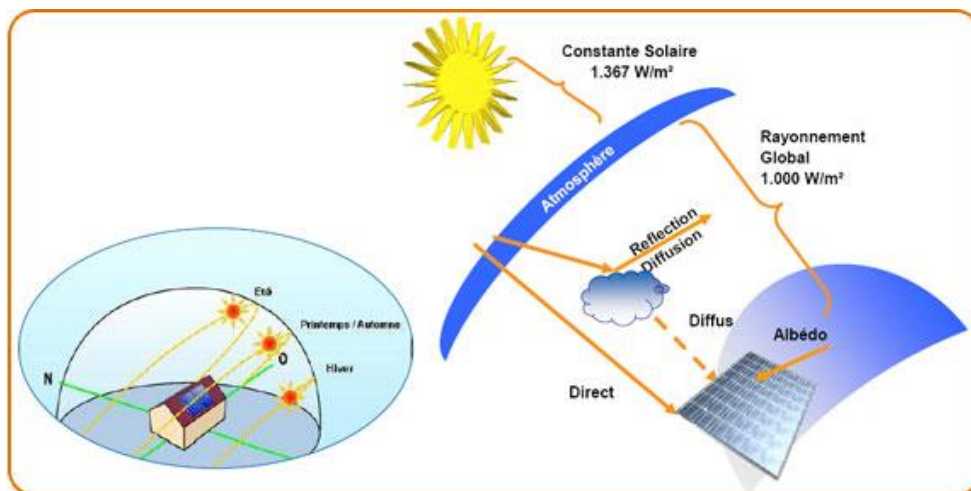


Figure I.9 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

5.3. Masse d'air A_M

En fonction de la position du soleil, la trajectoire des rayons sera plus ou moins longue dans l'atmosphère. Pour tenir compte de ce phénomène, on définit la masse d'air, A_M , comme le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu, comme illustré sur la fig. I.10.

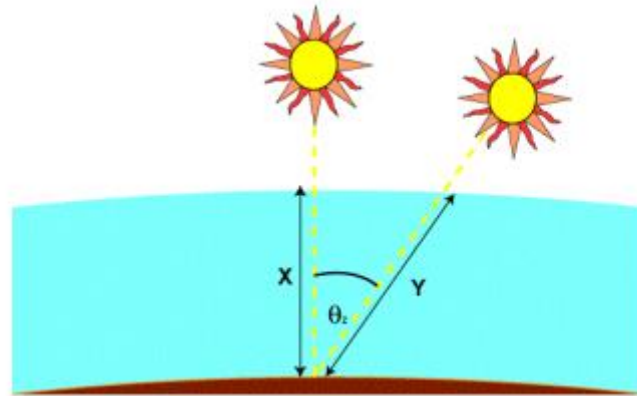


Figure I.10 : représentation schématique de la quantité de rayons solaires traversés par l'atmosphère

$$A_M = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{I.12})$$

En réalité, en raison de la courbure de l'atmosphère, le calcul de la masse d'air traversée par la lumière lorsque le soleil est proche de l'horizon n'est pas juste. En effet, avec l'équation ci-dessus, A_M est infini lorsque l'angle zénithal est égal à 90° . Ce n'est évidemment pas le cas dans la réalité et pour tenir compte de cette courbure et ainsi éviter la divergence d' A_M au coucher du soleil on utilise la formule suivante : [9]

$$A_M = \frac{1}{\cos \theta + 0,50572(96,07995 - \theta)^{-1,6364}} \quad (\text{I.13})$$

6. Rayonnement solaire incident sur un capteur plan incliné

6.1. Angle d'incidence

Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison β (par rapport à l'horizontale) et son orientation ou azimut ψ par rapport au sud (négatif vers l'est, sens anti trigonométrique). L'angle d'incidence i est l'angle formé entre la normale du plan et les rayons du soleil. On parle souvent d'incidence normale lorsque $i = 0$, c'est-à-dire les rayons sont perpendiculaires au capteur. L'angle d'incidence s'écrit, en fonction de la position du soleil (h, ψ). [8]

$$\cos i = \cos \theta \cdot \sin \beta + \cos \theta \cdot \sin \beta \cos(\psi - \alpha) \quad (\text{I.14})$$

α : L'angle qui fait la projection de la normale à capteur sur le plan horizontal avec l'axe Sud-Nord.

6.2. Irradiation globale incidente sur un plan incliné

Ci-dessous est représenté l'ensemble des calculs à effectuer pour déterminer le rayonnement journalier global sur plan incliné, en connaissant au préalable le jour de l'année j , l'angle horaire au coucher du soleil ω , la latitude φ , la déclinaison solaire δ , la pente du plan incliné β , l'albédo et un angle de surface azimut égal à 0.

- Le rayonnement direct incident sur un plan incliné :

$$R_{Gb} = R_{Gh} \frac{\cos \beta}{\cos \psi} \quad (\text{I.15})$$

- Le rayonnement diffus incident sur le plan incliné

$$R_{Gd} = R_{Gdiff} \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (\text{I.16})$$

- Le rayonnement réfléchi incident sur le plan incliné

$$R_{Gr} = R_{Gh} \cdot \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{I.17})$$

- Le rayonnement global incident sur un plan incliné

$$R_{Gglo} = R_{Gh} \frac{\cos \beta}{\cos \psi} + R_{Gdiff} \frac{1 + \cos \beta}{2} + R_{Gh} \cdot \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{I.18})$$

6.3. Indice de clarté moyenne

Un outil soit bien pratique que nous pouvons définir par une grandeur appelée l'indice de clarté moyenne K_T . Cet indice est obtenu à partir du rapport entre l'irradiation journalière moyenne sur un plan horizontal et la constante solaire journalière moyenne sur un plan horizontal hors atmosphère, comme le montre l'équation suivante :

$$K_T = \frac{R_{Ggh}}{R_{GCS}} \quad (\text{I.19})$$

7. Gisement solaire en Algérie

L'Algérie est classée parmi les pays qui possèdent un gisement plus important au monde, suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts au SAHARA algérien. La répartition du potentiel solaire par région climatique au Niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.3 selon l'ensoleillement reçu annuellement. [6]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moye. d'insolation (h/an)	2 650	3 000	3 500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1 700	1 900	26 500

Tableau I.3 : ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

8. Conclusion

Après avoir présenté les différentes caractéristiques du soleil, avoir positionné le soleil en différents systèmes de coordonnées, étudier la composition de rayonnement solaire ainsi, l'estimation des composants de l'irradiation solaire ont conclu, pour une exploitation économique de l'énergie solaire il se fait d'orienter précisément n'importe quel capteur solaire.

Chapitre II

Application et conversion photovoltaïque

1. Introduction

L'énergie solaire est l'électricité et la chaleur produite par le rayonnement solaire, en suivant des différentes procédures telles que les capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques. L'effet photovoltaïque est découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Selon les estimations, l'énergie rayonnée par le soleil représenterait chaque année 40 000 fois les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergies fossiles. Malgré cela, l'énergie solaire reste un domaine assez peu exploité. Néanmoins la prise de conscience collective en fait une énergie douce d'avenir (même si elle est connue et utilisée depuis des millénaires).

2. Fonctionnement des panneaux solaires

2.1. Panneau solaire thermique

Un capteur solaire thermique consiste à convertir l'énergie de chaleur rayonnée par le soleil en énergie calorifique, il est composé d'un coffre vitré à l'intérieur duquel est placée une plaque et des tubes métalliques noirs (absorbeurs). Cette énergie collectée par les absorbeurs est cédée au fluide caloporteur circulant dans des canalisations qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation. [10]

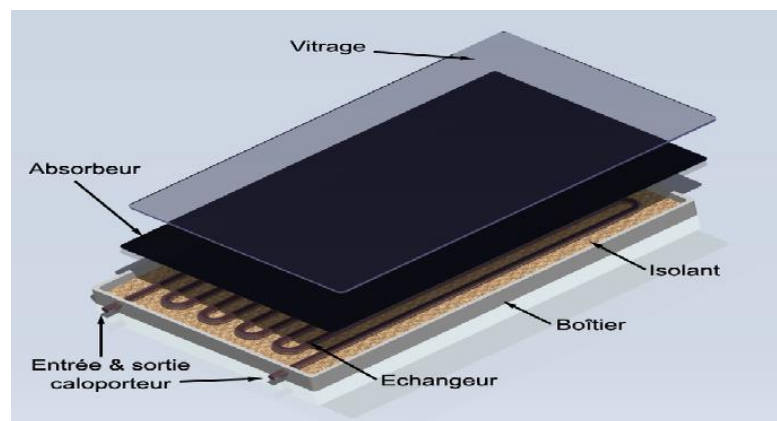


Figure II.1 : les différents composants d'un capteur thermique

Les capteurs solaires sont classés en deux catégories :

- ◆ Les capteurs solaires à air :

Ce type de capteurs s'adapte aux appareils du chauffage à air pour le séchage des produits Agro-alimentaires et le chauffage des locaux.

- ◆ Les capteurs solaires à eau :

Ils s'adaptent aux appareils de chauffage à liquide, y compris ceux dont le liquide entre en ébullition pendant le chauffage (la production de l'eau chaude sanitaire).

2.2. Panneau solaire photovoltaïque

Il est clair qu'un panneau ou un module solaire photovoltaïque est constitué d'un assemblage de cellules en matériaux semi-conducteurs, généralement à base de silicium. Chaque cellule capte l'énergie de la lumière (photons) et la transforme en courant électrique continu.

La puissance du panneau photovoltaïque s'exprime en Watt crête (W_C) : c'est la puissance maximale délivrée dans certaines conditions d'ensoleillement 1000 W/m^2 à une température de cellules de 25°C .

Les panneaux sont installés à plein Sud ou de Sud-Est à Sud-Ouest, pour une inclinaison optimale de 35° par rapport à l'horizontale.

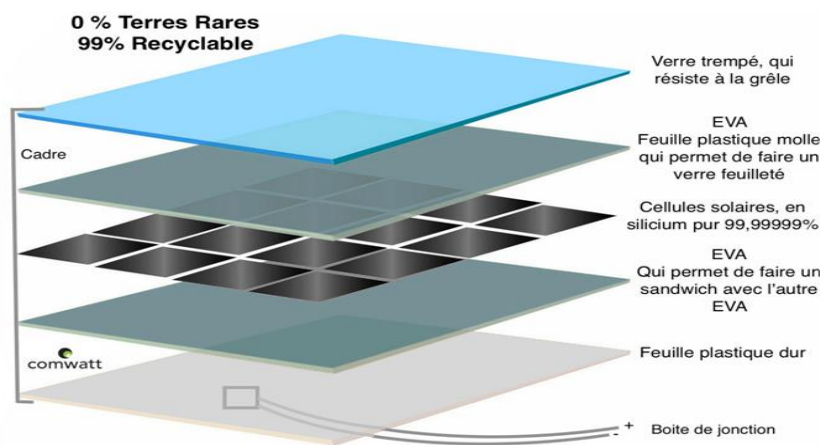


Figure II.2 : composants basiques d'un capteur PV

3.2.1. Technologie de panneaux PV [12]

Le matériau basique le plus utilisé pour la fabrication des cellules (PV) est le silicium. Comme on le voit sur la figure (II.3), un nombre d'étapes est nécessaire pour passer du quartz au module photovoltaïque fini. Tout d'abord l'extraction du silicium de minerais du quartz, puis la purification de ce silicium par diverses techniques, le silicium est obtenu à partir de silice ou oxyde de silicium SiO_2 contenu dans le quartz. La transformation du quartz en silicium dite métallurgique est réalisée dans un four à arc à 2700°C , pour une pureté de 98 à 99% en première étape. La deuxième transformation est une purification du silicium métal en silicium de grade solaire.

Le silicium solaire va être encore une fois fondu et ré-solidifié en lingots ou en ruban dans lesquels seront découpées les plaques de silicium. Ces plaques subiront des transformations qui leurs permettront de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Puis elles seront reliées entre elles et protégées des intempéries dans un module photovoltaïque. La fabrication des autres composants d'un système, à savoir le matériel électrique comme les câbles et les onduleurs. Par ailleurs, il existe plusieurs méthodes en voie physique ou chimique pour effectuer cette fameuse transformation de silicium à partir de quartz arrivant à une cellule finie.

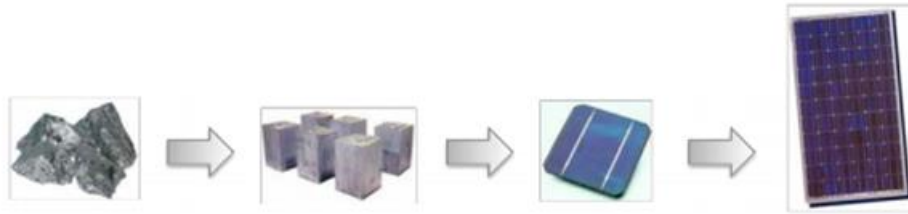


Figure II.3 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un module PV au silicium

3.2.2. Type de cellules photovoltaïques [13]

Cellules monocristallines

Les cellules au silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques et offrent le meilleur rendement qui vaut entre 16% à 19%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais font appel à une méthode de production plus complexe, et nécessitent une grande quantité d'énergie, donc elles sont coûteuses.

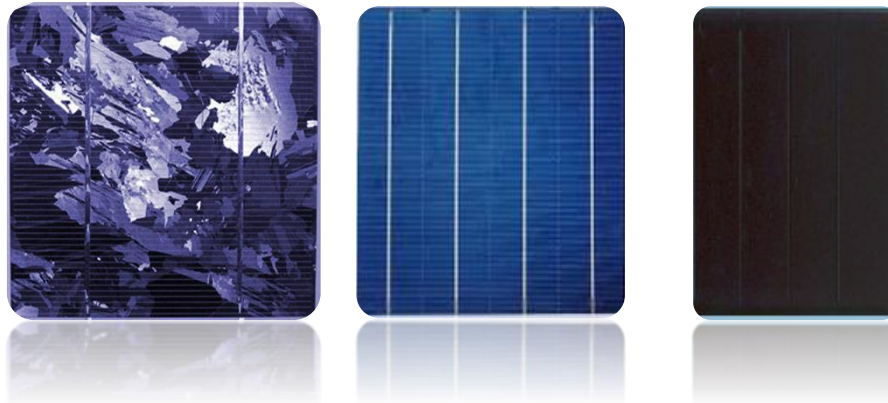
Cellules polycristallines

Les cellules au silicium polycristallin ont généralement un rendement compris entre 12 et 14%. Il faut environ 8m² de cellules pour obtenir 1kWc. Ces cellules sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin, les cellules polycristallines sont reconnaissables aux formes irrégulières des cristaux qui apparaissent nettement à l'œil nu.

Cellules amorphes

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées à partir du gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté en suite sur différents supports comme des plaques en verre, en plastique souple ou encore en métal, via un procédé de vaporisation sous vide. Ces cellules sont d'une couleur gris foncé.

Il s'agit d'un type de cellule bon marché, que l'on retrouve dans la plupart des objets du fonctionnant quotidien à l'énergie solaire (calculatrice et montre solaire par exemple). Cette technologie est pratique car elle est utilisable sur de nombreux supports et elle peut fonctionner avec un ensoleillement si faible. Cependant, ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m² pour 1kWc).



a) *polycristalline* b) *monocristalline* c) *amorphe*

Figure II.4 : différents types des cellules PV

3.3. Effet photovoltaïque [11]

Pour qu'un électron soit expulsé d'un métal sous l'action d'une radiation convenable, il doit absorber une énergie rayonnante W au moins égale à un travail W_0 appelé travail d'extraction. Si l'excédent d'énergie se retrouve dans l'énergie cinétique E_c de l'électron expulsé.

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 = w - w_0 \quad (\text{II.1})$$

Cette énergie cinétique est indépendante de l'énergie rayonnante, elle dépend de la puissance de la lumière monochromatique de fréquence ν reçu par le métal: $E = h \nu$

E : énergie du photon (J)

ν : fréquence de la radiation monochromatique

h : constante de Planck qui vaut $6,626076 \times 10^{-34}$ J/s

On constate que l'énergie du photon est proportionnelle à la fréquence et varie donc en fonction de la radiation.

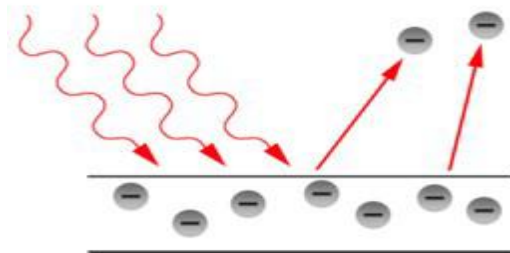


Figure II.5 : extraction des électrons

3.2.1. Semi-conducteur

Un cristal semi-conducteur intrinsèque est un solide dont les noyaux d'atomes sont disposés aux nœuds d'un réseau régulier. La cohésion de ces atomes est due à des liaisons de covalence, c'est-à-dire : Deux atomes voisins mettent en commun un électron pour former une liaison. Les électrons qui participent à ces liaisons sont des électrons liés. Les électrons excédentaires, s'ils existent, sont des électrons libres.

3.2.2. Le dopage du silicium [12]

Dans le cas du silicium, l'énergie solaire peut permettre de le rendre conducteur par agitation thermique. Cependant, les atomes de silicium se lient entre eux dans un réseau cristallin pour entrer dans un état stable, qui le rendent moins conducteur. En effet, comme l'atome a quatre électrons sur sa couche externe, il les met en commun avec les électrons des atomes voisins.

3.2.3. Dopage de type N [12]

Consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type N, on augmente fortement la concentration en électrons libres.

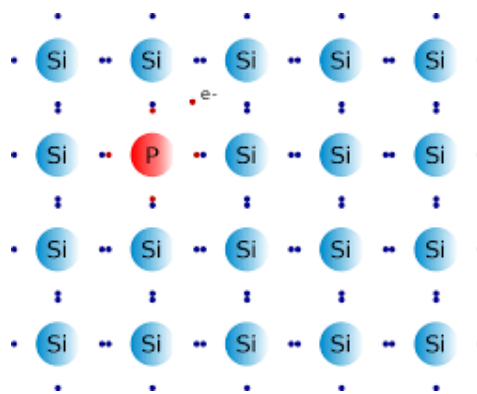


Figure II.6 : dopage de type N

3.2.4. Dopage de type P

Utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type P le plus couramment utilisé pour le silicium. Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type N et type P), il en résulte après recombinaison des charges libres (électrons et trous) un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque.

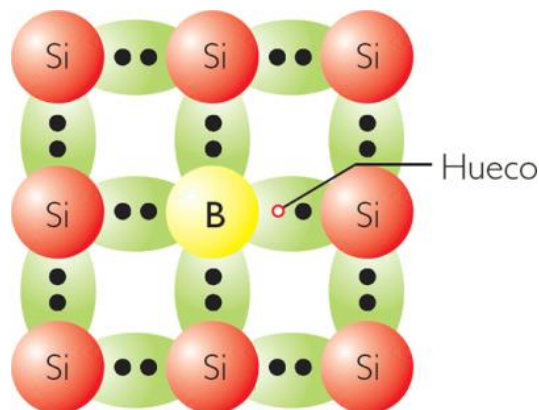


Figure II.7 : dopage de type P

3.2.5. Jonction PN

La jonction PN est la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N, on observe au niveau de la jonction l'apparition d'une zone de charges d'espace, dans laquelle il n'y a pas de charges mobiles. En effet, à l'interface de ces deux couches, un champ électrique se forme dû à la différence de charge et empêche les électrons libres de rejoindre les trous.

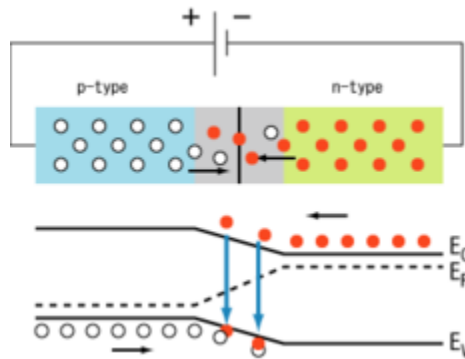


Figure II.8 : migration des charges mobiles vers le plan de jonction

3.4. Application de l'effet photovoltaïque pour une cellule solaire [13]

La conductivité électrique du silicium est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants, donc son comportement électrique est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie, dont un électron dans un solide ne peut que prendre des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles nommés "bandes", plus spécifiquement bandes permises, appelées respectivement "bande de valence" et "bande de conduction" séparées par des autres bandes qui sont appelées des bandes interdites ou gaps.

La bande de valence est riche en électrons mais ne participe pas aux phénomènes de la conduction (pour les électrons). La bande de conduction, quant à elle, est : soit vide, soit semi-rempli (comme dans le cas des métaux) d'électrons. Cependant, c'est elle qui permet les électrons à circuler dans le solide. Dans les conducteurs (métaux), la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent. Les électrons peuvent donc passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circuler dans tout le solide.

Pour un semi-conducteur ou un isolant, ces deux bandes sont séparées par un gap, l'unique différence entre le semi-conducteur et l'isolant est la largeur de ce gap, une largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives.

Dans un isolant cette largeur est si grande que les électrons ne peuvent passer de la bande valence à la bande de conduction, les électrons ne circulent pas dans le solide. Pour les semi-conducteurs cette largeur est plus petite. En illuminant les électrons seront alors capables de passer de la bande de valence à la bande de conduction et de circuler dans le matériau.

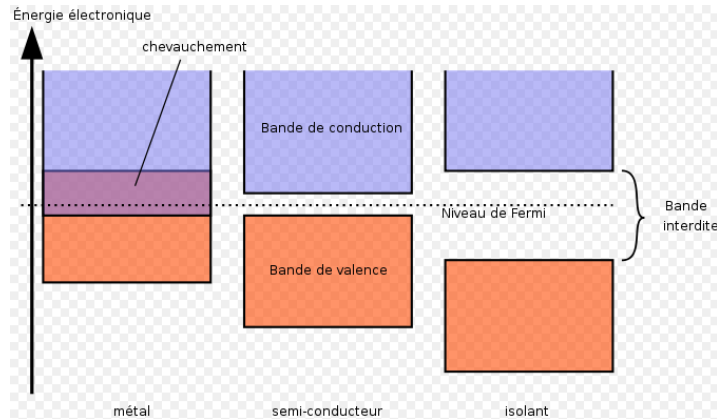


Figure II.9: différence entre un matériau semi-conducteur, un métal et un isolant.

3. Caractéristiques et modélisation d'une cellule photovoltaïque

3.1. Modèle électrique de la cellule

Une analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous un éclairage et celui d'un générateur de courant produisant un courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans le schéma figurant ci-dessous.

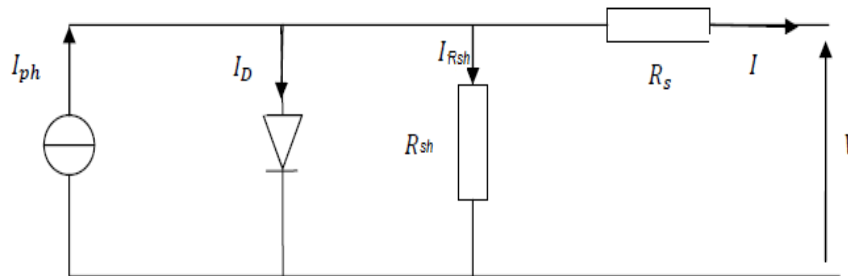


Figure II.10: modèle électrique d'une cellule PV

Les différents paramètres de ce modèle sont [14] :

- ◆ Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant-photo généré.
- ◆ La résistance en série R_s : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- ◆ La résistance R_{sh} : également connue sous le nom de court-circuit, elle peut être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.
- ◆ La diode : modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur

La loi de Kirchhoff permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad (\text{II.2})$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (\text{II.3})$$

L'expression donnant la relation entre le courant et la tension est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_S}{aV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{Sh}} \quad (\text{II.4})$$

Les expressions de I_{ph} et de I_0 respectivement le photo-courant produit et le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (\text{II.5})$$

$$I_0 = \left(I_{cc} \cdot \exp\left[\frac{V_{oc}}{a.V_t}\right] - 1 \right) \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^3 \exp\left[\frac{q.E_g \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)}{a.K}\right] \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$V_t = \frac{K.T}{q}$: La tension thermique à la température T

$q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$: La charge de l'électron

$K = 1,381 \cdot 10^{-23} J/K$: La constante de Boltzmann

$E_g = 1,12 eV$: L'énergie de gap pour le silicium cristallin

$K_i = 1,2 A/cm^2 K^3$

3.2. Caractéristiques électriques de la cellule

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

3.2.1. Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur (PV) est nulle. Dans le cas idéal (R_S nulle et R_{Sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} , si ce n'est pas le cas, le courant de court-circuit est donné par la relation suivante:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q.I_{cc}.R_S}{a.K.T}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc}.R_S}{R_{Sh}} \quad (\text{II.7})$$

Pour la plupart des cellules dont la résistance en série est faible, le terme $I_0 \left[\exp\left(\frac{q.I_{cc}.R_S}{R_{Sh}}\right) \right]$ peut être négligeable devant I_{ph} donc l'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_S}{R_{Sh}}} \quad (\text{II.8})$$

3.2.2. Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q.V}{a.K.T}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{Sh}} \quad (\text{II.9})$$

Dans le cas idéal, son expression est :

$$V_{co} = V_t \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right] \quad (\text{II.10})$$

3.2.3. Puissance de la cellule

La puissance électrique produite par une cellule PV dans des conditions ambiantes de l'éclairement et de température est :

$$P = I.V \quad (\text{II.11})$$

3.2.4. Puissance maximale

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale est donnée comme suit :

$$P_{max} = V_{co}.I_{cc} \quad (\text{II.12})$$

La courbe caractéristique courant-tension d'une cellule PV et le point de puissance maximale sont représentés sur la figure ci-dessous :

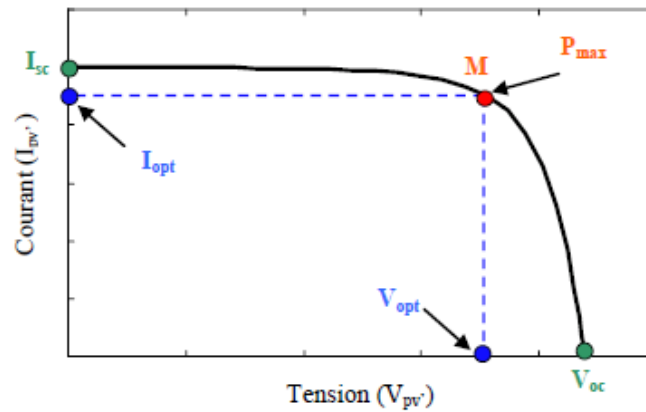


Figure II.11: la courbe caractéristique de la cellule PV

3.2.5. Facteur de forme

Le facteur de forme est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle $I_{cc}.V_{co}$, il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{II.13})$$

3.2.6. Rendement de la cellule

Le rendement d'une conversion d'énergie solaire en énergie électrique de la cellule PV est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule PV et la puissance du rayonnement solaire incident, il est donné comme suit :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S.R_G} \quad (\text{II.14})$$

Le rendement est mesuré dans des conditions de référence c'est-à-dire à une température du panneau de 25°C et un éclairement de 1000W.m⁻².

3.3. Modules photovoltaïques

Pratiquement la cellule photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 Watt avec une tension moins de 1 volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque.

3.3.1. Association en série

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même.

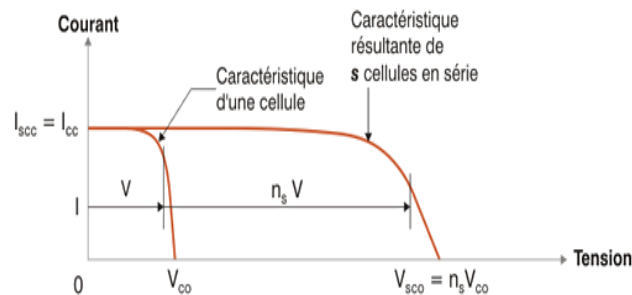


Figure II.12: caractéristique résultante des cellules en série

3.3.2. Association en parallèle

D'autre part une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur. Dans le groupement parallèle les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

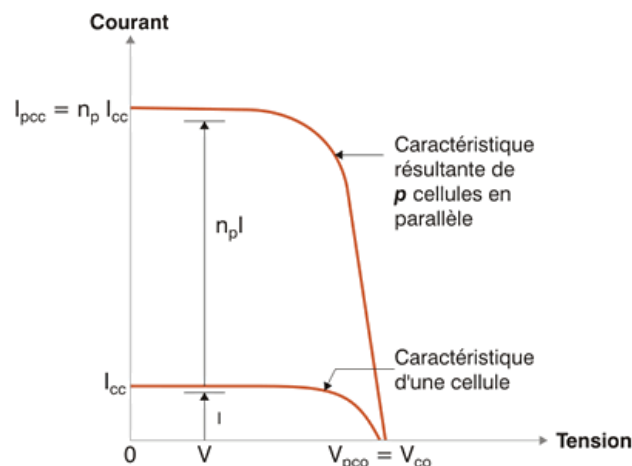


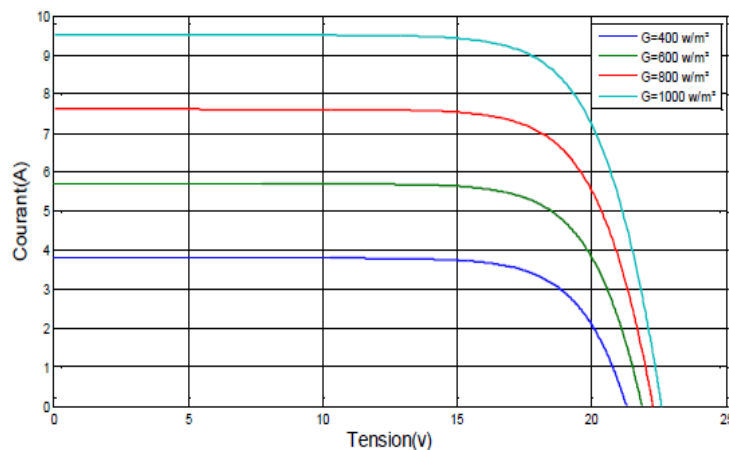
Figure II.13: caractéristique résultante obtenue en association en parallèles

4. Paramètres influents sur le fonctionnement d'une cellule PV [15]

4.1. Ensoleillement

L'ensoleillement faible provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, le courant électrique varie proportionnellement avec une diminution de l'ensoleillement, qui est accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{co} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent les caractéristiques P(V) et I(V) respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et un ensoleillement variable.



FigureII.12: influence de l'ensoleillement

4.2. Température

La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque, nous remarquons que le courant de court-circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée. La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de 30°C).

Pour le même éclairage les courbes caractéristiques (Tension Courant) changent avec la température des cellules.

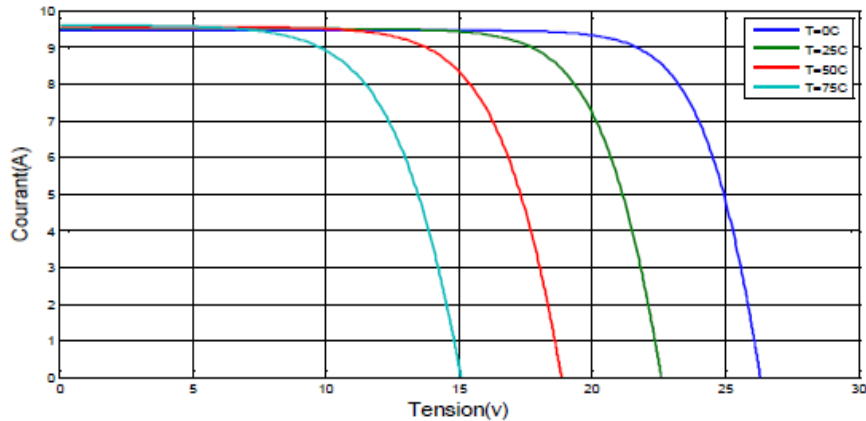


Figure II.15: influence de la température

5. Composition d'un système PV

5.1. Générateur

Les générateurs sont des appareils qui transforment de l'énergie sous une forme donnée en énergie électrique. Le simple exemple un panneau solaire photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique.

5.2. Batteries

Les systèmes photovoltaïques exigent habituellement des batteries qui peuvent être chargées pendant la journée et déchargées durant la nuit. Ces batteries doivent fonctionner ainsi pendant des années sans marquer plus qu'une détérioration minimale de leurs rendements, tout en satisfaisant la demande, les jours où il n'y a que peu ou pas de soleil. Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- ◆ **Autonomie** : nombre de jours pendant lesquels la batterie doit fournir la puissance requise sans n'être recharger ni subir de dommage.
- ◆ **Courant de surcharge** : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelque instant, c'est à dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.
- ◆ **Stabilisation de la tension** : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

5.3. Régulateur de charge

Leur fonctionnement principal est de protéger la batterie contre les charges excessives et les décharges profondes, il permet de stabiliser la tension des modules PV et la charge des batteries.

5.4. Onduleur

Transforme le courant continu de la tension et d'intensité variables en courant alternatif répondant aux normes imposées par le responsable du réseau ou les appareils consommateurs, aussi il assure la protection de découplage lors de coupures de réseau.

5.5. Conducteurs

Les conducteurs sont des matériaux qui permettent le passage du courant électrique. Ces conducteurs relient les générateurs aux récepteurs (câbles électriques).

5.6. Récepteurs

Les récepteurs sont des appareils d'utilisation qui consomment de l'énergie électrique avec ou sans dissipation de chaleur.

6. Conclusion

Il est rappelé dans ce chapitre le principe de la conversion de l'énergie solaire, à savoir le fonctionnement et les technologies d'un panneau photovoltaïque, nous avons discuté les caractéristiques électriques fondamentales à prendre en compte qui, sont données à partir des paramètres de fonctionnement tels que la température ambiante et le rayonnement solaire.

Chapitre III

Simulations numériques

1. Introduction

Par définition, le transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre deux corps. On distingue habituellement trois modes du transfert de chaleur : la conduction thermique, le rayonnement thermique et la convection.

En premier temps, on présente la configuration du domaine d'étude, le mode du transfert thermique par rayonnement et par convection, dans le but de déterminer le coefficient d'échange convectif.

Généralement les équations qui décrivent les phénomènes du transfert de chaleur sont difficiles à résoudre analytiquement, donc on cherche des solutions approchées de la solution exacte par des méthodes numériques à l'aide des logiciels de simulation qui seront aussi présentés par la suite.

2. Description du domaine d'étude

L'étude est portée sur une plaque mince du silicium, une cavité rectangulaire sera mise au-dessous de la plaque, pour des raisons à obtenir des performances énergétiques élevées, on implante des rangées de chicane dans la cavité de refroidissement, d'une façon à créer une turbulence et à prolonger la trajectoire du fluide, en favorisant un meilleur échange thermique convectif, et par conséquence une amélioration notable de l'efficacité thermique.

Les dimensions de la géométrie sont $991 \times 50 \times 840$ (mm³) avec 27 chicanes de dimension 931×45 (mm²) et une distance de 30mm entre eux.

L'épaisseur de la plaque en silicium est de 5(mm), en effet les échanges thermiques par conduction sont négligeables.

Le fluide de refroidissement est l'eau, à une température de $T_e = 300^{\circ}k$ ses propriétés physiques sont :

Densité $\rho = 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

La conductivité thermique $\lambda = 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Capacité thermique spécifique $C_p = 4182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Viscosité dynamique $\mu = 1,003 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode du transfert par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus basse, sans nécessité d'un matériel intermédiaire.

C'est donc le seul mode du transfert de chaleur qui peut se propager dans le vide. L'exemple le plus simple est celui du rayonnement solaire. [16]

Un flux surfacique d'énergie radiative échangé entre un corps opaque et le champ du rayonnement peut être émis ou absorbé, la conservation de l'énergie impose que :

$$\varphi_r = \varphi_e - \varphi_a \quad (\text{III.1})$$

La loi de Stephan-Boltzmann énonce que le rayonnement thermique d'une surface S à une température T_p , s'exprime par :

$$\varphi_e = \sigma \cdot S \cdot T_p \quad (\text{III.2})$$

Lorsqu'il y a un échange entre la surface rayonnante et le milieu extérieur à une température T_a , l'équation d'échange s'écrit :

$$\varphi_e = \varepsilon \cdot \sigma (T_p^4 - T_a^4) \quad (\text{III.3})$$

Le flux surfacique absorbé est donné par :

$$\varphi_a = S \cdot \alpha \cdot R_G \quad (\text{III.4})$$

4. Evaluation de la température du panneau non refroidi

Pour prédire la température d'un panneau solaire, on applique le principe de conservation de l'énergie, l'équation générale traduisant le bilan énergétique en un régime permanent est donnée comme suit :

$$\sum_e Q_i = \sum_s Q_i \quad (\text{III.5})$$

L'application de ce principe donne une équation qui, régit le phénomène de transfert thermique par convection et par rayonnement dans un panneau est la suivante :

$$S \cdot \alpha \cdot R_G = \varepsilon \cdot \sigma (T_p^4 - T_v^4) + S \cdot h (T_p - T_a) \quad (\text{III.6})$$

Tel que :

α : le coefficient d'absorption qui vaut 0,9

ε : coefficient d'émissivité qui vaut 0,75

$G = 1000 \text{ w/m}^2$ Rayonnement global incident sur le capteur

$S = 0,991 \times 0,84 \text{ m}^2$ La surface du panneau

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$ La constante de Stephan-Boltzmann.

$T_a = 30^\circ\text{C}$ La température de l'air

T_v : La température de la voûte céleste est donnée par la relation de SWINBANK [18]

$$T_v = 0,0552.T_a^{1,5} \quad (\text{III.7})$$

L'expression de la température du panneau est donc :

$$T_p = \frac{\alpha \cdot R_G \cdot S(T_p^4 - T_v^4)}{2 \cdot h \cdot S} + T_a \quad (\text{III.8})$$

Les propriétés physiques de l'air assimilé à un gaz parfait, à la pression atmosphérique sont :

$$\rho = 1,127 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1006 \text{ j/kg.k}$$

$$\lambda = 0,026 \text{ w/m.k}$$

$$\mu = 1,846 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$$

5. Transfert de chaleur par convection

La convection est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide gazeux ou liquide (écoulement), et échange de la chaleur avec une surface qui est à une température différente. Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue deux types de convection : naturelle et forcée. Le problème majeur à résoudre dans le cas d'un transfert de chaleur convectif est de déterminer le coefficient d'échange convectif h qui, se calcule à l'aide des corrélations proposées par Bejan. A 95. [17]

Pour une plaque plane horizontale chauffée vers le haut :

En régime laminaire :

$$Nu = 0,54Ra^{1/4} \quad , 10^4 < Ra < 10^7 \quad (\text{III.9})$$

En régime turbulent :

$$Nu = 0,15Ra^{1/3} \quad , 10^7 < Ra < 10^9 \quad (\text{III.10})$$

Pour une plaque chauffée vers le bas :

$$Nu = 0,27Ra^{1/4} \quad , 10^3 < Ra < 10^{10} \quad (\text{III.11})$$

6. Simulation numérique

Le choix de la simulation du panneau refroidi est porté sur le code de calcul Fluent "6.3.26" cependant, la simulation du panneau non refroidi est faite à l'aide du logiciel de programmation MATLAB.2010a qui seront présentés ci-dessous.

1. Code Fluent (panneau refroidi)

L'architecture du logiciel est comme tous les logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics), il est composé de trois éléments : le préprocesseur, le solveur et le poste de processeur.

6.1.1. Préprocesseur Gambit

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine du calcul et discrétiser ce dernier en le maillant. Il génère des fichiers "msh" pour le solveur. Le Gambit regroupe trois fonctions :

- ✓ Définition de la géométrie du problème.
- ✓ Le maillage et sa vérification.
- ✓ La définition des frontières (des conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

L'interface de logiciel Gambit

La première chose à faire quand on entre sur Gambit est de donner un nom pour le système qu'on va construire de telle manière pour qu'on ne le perd bêtement. L'utilisation de Gambit est simple : principalement il faut prendre les menus en haut à droite et effectuer les tâches en partant du menu de gauche pour aller jusqu'à celui de la droite. Avant même de créer la géométrie il faut choisir le type du solveur ; c'est-à-dire le type du logiciel qu'on va utiliser par la suite.

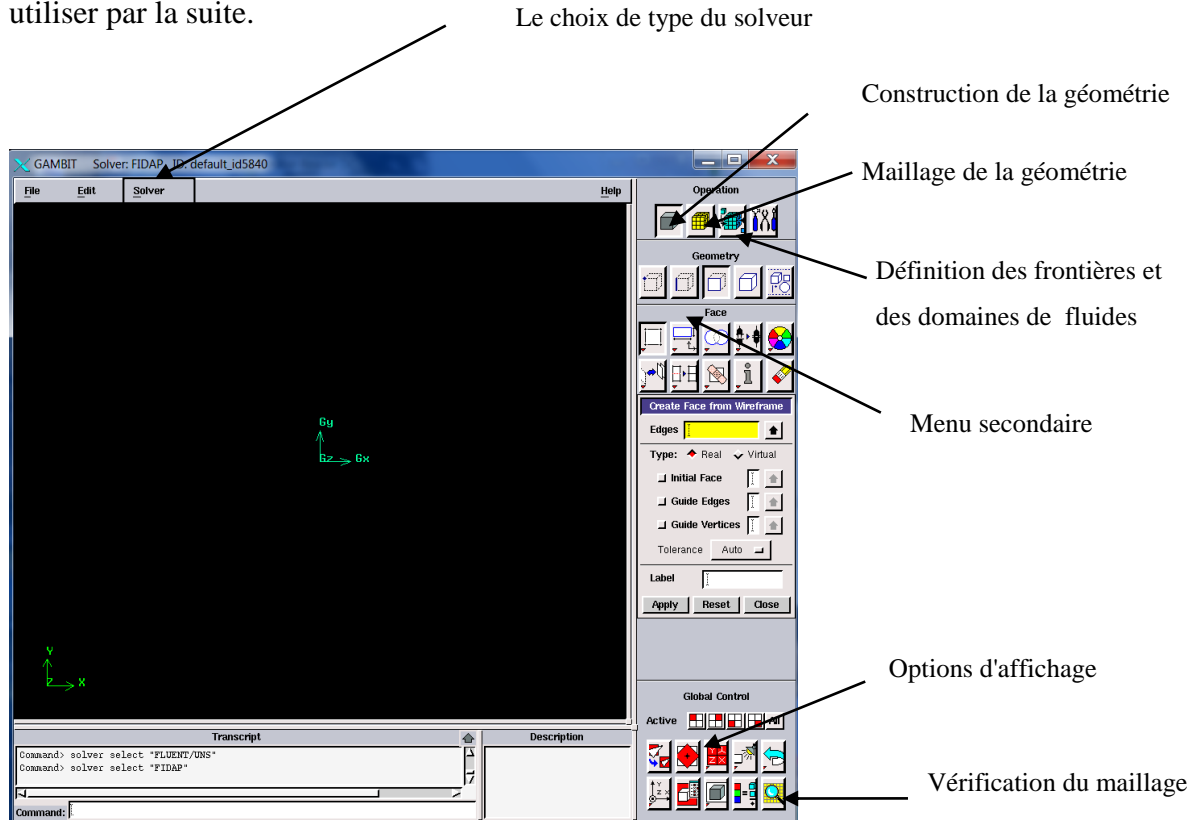


Figure III.1: Les différentes options du Gambit

Création de la géométrie et son maillage

Ces deux étapes sont réalisées au même temps sur "Gambit", la géométrie est construite en 3D avec les dimensions $991 \times 50 \times 840$ (mm³), à partir d'une face rectangulaire maillée en 2D (maillage Structuré en Quadrilatère). La fonction "Sweep faces" (with mesh) nous a permis d'avoir un volume avec un maillage affiné convenablement pour bien contrôler les résultats (745920 mailles).

Pratiquement, il n'existe pas de règles précises pour la création d'un maillage valable, cependant, il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille répondant à quelques règles qu'on cite ci-dessous :

- ◆ Maintenir une bonne qualité des éléments.
- ◆ Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient.
- ◆ Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable).

Les paramètres des zones de calcul sont suivants :

Conditions aux limites (Specify Boundary Types)

Face 6 : MASS_FLOW_INLET (l'entrée du débit massique).

Face 421 : OUTFLOW (la sortie du débit).

Toutes les faces sont de type Wall (paroi).

Définition des domaines

La géométrie est composée de zones selon leurs matériels :

Zone 1 : est de type fluide ; le siège du fluide de refroidissement.

Zone 2 : est de type solide qui représente le panneau PV à étudier.

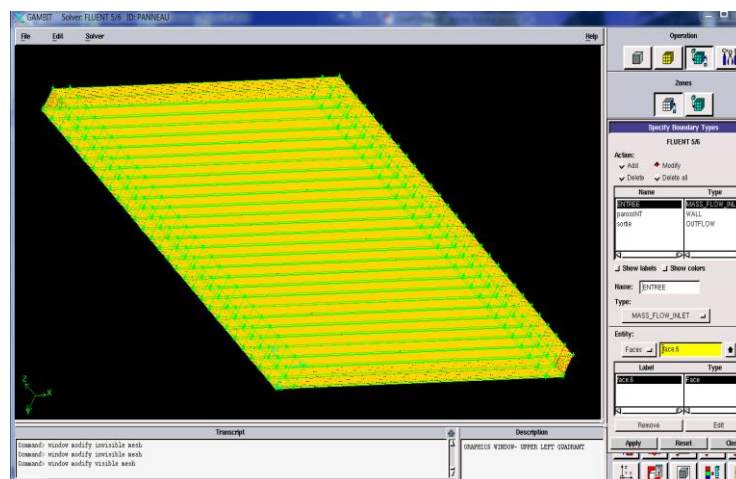


Figure III.2: Maillage 3D de domaine de calcul

Exportation du maillage

Avant d'exécuter le code Fluent, il est nécessaire de faire exporter le maillage sous format «. Msh », pour qu'il puisse être lu par Fluent en suivant ces étapes : *File, Export, Mesh*.

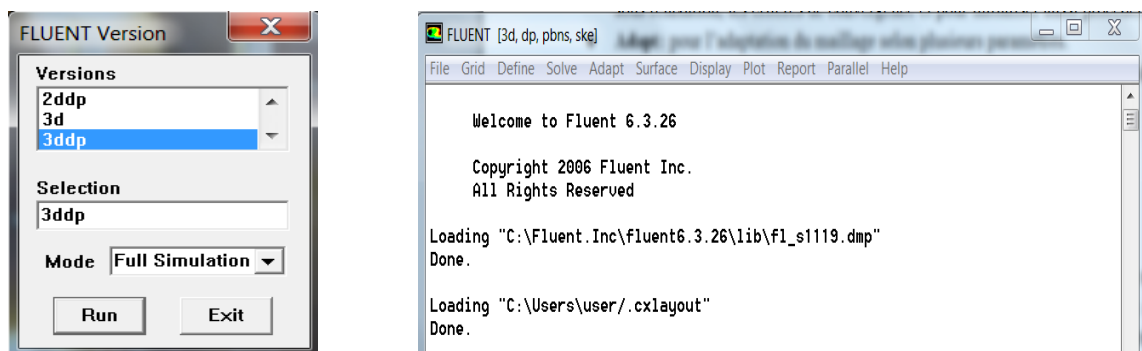
6.1.2. Solveur Fluent [19]

La simulation numérique en dynamique des fluides est faite à l'aide du logiciel Fluent CFD, il est utilisé pour la modélisation, la visualisation, la prédiction aussi l'analyse des écoulements de fluide et les transferts thermiques. Le package Fluent est basé sur la méthode des volumes finis pour la résolution des équations gouvernantes le système étudié, quel que soit ses propriétés physiques ou thermiques tels que :

- ◆ La nature du fluide (compressible ou incompressible, Newtonien ou non-Newtonien, visqueux ou non-visqueux).
- ◆ Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent, permanent ou transitoire).
- ◆ Type de transfert de chaleur (par conduction, convection ou par rayonnement).
- ◆ Type de coordonnées dont le système est repéré (2D/3D, coordonnées cartésiennes, cylindriques ou sphériques).
- ◆ Modèle de convection (naturelle, forcée ou mixte) ...etc.

Interface du code fluent

Notre géométrie est en 3D d'une longueur importante par rapport à son épaisseur, ce qui nécessite le choix d'une version en 3D à double précision (3ddp) comme l'indique la figure ci-dessous :



a) Type de résolution

b) La barre des menus principaux

Figure III.3 : vue globale de l'interface de Fluent

L'interface du Fluent contient une barre des menus principaux qui servent à définir les différents les paramètres décrivant les systèmes utilisés nos recherches.

- ◆ *Fil* : pour les opérations concernant les fichiers : lecture, sauvegardé, importation...etc.
- ◆ *Grid* : pour la vérification et la manipulation du maillage et de la géométrie.
- ◆ *Define* : pour définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites.
- ◆ *Solve* : pour choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de sous relaxation, les critères de convergence et pour initialiser aussi procéder au calcul.

- ◆ *Adapt* : pour l'adaptation du maillage selon plusieurs paramètres.
- ◆ *Surface* : pour créer des points, des lignes et des plants nécessaires pour l'affichage des résultats.
- ◆ *Display et plot* : pour l'exploitation des résultats.
- ◆ *Report* : pour afficher des rapports contenant les détails du problème traité.
- ◆ *Parallel* : pour le calcul parallèle.
- ◆ *Help* : pour l'exploitation du contenu du code.

6.1.3. Post solveur

Cette interface permet de visualiser la géométrie et le maillage des domaines, aussi les résultats obtenus, mais bien évidemment visualiser la répartition des champs de vitesse, de température ainsi que, toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, une section du domaine ou sur tout le volume, il est possible de tracer des courbes.

6.1.4. Critère de la convergence

Les méthodes CFD impliquent un certain schéma itératif pour arriver à produire des résultats corrects. La convergence et l'équilibre de la résolution itérative est contrôlée par l'évolution des résidus au cours des itérations, les équations discrétisées sont considérées comme convergées lorsque toutes les équations présentent un résidu inférieur à un seuil normalisé fixe. Lorsque ces résidus sont de l'ordre de 10^{-7} pour l'énergie et 10^{-3} pour les autres variables, on considère que l'état de convergence est atteint comme il est indiqué sur la figure (III.4).

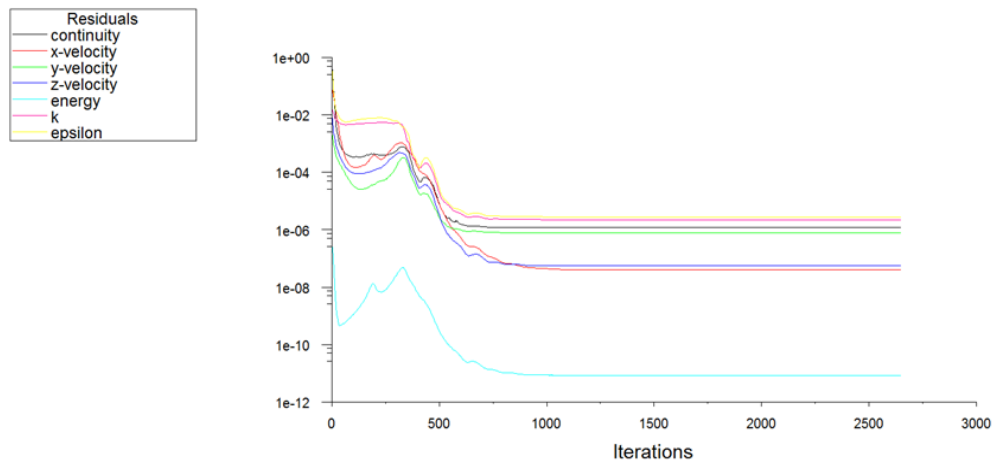


Figure III.4 : la courbe des résidus

2. Programme de calcul MATLAB (panneau non refroidi)

MATLAB est un logiciel commercial de calcul interactif, il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Le logiciel propose un véritable environnement du travail composé de multiples fenêtres. Nous pouvons distinguer quatre blocs :

◆ **Command window** (console d'exécution) : à l'invite de commande « >> », l'utilisateur peut entrer les instructions à exécuter. Il s'agit de la fenêtre principale de l'interface.

◆ **Current directory** (répertoire courant) : permet de naviguer et de visualiser le contenu du répertoire courant de l'utilisateur. Les programmes de l'utilisateur doivent être situés dans ce répertoire pour être visible et donc exécutable.

◆ **Workspace** (espace de travail) : permet de visualiser les variables définies, leurs types, la taille occupée en mémoire...

◆ **Command history** : historique des commandes que l'utilisateur a exécutées. Il est possible de faire glisser ces commandes vers la fenêtre de commande.

6.2.1. Algorithme de calcul

L'algorithme du calcul consiste à exécuter une séquence d'instructions sous forme d'une boucle, cette dernière permet de réaliser un traitement itératif tant qu'une condition déterminée soit vérifiée.

La première étape à faire est de déclarer les valeurs connues (les propriétés thermo-physiques de l'air, les caractéristiques du panneau, les données climatiques).

La deuxième étape : on pose que les températures initiales T_{p0} et T_{p1} sont en fonction de la température ambiante T_a et elles sont légèrement supérieures de T_a . Pour ces températures initiales on calcule :

Les nombres adimensionnels Nu , Gr , le coefficient de dilatation volumique β , le coefficient d'échange convectif h .

La troisième étape consiste à calculer et à vérifier les températures choisies initialement, puis finalement calculer la température du panneau.

6.2.2. Organigramme de calcul

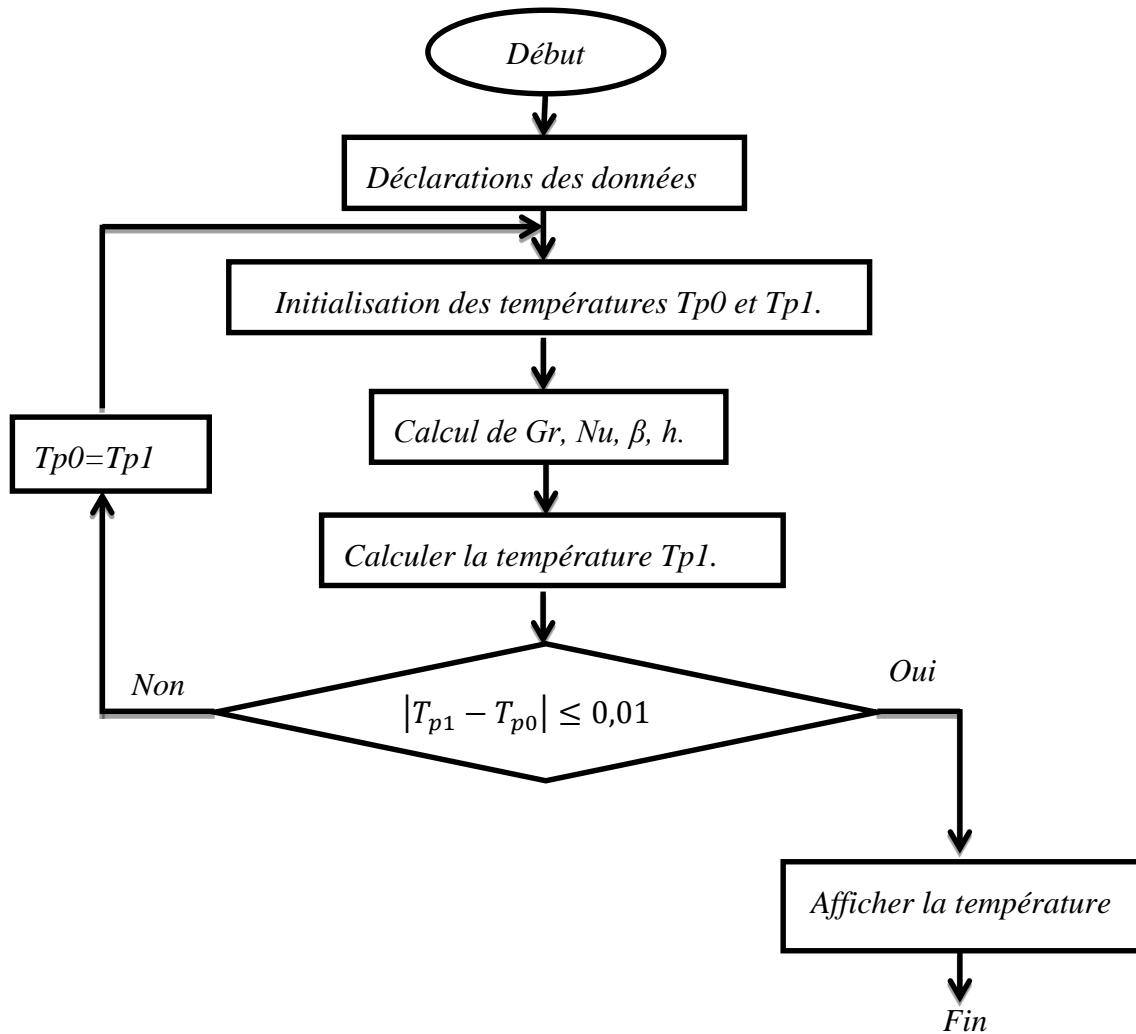


Figure III.5 : organigramme du calcul sous MATLAB

7. Conclusion

Une simulation numérique d'un phénomène est équivalente à une étude expérimentale, toutefois, les expériences et la simulation sont complémentaires, car la simulation permet de réduire le coût des projets complexes en réduisant le nombre d'expérimentation, ainsi que les résultats obtenus sont compatibles.

Chapitre IV

Interprétation et discussion des résultats

1. Introduction

Ce chapitre est consacré principalement à la présentation et à la discussion des résultats de la simulation numérique. Les calculs avec le logiciel fluent vont permettre de suivre les valeurs de la température du panneau PV, en variant les paramètres qui influencent son fonctionnement tel que le débit d'eau à l'entrée de la cavité, la température ambiante, et le rayonnement solaire.

2. Interprétation et discussion des résultats

2.1. Paramètres fixés pour la simulation

L'une des finalités de cette étude est l'analyse de l'influence de la variation du débit d'eau et des paramètres climatiques (la température ambiante et le rayonnement solaire) sur la répartition de la température du panneau.

Pour ce faire, on se propose de refroidir le panneau avec 5 débits d'eau différents (0.025 kg. s^{-1} , 0.050 kg. s^{-1} , 0.100 kg. s^{-1} , 0.125 kg. s^{-1} , 0.150 kg. s^{-1}) sous un rayonnement solaire variant (600 , 800 et 1000 W. m^{-2}), pour des températures de l'air ambiant données (35°C , 40°C , 45°C et 50°C).

2.2. Résultats de la simulation

La figure (IV.1) représente les résidus des équations décrivant le système étudié, la convergence de la résolution de ces équations est contrôlée par l'évolution des résidus, lorsque ces résidus sont d'ordre de 10^{-7} pour l'équation de l'énergie et 10^{-3} pour les autres équations on considère que le système est convergé.

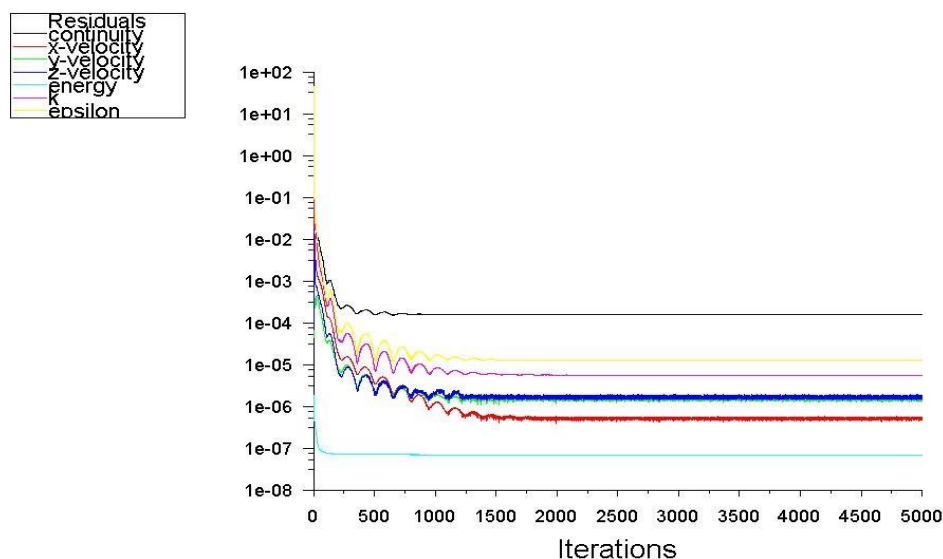


Figure IV.1 : courbe des résidus pour un débit $m = 0.125 \text{ kg. s}^{-1}$

Les figures de (IV.2) à (IV.16) représentent les résultats de la simulation numérique obtenus pour un panneau solaire avec les caractéristiques indiquées dans le chapitre précédent, la température de l'eau à l'entrée est prise constante le long de la simulation, pour étudier l'effet de plusieurs paramètres de fonctionnement sur la température la face supérieure du panneau nous avons varié le débit d'eau entrant, la température de l'air ambiant et rayonnement solaire.

♦ $\dot{m} = 0,025 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}, R_G = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

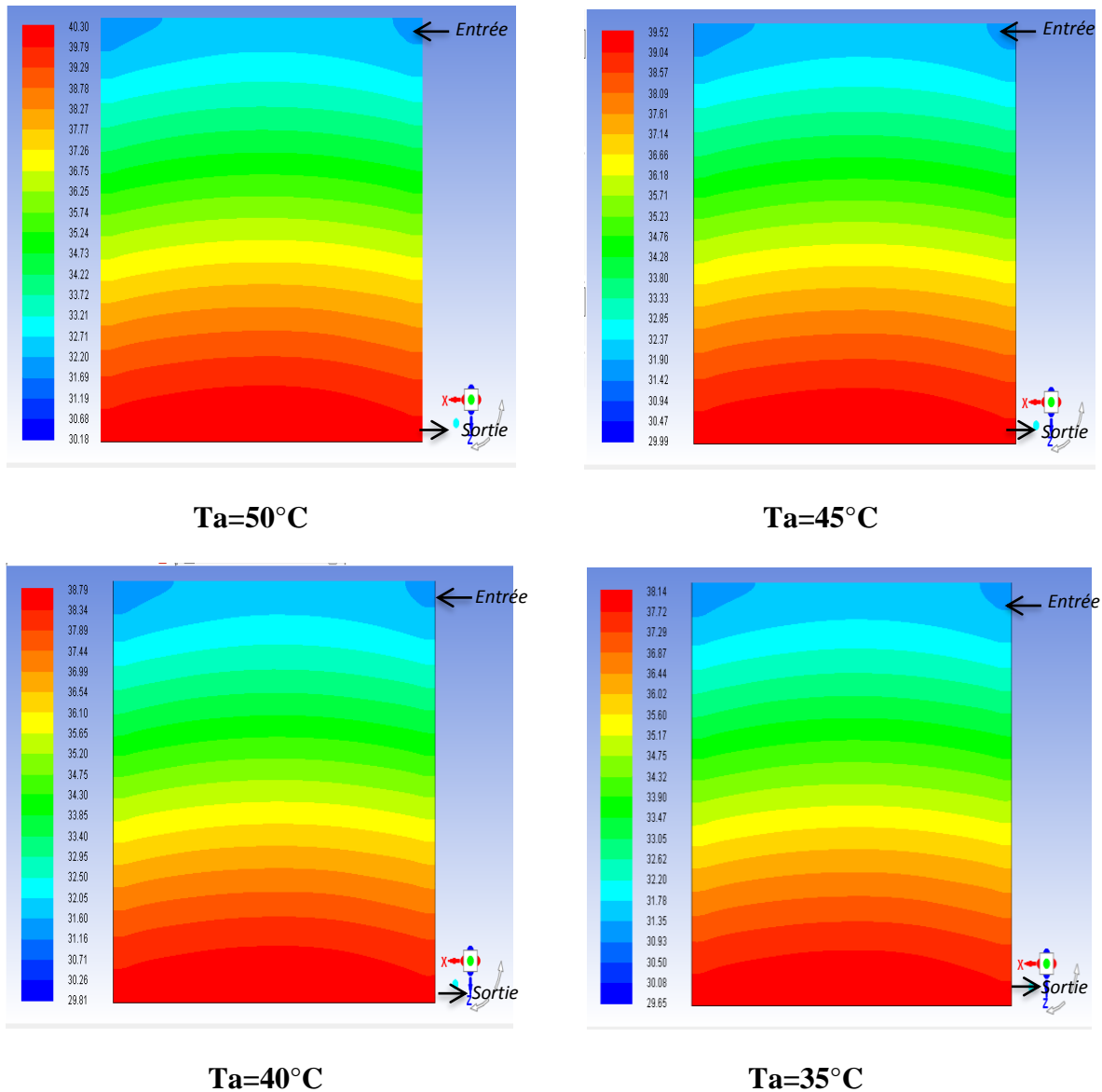


Figure IV.2 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.025 \text{ kg/s}$ et $R_G=1000 \text{ w/m}^2$

La figure (IV.2) montre la répartition de la température sur le panneau pour un débit d'eau égale 0,025 kg/s sous un rayonnement solaire égal 1000W/m², la température du panneau diminue progressivement en diminuant la température de l'air ambiant (T_a=50°C, T_a=45°C, T_a=40°C et T_a=35°C). La répartition de la température sur le panneau varie d'une manière croissante pendant l'écoulement de l'eau.

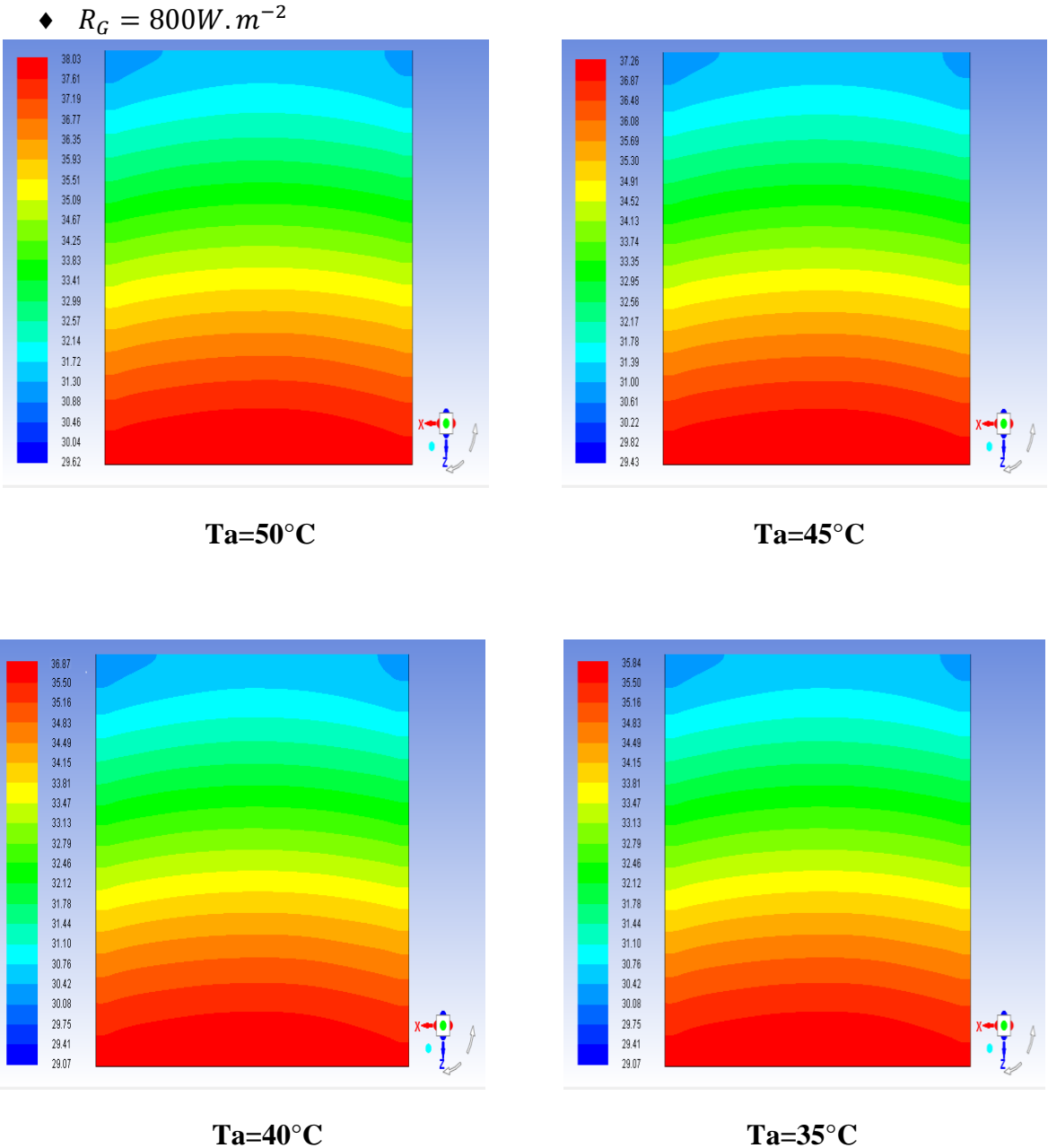


Figure IV.3 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.025\text{kg/s}$ et $R_G=800\text{w/m}^2$

Les figures (IV.3) et (IV.4) montrent la répartition de la température sur le panneau, pour le même débit d'eau et les mêmes valeurs de la température de l'air ambiant sous un rayonnement solaire différent ($R_G=800W/m^2$ et $R_G=600W/m^2$).

◆ $R_G = 600W.m^{-2}$

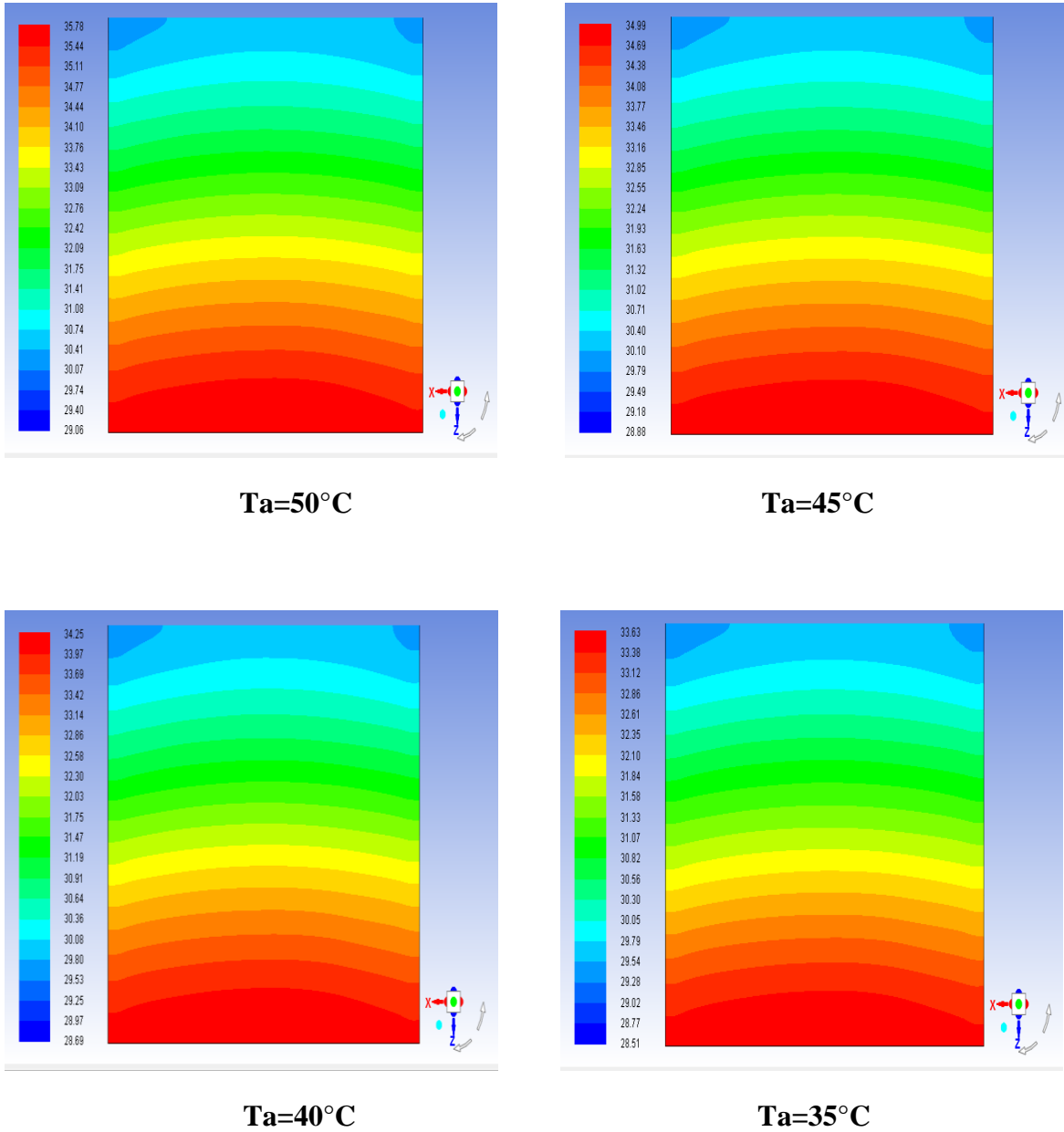


Figure IV.4 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.025$ kg/s et $R_G=600w/m^2$

Eu égard à la variation du rayonnement solaire et de la température de l'air ambiant, la température de la face supérieure du panneau diminue progressivement avec la diminution de ces derniers pour le même débit d'eau.

Les figures (IV.5) à (IV.16) représentent la répartition de la température sur le panneau pour les mêmes paramètres de fonctionnement que le cas précédent, là en faisant varié le débit d'eau (0.050kg/s, 0.100kg/s, 0.125kg/ et 0.150kg/s).

◆ $\dot{m} = 0,050\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}, R_G = 1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

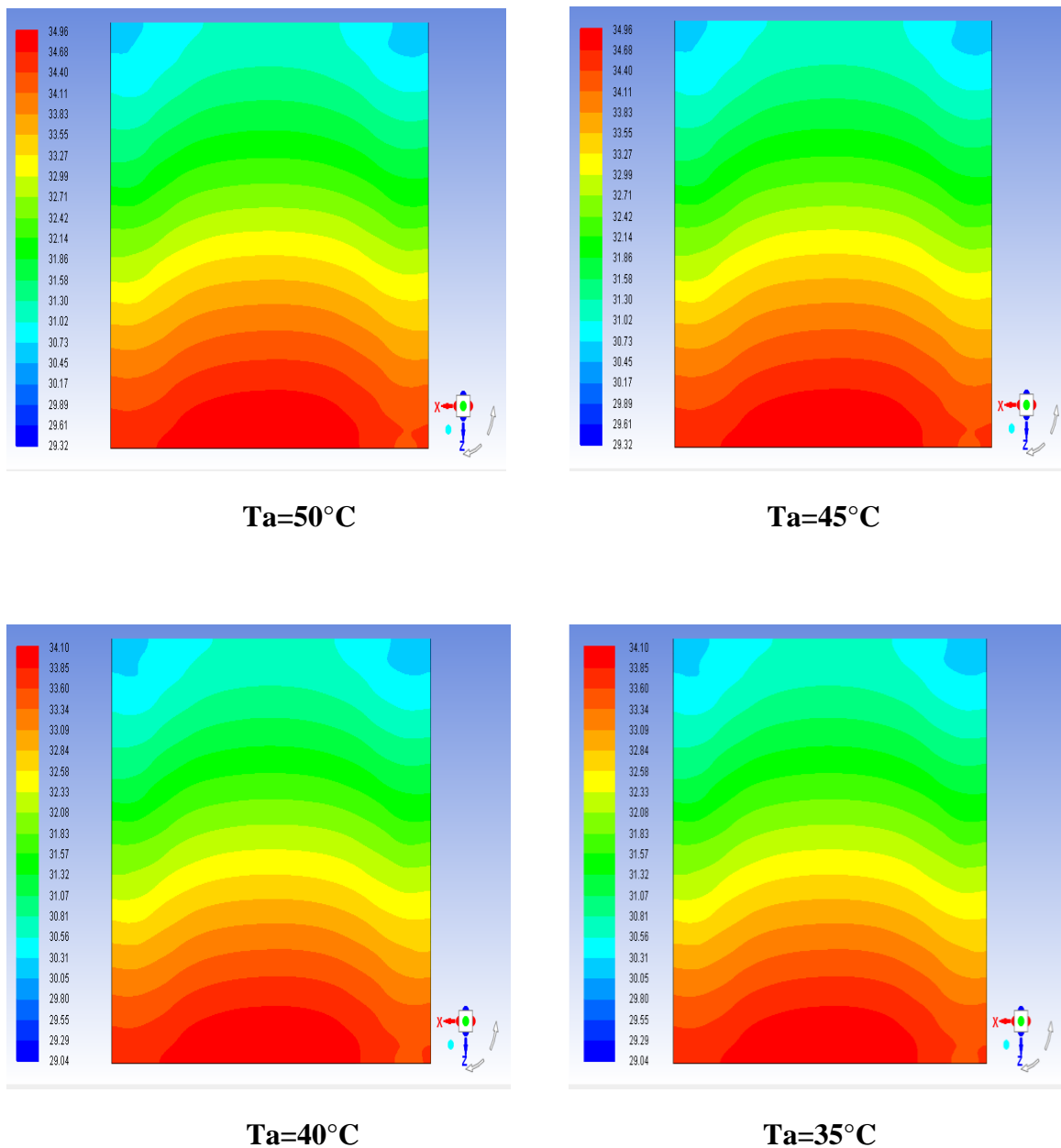
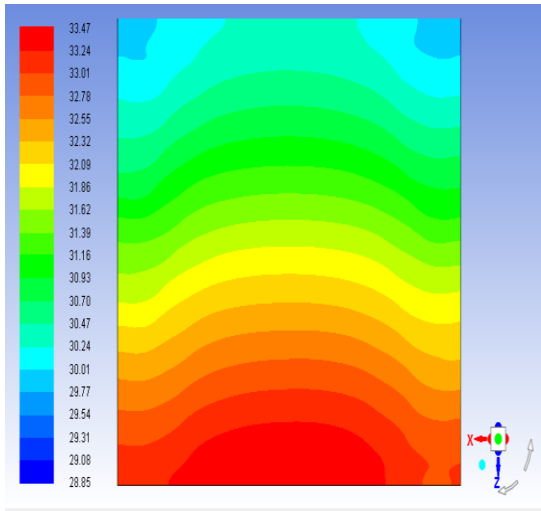
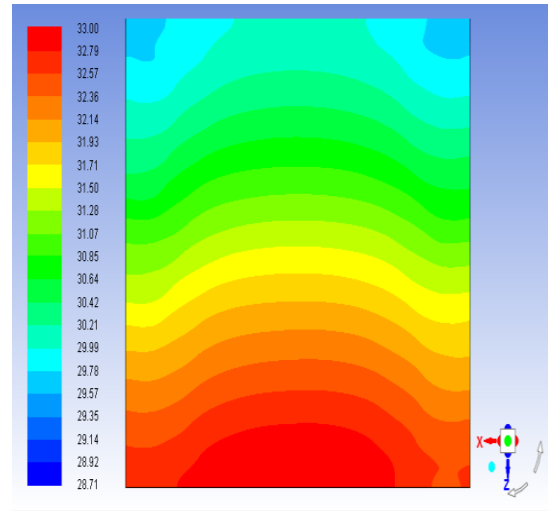


Figure IV.5 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.050\text{ kg/s}$ et $R_G=1000\text{w/m}^2$

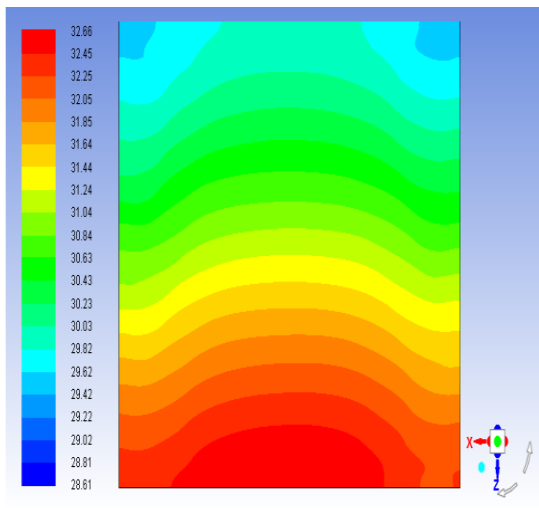
◆ $R_G = 800W.m^{-2}$



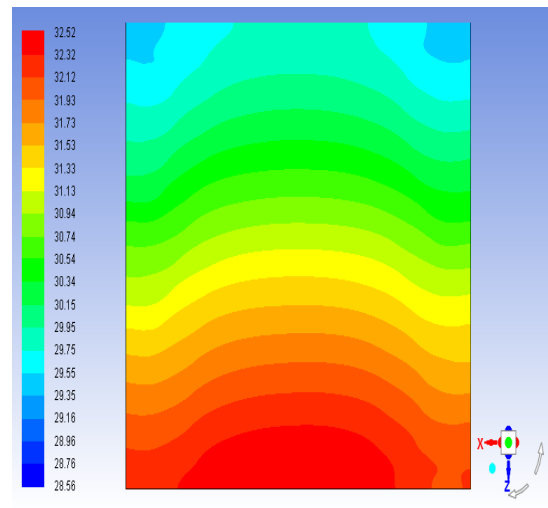
Ta=50°C



Ta=45°C



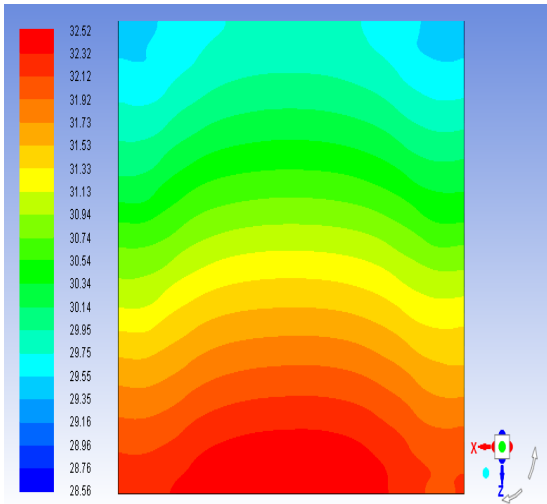
Ta=40°C



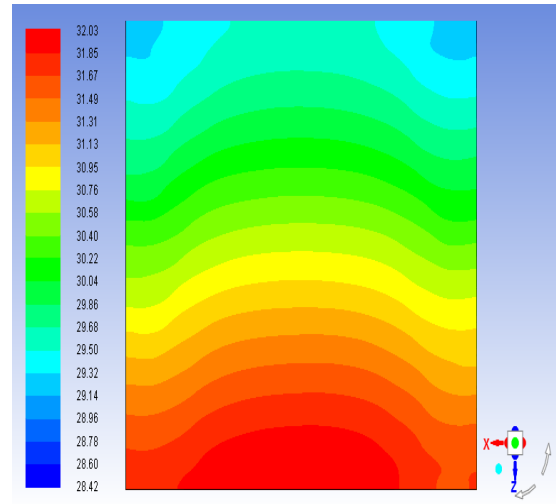
Ta=35°C

Figure IV.6 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.050$ kg/s et $R_G=800w/m^2$

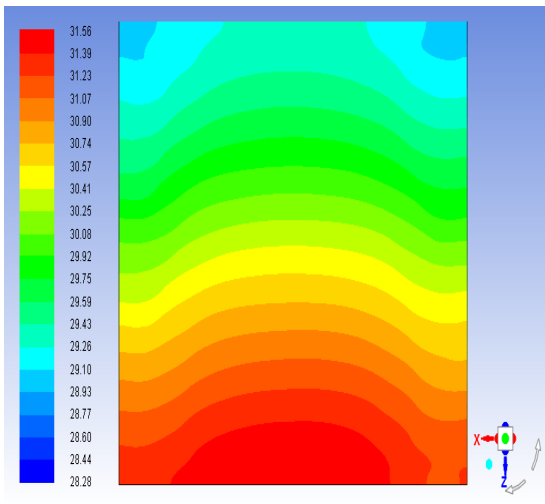
♦ $R_G = 600W.m^{-2}$



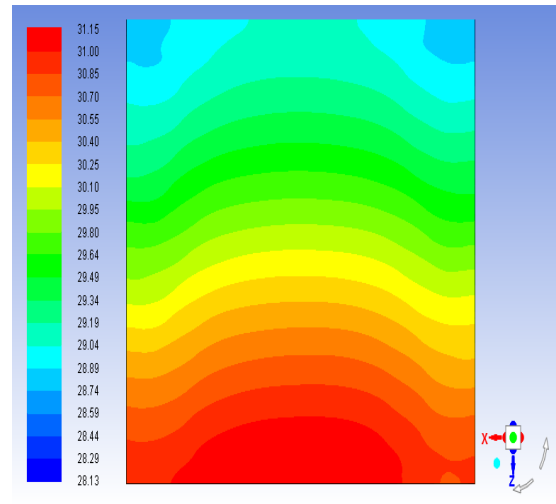
Ta=50°C



Ta=45°C



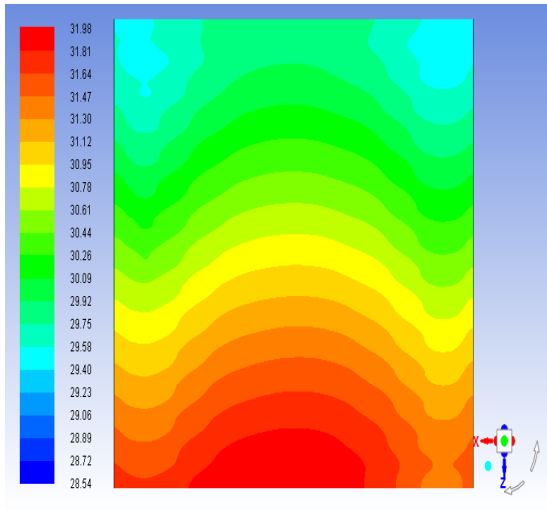
Ta=40°C



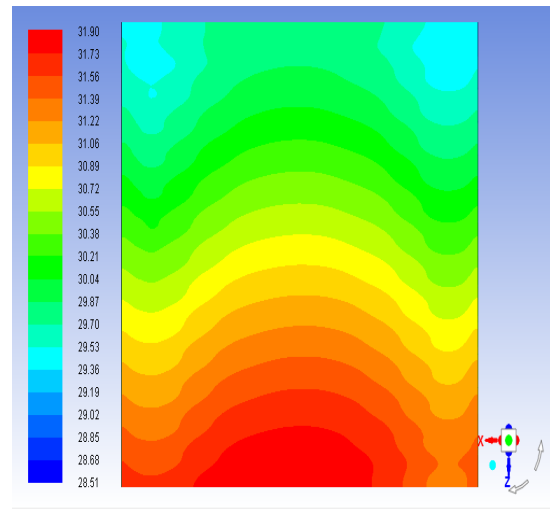
Ta=35°C

Figure IV.7 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.050$ kg/s et $R_G=600w/m^2$

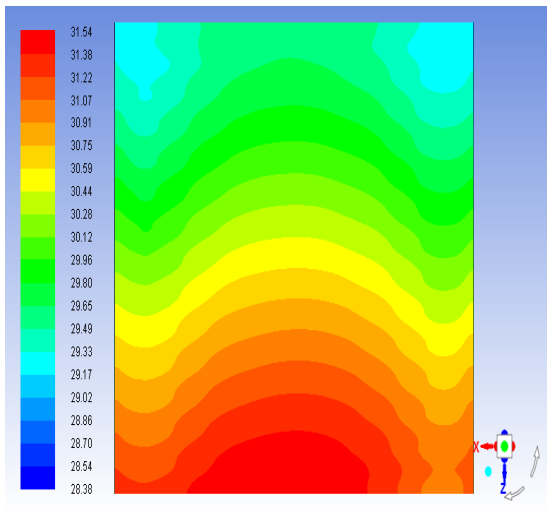
◆ $\dot{m} = 0.100 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}, R_G = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$



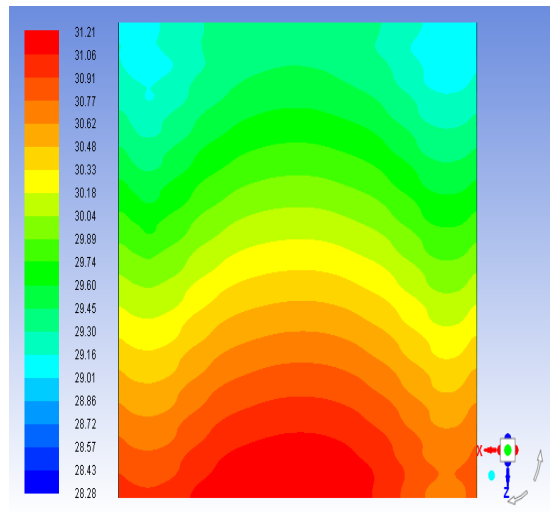
Ta=50°C



Ta=45°C



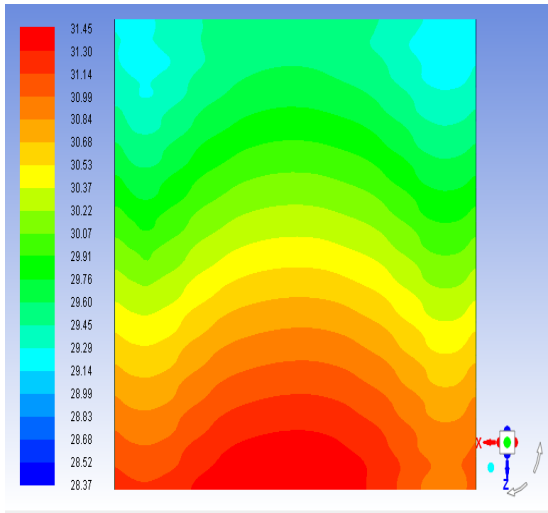
Ta=40°C



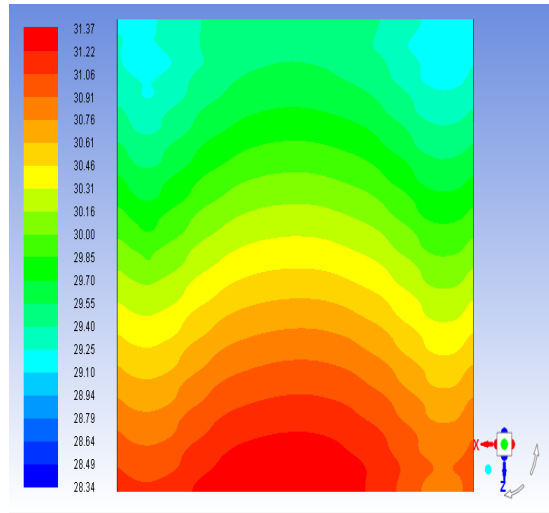
Ta=35°C

Figure IV.8: Contours des températures pour $\dot{m}=0.100 \text{ kg/s}$ et $R_G=1000 \text{ w/m}^2$

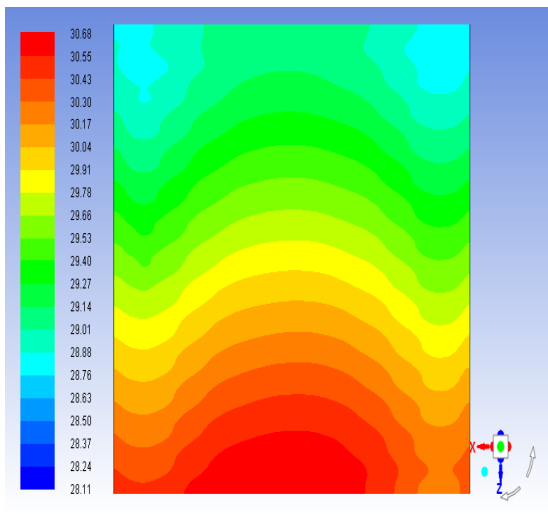
◆ $R_G = 800W.m^{-2}$



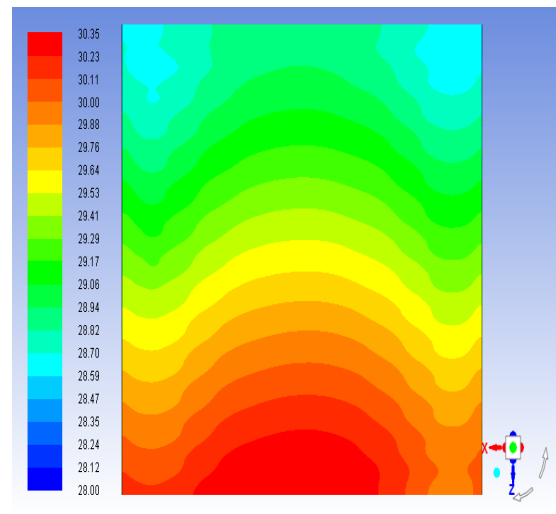
Ta=50°C



Ta=45°C



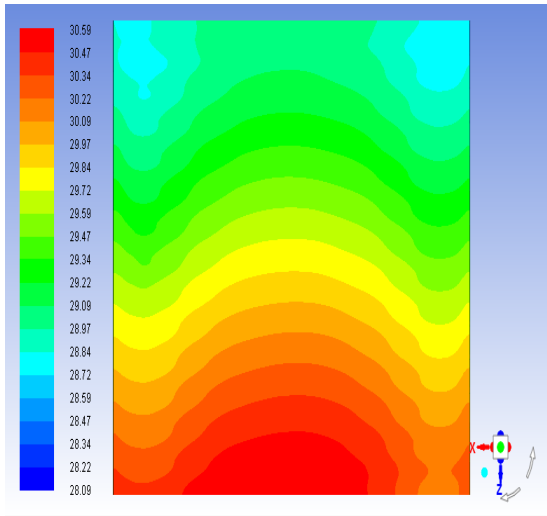
Ta=40°C



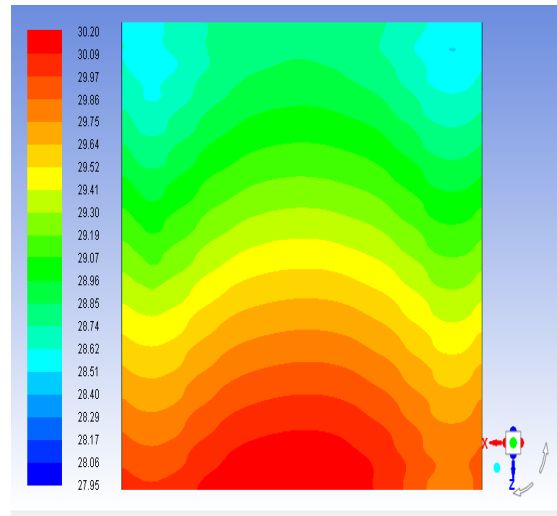
Ta=35°C

Figure IV.9: Contours des températures pour $\dot{m}=0.100$ kg/s et $R_G=800w/m^2$

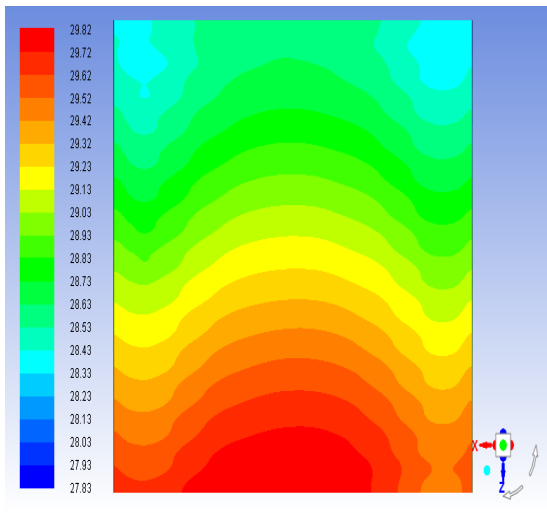
◆ $R_G = 600W.m^{-2}$



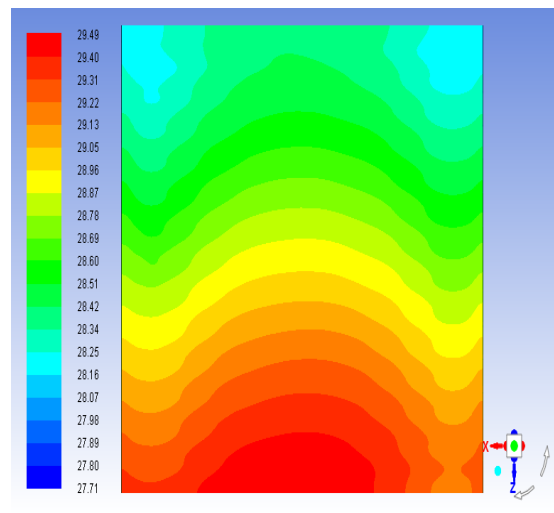
Ta=50°



Ta=45°C



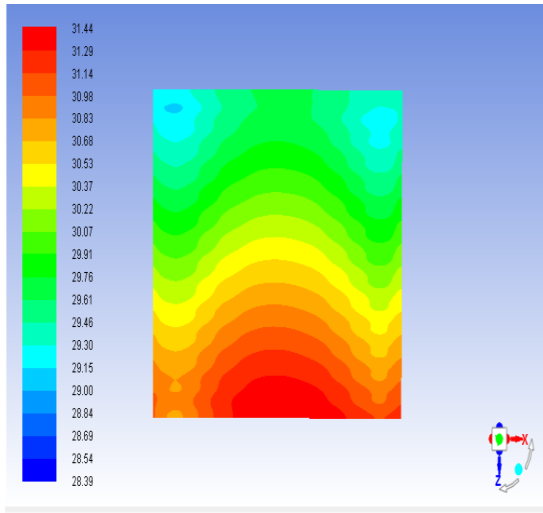
Ta=40°C



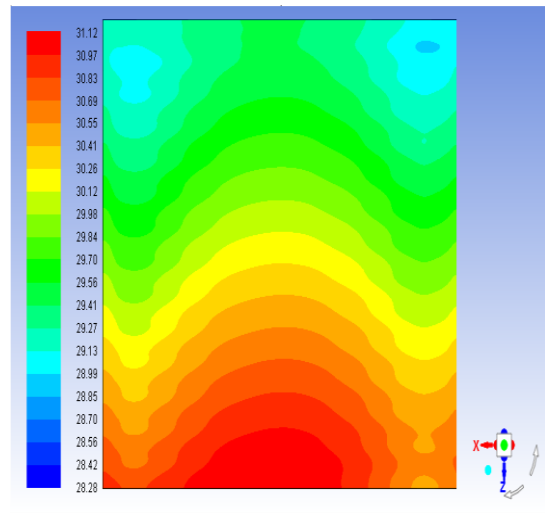
Ta=35°C

Figure IV.10 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.100$ kg/s et $R_G=600w/m^2$

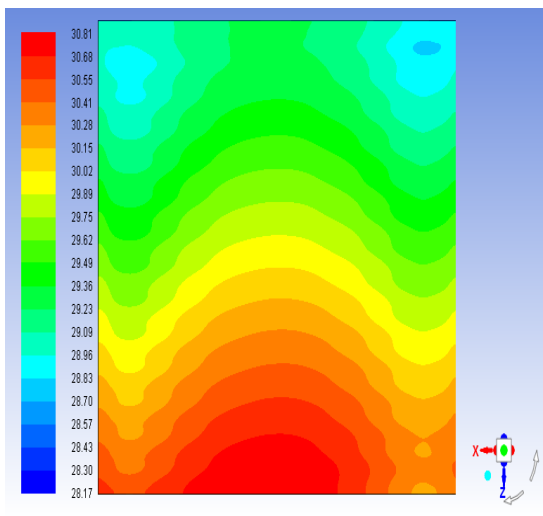
◆ $\dot{m} = 0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $R_G = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$



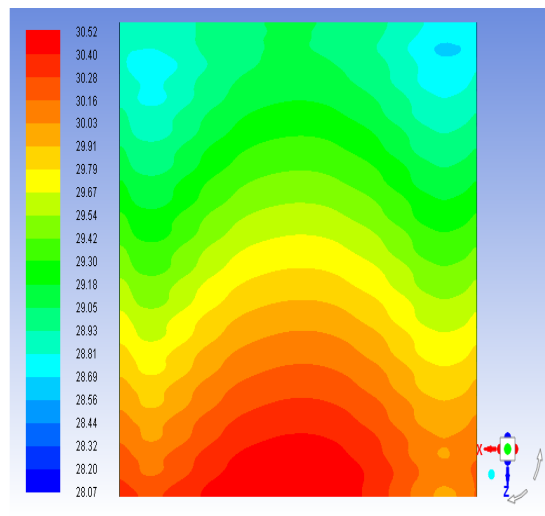
Ta=50°C



Ta=45°C



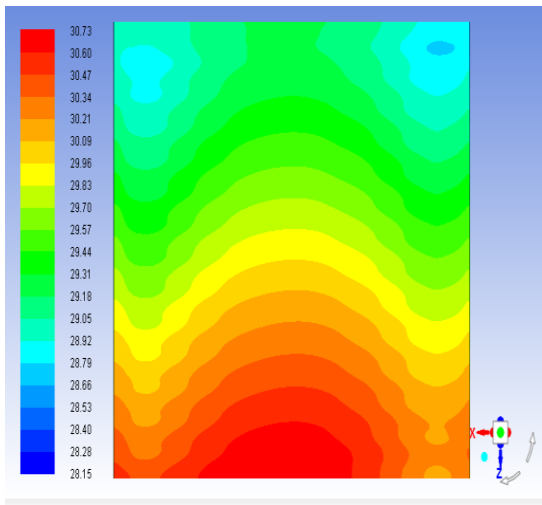
Ta=40°C



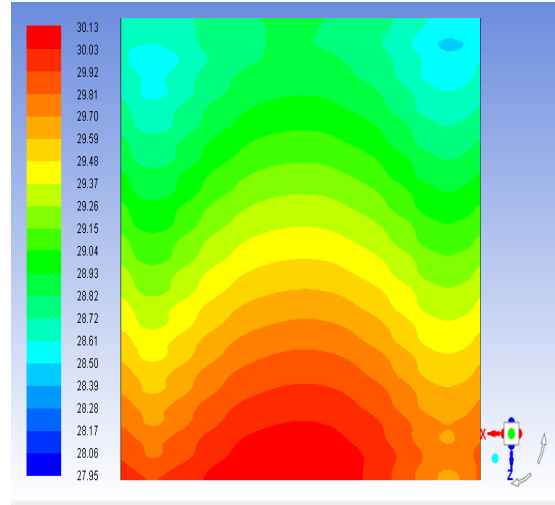
Ta=35°C

FigureIV.11 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.125\text{kg/s}$ et $R_G=1000\text{w/m}^2$

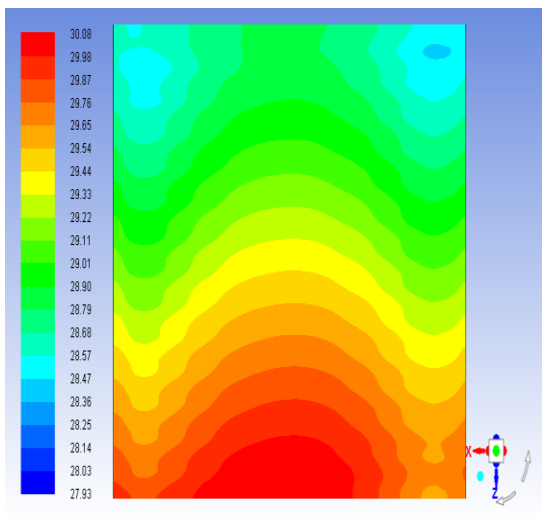
◆ $R_G = 800W.m^{-2}$



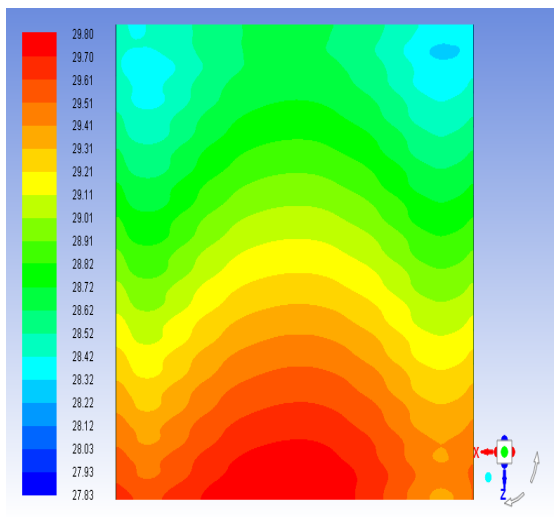
Ta=50°C



Ta=45°C



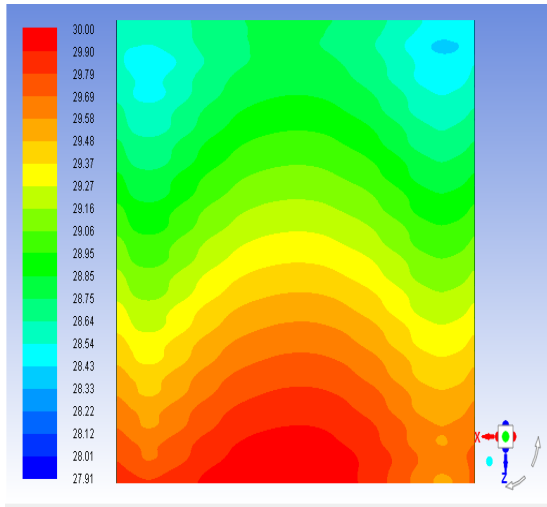
Ta=40°



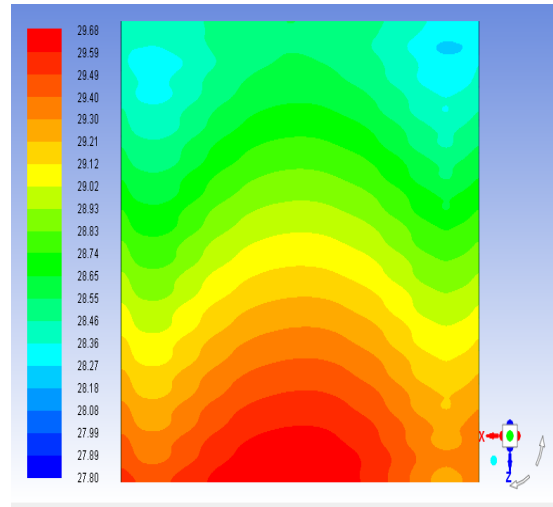
Ta=35°C

Figure IV.12 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.125$ kg/s et $R_G=800w/m^2$

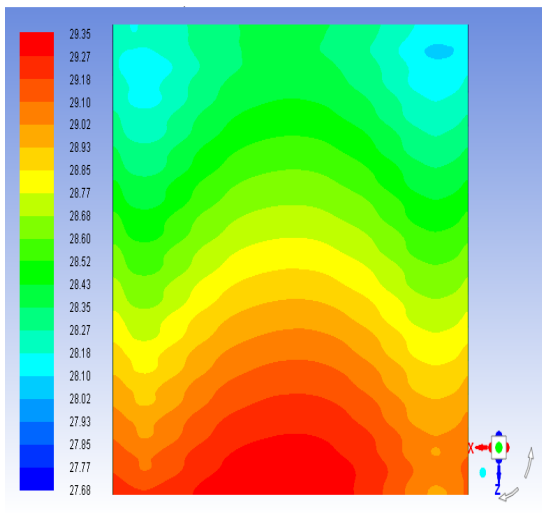
◆ $R_G = 600W.m^{-2}$



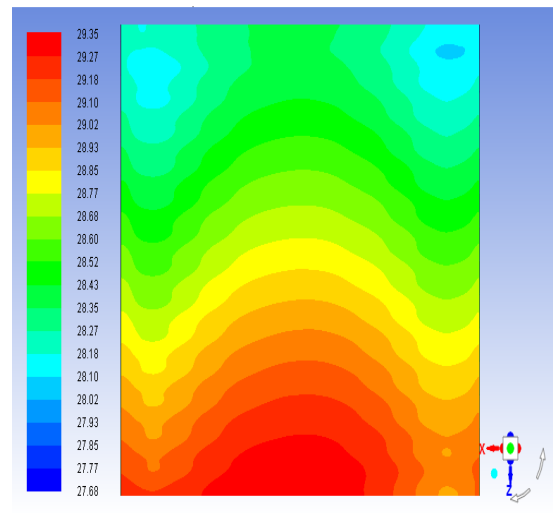
Ta=50°C



Ta=45°C



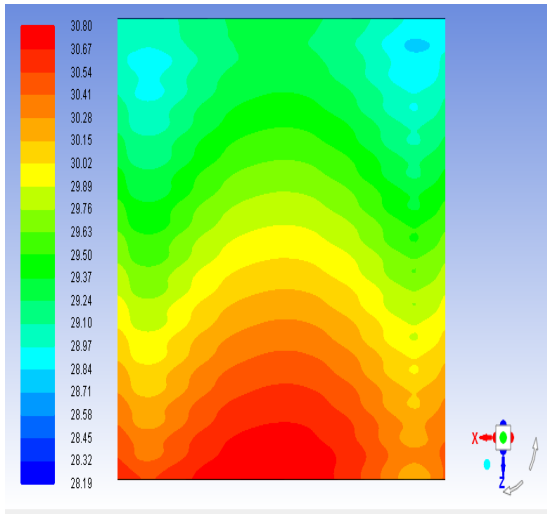
Ta=40°C



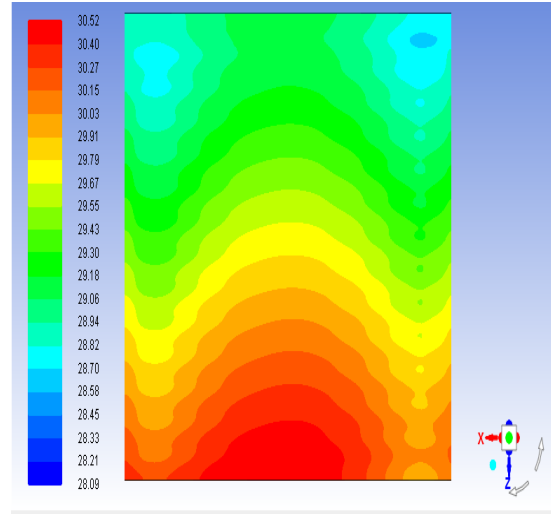
Ta=35°C

Figure IV.13 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.125$ kg/s et $R_G=600w/m^2$

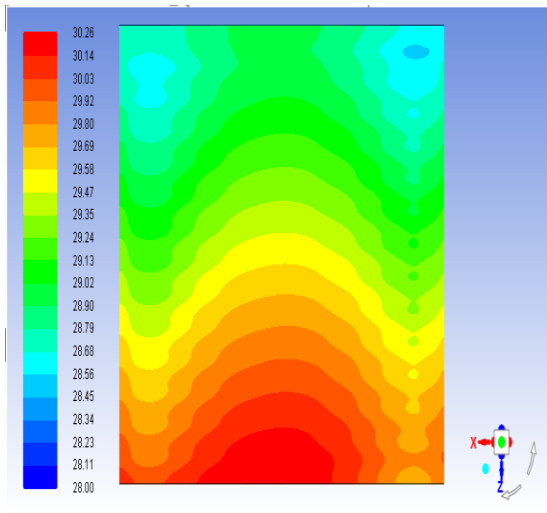
◆ $\dot{m} = 0.150 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}, R_G = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$



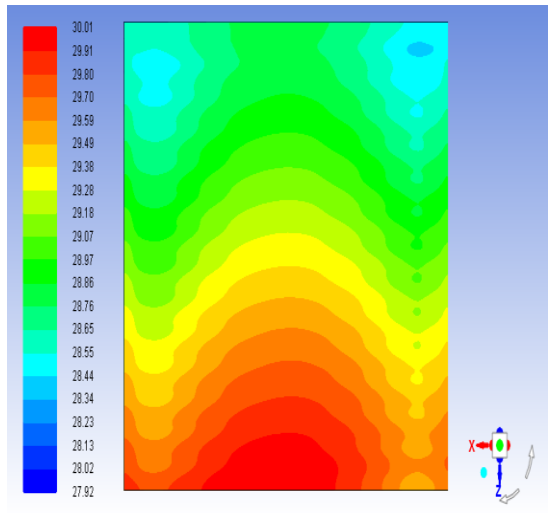
Ta=50°C



Ta=45°C



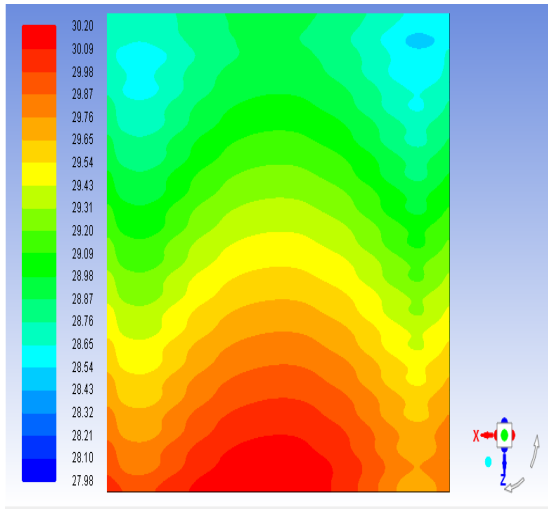
Ta=40°C



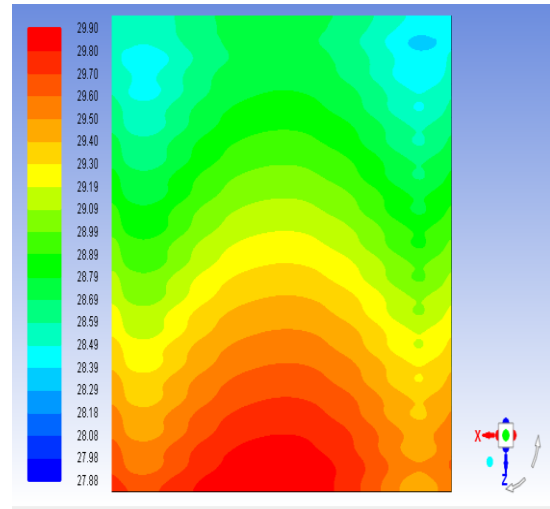
Ta=35°C

Figure IV.14 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.150 \text{ kg/s}$ et $R_G=1000 \text{ w/m}^2$

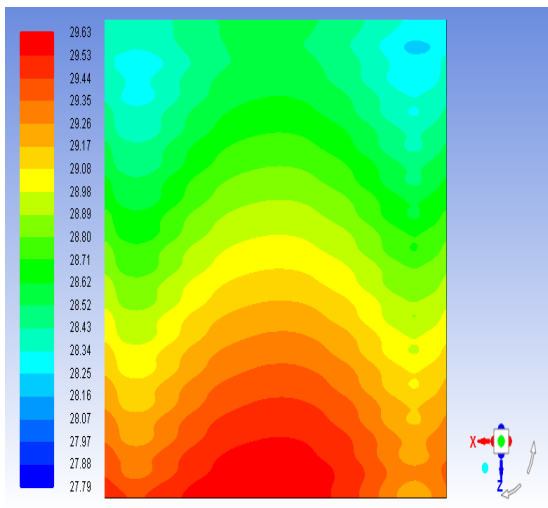
◆ $R_G = 800W.m^{-2}$



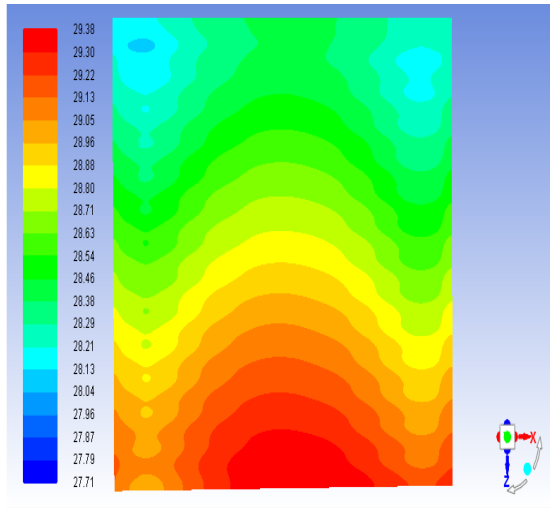
Ta=50°C



Ta=45°C



Ta=40°C



Ta=35°C

Figure IV.15 : Contours des températures pour $\dot{m}=0.150$ kg/s et $R_G=800w/m^2$

◆ $R_G = 600W.m^{-2}$

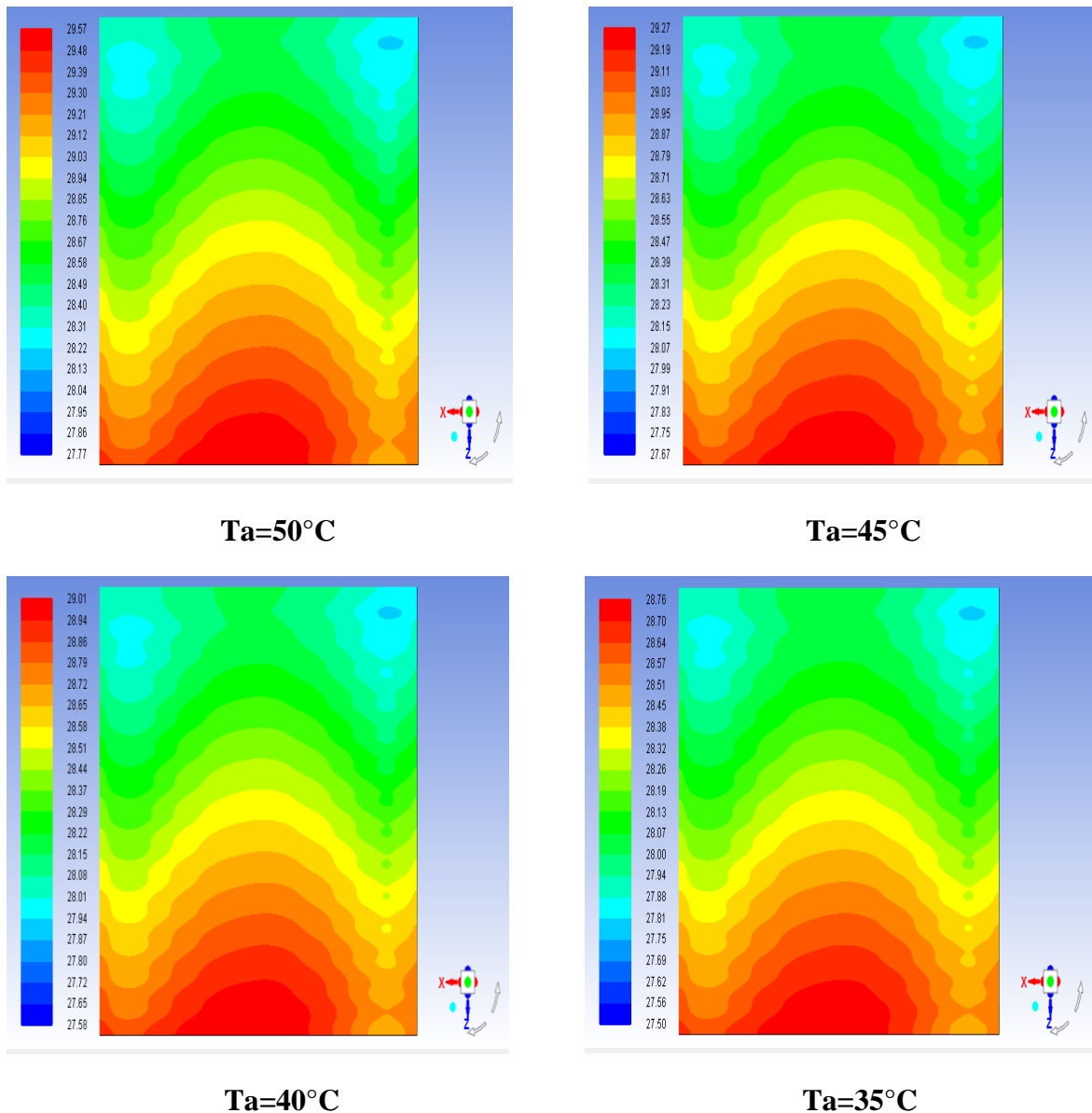


Figure IV.16: Contours des températures pour $\dot{m}=0.150$ kg/s et $R_G=600w/m^2$

Comme prévu dans les figures précédentes, la température de la face supérieure du panneau décroît avec la diminution du débit d'eau, en effet nous constatons que le débit d'eau est un paramètre qui affecte la température du panneau.

Les figures (VI.17), (VI.18) et (IV.19) compare les températures du panneau refroidi et non refroidi en faisant varier la température de l'air ambiant et du rayonnement solaire pour des différents débits, comme nous le voyons une chute de température notable lors du refroidissement.

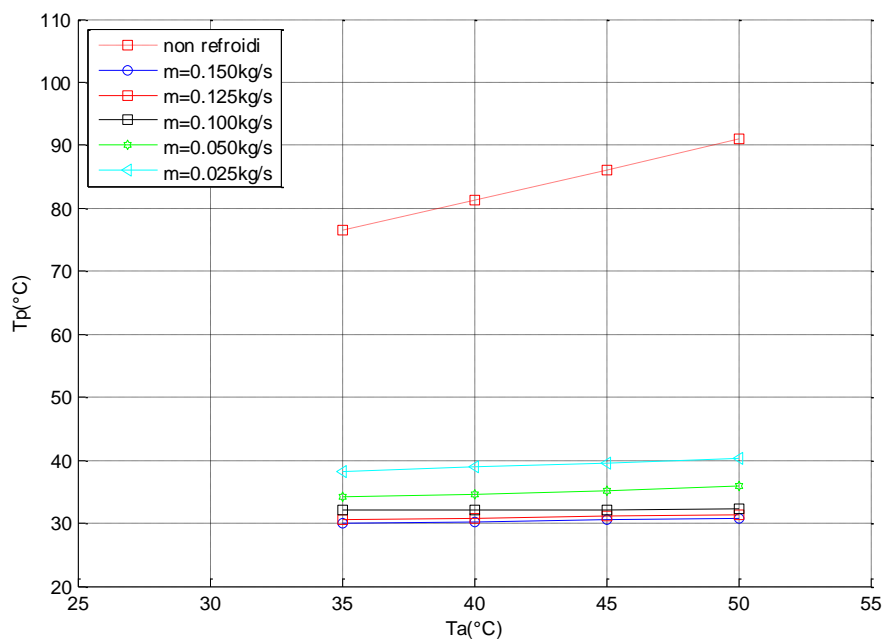


Figure IV.17 : évolution la température du panneau refroidi et non refroidi pour des débits donnés sous un éclairement $R_G = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

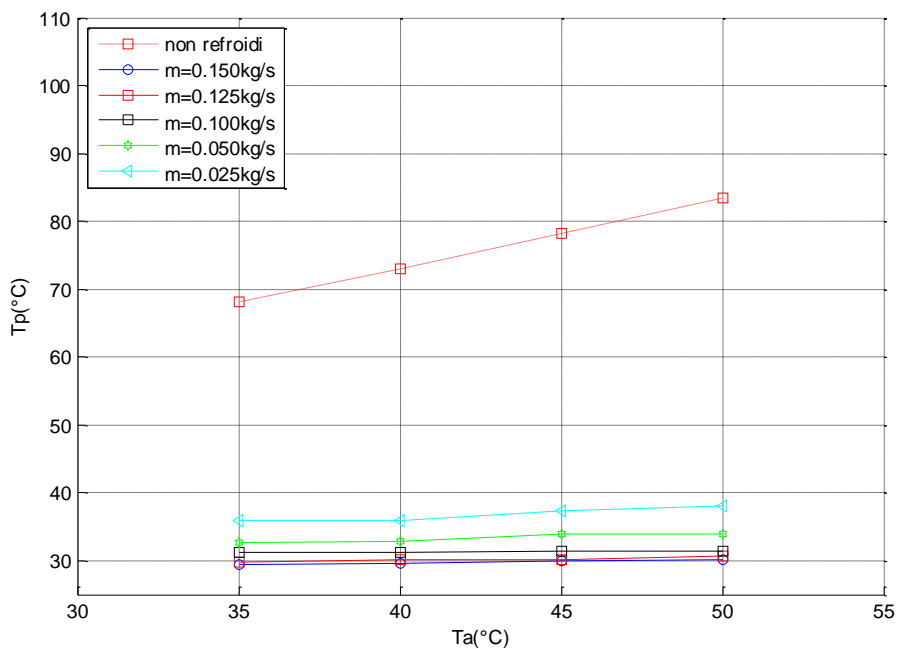


Figure IV.18: évolution la température du panneau refroidi et non refroidi pour des débits donnés sous un éclairement $R_G = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

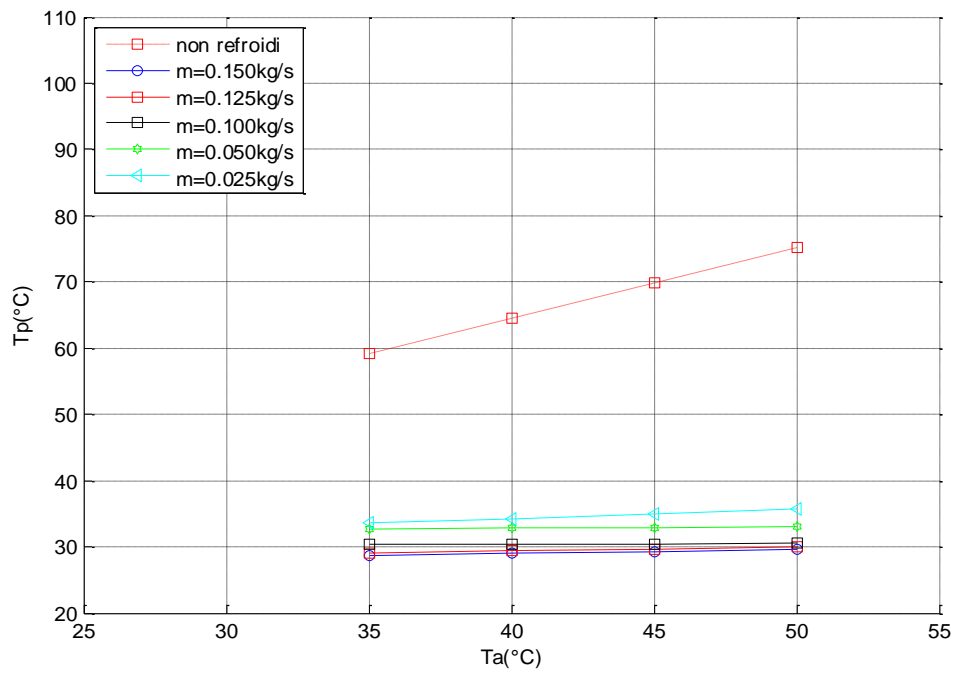


Figure IV.19 : évolution la température du panneau refroidi et non refroidi pour des débits donnés sous un éclairnement $R_G = 600W.m^{-2}$

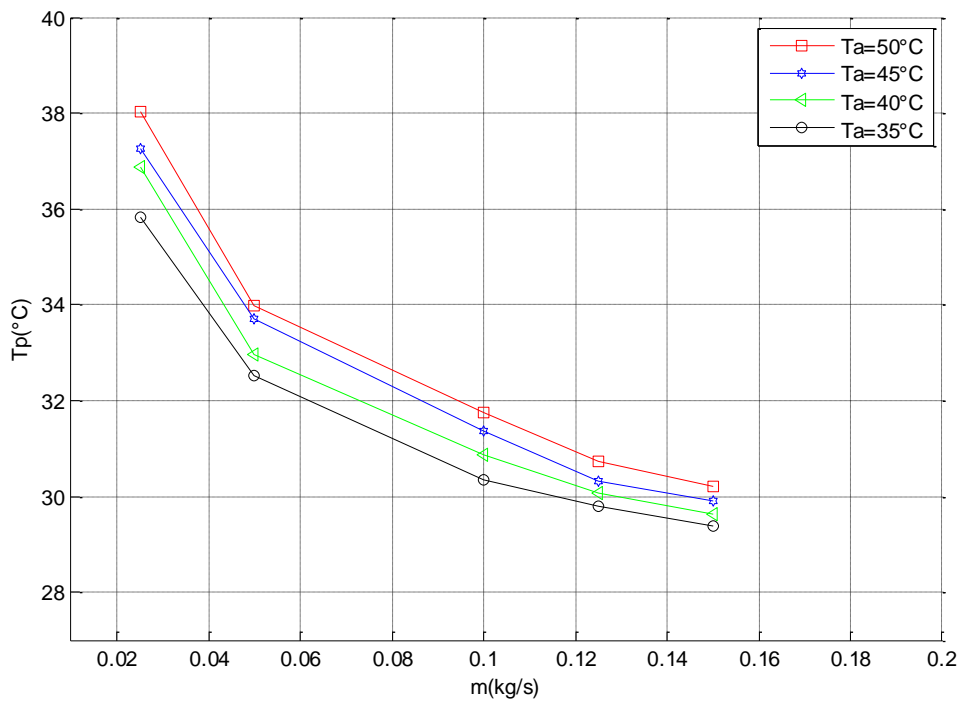


Figure IV.20 : la variation de la température du panneau refroidi en fonction du débit de l'eau

Comme il est mentionné précédemment que, la température du panneau affecte le fonctionnement d'un module photovoltaïque, on a vu dans cette partie les paramètres qui ont d'influence sur cette température à savoir la quantité du débit d'eau du refroidissement, la température de l'air ambiant et le rayonnement solaire.

3. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats de simulation tels que les résidus et la répartition du champ des températures, par la suite on a fait une comparaison des températures du panneau refroidi et non refroidi avec les mêmes paramètres du fonctionnement. Cette étude comparative confirme la validité la technique de refroidissement étudiée.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de faire une étude du refroidissement par eau d'un panneau solaire photovoltaïque. Comme bien connu, la température de la cellule photovoltaïque est l'un des paramètres importants influençant le rendement électrique du panneau.

Pour pallier ce dysfonctionnement, on se propose de refroidir ce panneau avec de l'eau. On fait circuler de l'eau dans une cavité située au côté inférieur du panneau à travers un circuit délimité par des chicanes.

L'étude de l'influence du débit d'eau, de l'intensité du rayonnement et de la température de l'air ambiant est alors effectuée.

Les résultats obtenus montrent que pour un débit d'eau de 0.025kg/s, la température du panneau PV est maintenue entre 40°C et 30°C sous un rayonnement de 1000W/m² et une température de l'air ambiant de 50°C.

La diminution du rayonnement à 800W/m² pour les mêmes paramètres que précédemment, la température du panneau photovoltaïque est maintenue entre 29°C et 38°C. Et, sous un rayonnement de 600W/m², la température est entre 29°C et 35°C.

En augmentant le débit d'eau dans un autre cas à 0.5kg/s, la température du panneau sous un rayonnement 1000W/m² est maintenue entre 29°C et 34°C et entre 28°C et 33°C sous un rayonnement de 800W/m² et entre 28°C et 32°C sous un rayonnement de 600W/m², avec une température de l'air ambiant de 50°C.

Pour un débit de 0.1kg/s les températures du panneau PV sont maintenues respectivement sous des rayonnements de 1000W/m², 800W/m² et 600W/m² entre 31.98°C et 28°C, entre 31.45°C et 28°C et entre 30°C et 28°C.

Pour un débit de 0.125 Kg/s les températures sont maintenues entre 28°C et 31°C, entre 28°C et 30°C et entre 27°C et 30°C.

Finalement, la température du panneau PV pour un débit de 0.150 Kg/s est maintenue entre 27°C et 30°C sous un rayonnement de 1000W/m², pour un rayonnement égal à 800W/m² et à 600W/m² la température est entre et entre 27°C et 29°C.

Bien que cette technique de refroidissement permette le maintien de la température du panneau PV à des niveaux acceptables, il serait intéressant de la comparer à d'autres techniques développées dans la littérature.

Par ailleurs, on se doit d'intégrer la consommation électrique de la pompe à eau pour pouvoir quantifier l'amélioration effective produite par ce système de refroidissement par eau.

Références bibliographiques

- [1] Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] Z. Sen. Solar Energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [3] <https://media4.obsmp.fr> So-noyau 05.09.2018 à 9 :00PM.
- [4] J. M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [5] PIERRE HENRI 2002 « héliothermique le gisement solaire méthodes et calculs », éditions du GRE. Imprimerie de L'UPS.
- [6] M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [7] Mohamed Ansoumane Camara. Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs. Autre. Université Paris-Est, 2011.
- [8] « BEN GUEHZA M.L MEMOIRE de MAGISTER thème impact de l'espace entre les deux vitrages sur le rendement d'un capteur solaire Soutenu le : 24 - 2 – 2009 ».
- [9] université paris-sud école doctorale : STITS Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP) discipline physique thèse de DOCTORAT Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies.
- [10] KALOGIROU S. A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, vol. 30, n°3, pp.213-295.
- [11] article CYTHELIA *Sarl* European Master in Renewable Energy. Les convertisseurs photovoltaïques Alain Ricaud, Valbonne, Oct. 2012.
- [12] http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV_Fab_Envnt_final_26082009.pdf
- [13] <https://www.comwatt.com.blogspot.com/cellulesphotovoltaiquetecnologies.html> 31-10-2018.
- [14] A.Labouret, M.Villoz, Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel), édition DUNOD, août2003, Paris(France).
- [15] Lalouni Sofia, Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique, Thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009
- [16] Transfert de chaleur par rayonnement, Chevrier J- C. Ecole des Mines, Nancy, 1979.
- [17] Adrian Bejan. "Convection heat transfer". 3eme édition, édition John Wiley et Song, INC, Vol 2 p.p. 149-155,2009.
- [18] e. Karima amori, m. Hussein, taqi al-najjar, analysis of thermal and electrical performance of a hybrid (PV/t) air based solar collector for iraq, applied energy, vol. 98, (2012) pp. 384–395.
- [19] FLUENT 6.2 documentation User's Guide. Fluant.Inc, 2001.

