



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

El Bagor Khawla & Graine Manal

Thème

TRANSFERT DE CHALEUR DE L'ECOULEMENT D'UN NANOFLUIDE DANS LE TUBE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE HYBRIDE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
M ^r BOUAOUINA Lalouani	MCB	Président
M ^{me} BENKHERBACHE Souad	MCA	Encadreur
M ^{me} BECHANE Leila	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2020

Remerciements

Louange à Allah par la grâce du qui les bonnes choses se réalisent. Nous tenons à remercier tout d'abord nos très chers parents. Nous remercions notre encadreur à Madame Benkherbache Souad pour la qualité du sujet, son support et les orientations durant toute la réalisation de ce travail. Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

*Avant tout, je tien à remercier le bon dieu,
et l'unique qui ma offert le
courage et la volonté nécessaire pour affronter*

*Les différents moments de la vie,
Je dédie ce modeste travail A ma mère.*

A mon père.

A mon mari k. Imad

A mes frères et mes sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis

A mes amis et mes collègues de la promotion 2021

« Energétique ».

Graine Manal

Dédicaces

*Avant tout, je tien à remercier le bon dieu,
et l'unique qui ma offert le
courage et la volonté nécessaire pour affronter
les différents moments de la vie,*

Je dédie ce modeste travail

A ma mère Rougaya.

A mon père Moussa.

A mon mari M. Djamel

A mes frères :Ahmed, Lombarek,Saleh

et mes sœurs :Nora, Dawya,Dalila,Mbarka, Ahlam,hafida

A toute ma famille.

A tout mes amis

A mes amis et mes collègues de la promotion 2021

« Energétique ».

Elbagor Khawla

SOMMAIRE

Nomenclature.....vi
Liste des figures.....ix
Liste des tableaux.....xii
Introduction Générale.....1

CHAPITRE I: Recherche Bibliographique

I .1. Généralité sur les énergies renouvelables..... 3
I.1.1. Introduction.....3
I .1.2. Énergies renouvelables..... 3
I.1.3. Les types des énergies renouvelables..... 3
I .2. L'énergie solaire.....4
A .L'énergie solaire passive.....5
B .L'énergie solaire active5
C .L'énergie photovoltaïque6
I .3. Le gisement solaire.....6
I.3.1. Gisement solaire au sol7
I.3.2. Le gisement solaire en Algérie8
I .4. Conversion thermique.....8
I .5. Conversion photovoltaïques9
I .5.1. Définition 9
I .5.2. La cellule photovoltaïque(PV)9
I .5.3. Les différents types des cellules photovoltaïques.....11
1. Les cellules en silicium cristallin.....11
2. Les cellules en couches minces.....12
3. Les cellules à concentration..... 13
4. Les cellules organiques.....13
I .6. Les panneaux solaires..... 13
I .6.1 . Le panneau photovoltaïque14
I .6.1 .1. Constitution.....14
I .6.2. Le système photovoltaïque15
I .6.3 . Les avantages et inconvénients du système photovoltaïque16

SOMMAIRE

I.7. Capteurs solaires thermiques.....	17
I.7.1. Présentation.....	17
I.7.2. Les différents types des capteurs thermiques.....	17
A. Capteur solaire plan.....	17
B. Capteur solaire parabolique composé.....	18
C. Capteur solaire à tube sous vide	18
I.7.3. Les principaux composants d'un capteur solaire plan.....	19
I.7.4. Mode de fonctionnement des capteurs solaires plan.....	22
I.8. Méthode de refroidissement des panneaux solaires.....	24
I.9. Les capteurs solaires hybrides photovoltaïque thermique PV/T.....	25
I.10. La Classification des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques.....	25
I.11. Transfert par conduction	28
I.12. Transfert par convection.....	29
I.13. Transfert par rayonnement	30
I.14. Les nombres sans dimensions.....	31
I.14.1. Nombre de Reynolds	31
I.14.2. Nombre de Nusselt.....	32
I.14.3. Nombre de Grashof	32
I.14.4. Nombre de Rayleigh Ra.....	33
I.15. Conclusion	33

CHAPITRE II : Les Nanofluides.

II.1. Généralités sur les nano fluides	34
II.1. Introduction	34
II.2. Les nano fluides.....	34
II.3. Préparation des nano fluides.....	35
A- La méthode en deux étapes	35
B- La méthode en une seule étape.....	36
II.4. Autres applications.....	37
II.5. Les avantages des nano fluides.....	37
II.6. Les inconvénients des nano fluides.....	37
II.7. Domaines d'application des nano fluides.....	38

II.8. Propriétés thermo physiques des nano fluides	38
II.8.1. la fraction volumique.....	38
II.8.2. Conductivité thermique.....	39
II.8.3. viscosité dynamique	40
II.8.4. La masse volumique.....	41
II.8.5. La chaleur massique.....	42
II.8.6. Coefficient d'expansion volumique.....	42

CHAPITRE III :Formulation Mathématique et Simulation Numérique

III.1. Introduction.....	43
III.2. Géométrie du problème.....	43
III.3. Hypothèses.....	45
III.4. Equations générales de conservation.....	45
II-4.1. Equation représentatives pour le nano fluide	46
III.5. Le couplage convection-rayonnement.....	48
III.5.1. Modèle de transfert radiatif de Rosseland.....	48
III.5.2. Equation de modèle Rosseland.....	48
III.6. Bilan thermique du capteur hybride PV/T à base.....	49
III. 7 .Les coefficients des échanges thermiques	51
III.8. Procédure de résolution numérique.....	54
III.9. Définition de la CFD « Computational Fluid Dynamics ».....	54
III.10. Présentation des logiciels Gambit et Fluent.....	54
III.10.1. Préprocesseur Gambit.....	54
III.10.2. Code Fluent.....	54
III.10.3. Les avantages de fluent (CFD).....	55
III.11. Etapes principales de simulation.....	55
III.12. La conception du domaine physique:.....	56
III.12.1 Création de la géométrie.....	56
III.12.2. Création d'une face rectangulaire.....	56
III.12.3. Création des faces circulaires.....	56
III.12.4. Création des volumes.....	57
III .12.5. Création d'un trou dans une ailette circulaire.....	58

SOMMAIRE

III.12.6. Le maillage du domaine physique.....	59
III.12.6.1. Maillage des lignes (edges.....)	59
III.12.6.2 Maillage des volumes.....	59
III.12.7. Condition aux limites.....	60
III.12.8. Choix de la version Fluent.....	61
III.12.9. L'exportation du fichier.....	61
III.12.10. Types des fichiers qui sont créés par gambit.....	62
III.13. La procédure de calcul par Fluent:	62
III.13.1. Démarrage de Fluent.....	62
III.13.2. Lire le fichier dissipateur.msh.....	63
III.13.3. Vérification du maillage.....	63
III.13.4. Lissage du maillage.....	63
III.13.5. Vérifier l'échelle.....	64
III.13.6. Présentation de la géométrie.....	64
III.13.7. Choix du solveur.....	65
III.13.8. Autorisation du transfert de chaleur.....	66
III.13.9. Choix du type d'écoulement.....	66
III.13.10 Choix du modèle de rayonnement.....	67
III.13.11 Définir la position pour le calcul solaire.....	67
III.13.12. Définir les propriétés des matériaux.....	67
III.13.13. Définir les conditions aux limites.....	68
III.13.14. Les facteurs de sous- relaxation.....	69
III.13.15. Initialisation du calcul	70
III.13.16. Choix du résidu.....	70
III.13.17. Critère de convergence.....	71
III.13.18. Calcul.....	71
III.13.19. Visualisation des résultants	74
III.13.20. Sauvegarde de fichier.....	74
III.14. Conclusion.....	74

CHAPITRE IV: Résultats et discussions

SOMMAIRE

IV.1.Introduction	75
IV.2. Le paramètre utilisé.....	75
IV.2.1Variation des propriétés thermo physique du fluide de base l'eau avec les différentes nanoparticules.....	76
IV.3. Influence du maillage	77
IV.4. Influence du nombre de Reynolds.....	79
IV.5. Les Contours de température.....	79
IV.6. Influence de la concentration du nano fluide.....	84
IV.7.Calcul des nombres adimensionnels.....	87
IV.7.1 Le nano fluide (eau/Cu).....	87
IV.7.2 Le nano fluide (eau/TiO ₂).....	88
IV.8. Le nombre de Nusselt Nu.....	88
Conclusion Générale	90
Références	91

Nomenclature

C_p : la chaleurmassique(J.kg-1.K-1).

g :Accélération de la pesanteur (m.s-2).

Gr :Nombre de Grashof.

h : le coefficient d'échange par convection (W.m-2.K-1).

K : La conductivité thermique (W.m-1.K-1).

L : Longueur de cavité (m)..

l :Le long de la source de chaleur (m).

m :La masse (Kg).

Q :flux de chaleur exprimée en (W).

A :Aire de la section perpendiculaire au flux de chaleur, exprimée en (m2).

k : Conductivité thermique du solide exprimée en (W/mk).

Q : la chaleur transmis par rayonnement.

E_p :Facteur d'émissivité du corps.

σ : Constante de Stephan- Boltzman. $\sigma= 5.66 \cdot 10^{-8}$ en J/s m²k⁴.

T : Température du corps en kelvin.

Nu : Nombre de Nusselt local sur la surface de la source de chaleur.

p :pression du fluide (Pa).

p :Pressionadimensionnelle.

V :La vitesse moyenne [m/s].

k_f : conductivite thermique du fluideW/mK.

D_h : le diamètre hydraulique du tube intren.

T_s :La température de la paroi.

T_∞ : La température du fluide loin de la paroi.

ν : La viscosité cinématique $=\frac{\mu}{\rho}$ [m²S⁻¹].

α :La diffusivité thermique $=\frac{K}{\rho c}$ [m²s⁻¹].

k_{nf} : La conductivité thermique du nanofluide.

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nanofluide.

ρ_{nf} :La masse volumique du nanofluide.

β_{nf} :Le coefficient de dilatabilité du nanofluide.

M_v : Masse du vitrage, (kg).

Nomenclature

C_{pv} : Chaleur spécifique du vitrage, (J/kg .K).

A_v : Surface de la vitre, (m²).

P_v : Quantité d'énergie absorbée pour le vitrage, (W/m²).

h_{vv} : Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'ambiance, (W/m².K).

h_{rv} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel,

(W/m².K). h_{pvcv} : Coefficient d'échange thermique par conduction entre la vitre et la Pvc, (W/m².K)

T_a : Température ambiante (K).

T_{Pvc} : Température de la Pvc, (K).

T_{ciel} : Température du ciel (K).

α_v : Représente le coefficient d'absorption du vitrage

M_{Pvc} : Masse de la pvc, (kg)

Cp_{Pvc} : Chaleur spécifique de la Pvc, (J/ kg.K)

A_{Pvc} : Surface de la Pvc, (m²)

h_{cPvc} : Coefficient d'échange thermique par conduction entre la Pvc et l'absorbeur, (W/m².K)

T_{abs} : Température de l'absorbeur, (K)

M_{abs} : Masse de l'absorbeur, (kg)

Cp_{abs} : Chaleur spécifique du absorbeur, (J/ kg.K)

A_{abs} : Surface de l'absorbeur, (m²)

h_{vabs} : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'absorbeur et le fluide, (W/m².K)

h_{rabs} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et l'isolant, (W/m².K)

M_f : Masse du fluide, (kg)

Cp_{eau} : Chaleur spécifique du fluide, (J/ kg.K)

A_f : Surface traversée par le fluide, (m²)

m : Débit massique de l'eau, (kg/s).

e : Epaisseur de la paroi, (m)

K : Conductivité thermique du matériau, (W /m.K)

σ : Constante de Stephan Boltzmann, $= 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

ε_v : Emissivité du vitrage

Ra : Nombre de Rayleigh

Nomenclature

R_e : Nombre de Reynolds

T : la température ($^{\circ}\text{C}$) ou (K)

u, v : Composantes de la vitesse dans les directions x, y ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

U, V : Composantes de la vitesse adimensionnelle

V : Le volume (m^3)

x, y : Les coordonnées cartésiennes

X, Y Les coordonnées adimensionnelles

Symbole Grecque :

α : La diffusivité thermique ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

β : Coefficient d'expansion thermique (K^{-1})

ΔT La différence de température

φ La fraction volumique

θ Température adimensionnelle

μ La viscosité dynamique ($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)

ν La viscosité cinématique ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

ρ La densité ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Indice :

c : Chaude.

f : Froid.

f : Fluide de base.

nf : Nanofluide.

s : Particules solide.

Liste Des Figures

Figure I.1: Les différents types des énergies renouvelables [1].....	04
Figure I.2 : L'exploitation de l'énergie solaire [3].....	05
Figure I.3 : Exemple d'énergie solaire photovoltaïque [4].....	06
Figure I.4 : Irradiation globale (W/m^2) au sol.....	07
Figure I.5 : Disque Solaire.....	07
Figure I.6 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	08
Figure I.7 : Le schéma sur l'effet photovoltaïque [11].....	10
Figure I.8 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I.9 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure I.10: La cellule en silicium cristallin.....	12
Figure I.11 : La cellule en couches minces.....	13
Figure I.12 : Les différents types des cellules.....	13
Figure I.13 : La cellule au champ photo voltaïque [15].....	15
Figure I.14 : Exemple de la structure d'un système PV connecte au réseau.....	16
Figure I.15 : Capteur solaire thermique [18].....	17
Figure I.16 : Capteur solaire plan [18].....	18
Figure I.17 : Capteur solaire parabolique.....	18
Figure I.18: Capteur solaire à tube sous vide.....	19
Figure I.19: Les composants principaux d'un capteur solaire plan [18].....	20
Figure I.20: Capteurs solaires thermique à air [18].....	20
Figure I.21 : Capteurs solaires thermique à eau [18].....	21
Figure I.22 : Schéma Principe de fonctionnement.	23
Figure I.23 : Panneaux solaires photovoltaïques.....	24
Figure. I.24: Les capteurs solaires hybride PV/T à a eau [25].....	25
Figure I.25 : Coupe transversal du capteur solaire PV/T hybride à eau [26].....	26.
Figure I.26: Les capteurs solaires hybride PV/T à air [28].....	27
Figure I.27: Les capteurs solaires hybride PV/T à Nano fluide [29].....	27
Figure I.28 : Schéma de transfert de chaleur conduction loi de Fourier [30].....	28
Figure I.29. Schéma de transfert de chaleur conductivité [30].....	29
Figure I.30 : Schéma de transfert de chaleur convectif [31].....	30

Figure I.31 : Rayonnement absorbé par un volume [30].....	31
Figure II.1 : Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau +nanotube ; eau + alumine ; eau + or à 2n.....	35
FigureII.2 : Procèdes de synthèse des nanofluides en une seule étape [34].....	36
Figure III.1 : Photo du panneau PV et ces éléments.....	44
Figure III.2 : Vue de dessus du panneau PV (a), la géométrie étudiée (section z-z).....	44
Figure. III.3 : vue globale de Gambit.....	56
Figure. III.4 : Création d'une face rectangulaire.....	56
Figure. III.5 : Création des faces circulaires.....	57
Figure. III.6 : Création des volumes.....	58
Figure. III.7 : Création d'un cylindre dans l'axe z positive.....	58
Figure. III.8 : Soustraction des volumes.....	59
Figure. III.9 : Maillage des lignes (edges).....	59
Figure.III.10 : Maillage des volumes.....	60
Figure. III.11 : Conditions aux limites.....	61
Figure. III.12 : Vue globale de Fluent.....	62
Figure. III.13 : Importation de la géométrie.....	63
Figure. III.14 : vérifier la qualité de maillage.....	64
Figure. III.15 : vérification de l'échelle.....	64
Figure. III.16 : Affichage de la grille et vérification des conditions aux limites.....	65
Figure. III.17 : Choix de solveur.....	66
Figure. III.18 : Autorisation l'équation de l'énergie.....	66
Figure. III.19 : Choix du type d'écoulement.....	66
Figure. III.20 :Choix du modèle de rayonnement.....	67
Figure. III.21 :Calculs solaires.....	67
Figure. III.22 : Définir les propriétés physiques des matériaux.....	68
Figure. III.23 : Choix de la pression de référence.....	68
Figure. III.24 : Valeurs des conditions aux limites.....	69
Figure.III.25 : Choix des facteurs de sous relaxation et les schémas de discrétisation.....	70
Figure. III.26 : Initialisation de la solution.....	70
Figure.III.27 : Choix des résidus.....	71
Figure. III. 28 : Choix des nombres des itérations.....	72

Figure. III.29 : Allure de l'évolution des résidus de calcul.....	72
Figure. III.30 : Calcul de la température moyenne.....	73
Figure. III.31 : Calcul de la densité du débit massique moyen.....	73
Figure. III. 32 : Calcul de la température de mélange.....	74
Figure IV.1 : Variation de la température en fonction du maillage.....	78
Figure IV.2: Maillage de la configuration	78
Figures IV.3: Champs de Températures pour Re=800 et le nanofluide (eau/Cu).....	80
Figures IV.4: Champs de Températures pour Re=1000 et le nanofluide (eau/Cu).....	81
Figures IV.5: Champs de Températures pour Re=1800 et le nanofluide (eau/Cu).....	81
Figures IV.6: Champs de Températures pour Re=800 et le nanofluide (eau/TiO ₂)	82
Figures IV.7: Champs de Températures pour Re=1000 et le nanofluide (eau/TiO ₂).....	83
Figures IV.8: Champs de Températures pour Re=1800 et le nanofluide (eau/TiO ₂)	83
Figure IV.9 : Variation du la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/Cu) Re=800.....	84
Figure IV.10: Variation du la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/Cu) Re=1000.....	84
Figure IV.11: Variation du la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/Cu) Re=1800.....	85
Figure IV.12: Variation du la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/TiO ₂) Re=800.....	85
Figure IV.13: Variation du la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/TiO ₂) Re=1800.....	86
Figure IV.14: Variation du la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/TiO ₂) Re=1000.....	86
Figure IV.15: Variation du nombre de Nusselt en fonction du concentration pour le nano fluide(eau/TiO ₂).....	89
Figure IV.16: Variation du nombre de Nusselt en fonction du concentration pour le nano fluide(eau/Cu).....	98

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Les facteurs de sous relaxation.....	72
Tableaux IV.1 : propriétés thermo physique du fluide de base et des particules solide.....	76
Tableaux IV.2. : propriétés thermo physique du nano fluide (eau/TiO ₂).....	76
Tableaux IV.3 :propriétés thermo physique du nano fluide (eau/Cu).....	76
Tableau IV.4 :Paramètres utilisés dans les simulations.....	77
Tableau IV.5 : variation de la température en fonction du maillage.....	78
Tableau IV.6 :Calcul des nombres adimensionnels pour l'eau =0.....	87
Tableau IV.7 :Calcul des nombres adimensionnels pour(l'eau/Cu) =0.02 .	87
Tableau IV.8 :Calcul des nombres adimensionnels pour(l'eau/Cu) =0.04.....	87
Tableau IV.9 :Calcule des nombres adimensionnels pour(l'eau/TiO ₂) =0.02.	88
Tableau IV.10 :Calcule des nombres adimensionnels pour(l'eau/TiO ₂) =0.04.	88

Introduction Générale

Un module photovoltaïque (PV) classique de technologie silicium cristallin convertit entre 12 et 18 % de l'énergie solaire incidente. Pour arriver à ce résultat, un module PV absorbe en réalité entre 80 et 90% du rayonnement incident, dont la majeure partie est dissipée sous forme de chaleur, augmentant ainsi la température interne du module.

Cette augmentation de la température réduit sensiblement les performances électriques du module. Partant du constat que le rendement du panneau photovoltaïque décroît avec l'augmentation de la température, et que la fonction d'un capteur solaire est de transférer la chaleur captée par sa surface à un fluide caloporteur, l'idée est née d'associer ces deux technologies et d'en faire un prototype hybride nommé PV/T, qui permet à la fois de convertir l'énergie solaire captée en électricité mais aussi de valoriser l'autre part, habituellement perdue, en chaleur.

Les énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets. Elles sont inépuisables et elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux.

Un capteur solaire est un élément essentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire, il capte le rayonnement solaire et le transforme sous forme de chaleur par effet de serre par des matériaux qui ont des grands coefficients d'absorption. Cette chaleur peut être utilisée dans le chauffage de l'eau sanitaire ou pour la climatisation des bâtiments. Il peut également transformer le rayonnement solaire en courant à l'aide de matériaux semi-conducteur appelés cellules solaires.

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

La recherche mondiale actuelle dans le solaire porte surtout sur l'optimisation des systèmes solaires en termes de performance et de rentabilité. Celle-ci est généralement effectuée par la voie expérimentale ou bien par la simulation numérique.

Etant donné qu'une partie large des études d'optimisation se fondent sur la modélisation du comportement thermique des systèmes solaires dont certains phénomènes de

Introduction Générale

transfert thermique n'ont pas encore été bien examinés, notre premier objectif porte sur l'étude de l'influence de certains paramètres sur le transfert de la chaleur au sein d'un capteur solaire photovoltaïque hybride fonctionnant avec une cellule photovoltaïque et un absorbeur à tube contenant un fluide qui est l'eau ensuite un nanofluide .

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre, présente une recherche bibliographique sur les énergies renouvelables et des différents systèmes solaires à savoir, les panneaux solaires thermiques, photovoltaïques et hybrides.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des généralités sur les nanofluides, leurs différents types, les méthodes de préparation de ces derniers ainsi que les modèles des propriétés thermo physiques élaborés dans la littérature.

Le troisième chapitre est réservé à la formulation mathématique des équations mathématiques gouvernant le phénomène puis la présentation des outils de simulation Gambit et Fluent.

Le quatrième chapitre, regroupe l'ensemble des résultats de simulations. Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion qui généralise les résultats obtenus.

Chapitre I

Etude Bibliographique

Chapitre I

Etude Bibliographique

I .1.Généralité sur les énergies renouvelables

I .1.1. Introduction

La consommation de l'énergie mondiale dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

Ainsi l'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à d'autres sources d'énergies inépuisables dites: Energies renouvelables.

I .1.2.Énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (aussi appelées énergies vertes) correspondent à des sources d'énergies qui sont non seulement issues de phénomènes naturels, mais qui se régénèrent également par elles-mêmes, à l'aide de processus naturels indépendants des humains. Le soleil et la chaleur interne de la Terre font partie des sources d'énergie naturelles les plus importantes. Le fait qu'une ressource soit renouvelable ou non dépend aussi de la vitesse à laquelle celle-ci est consommée. Prenons par exemple, le bois tant que le nombre d'arbres coupés n'excède pas le nombre d'arbres qui poussent, le bois peut être considéré comme étant une ressource renouvelable. La question n'est donc pas seulement d'utiliser des énergies vertes, mais aussi de ne pas consommer l'énergie de façon abusive.

I .1.3.Les types des énergies renouvelables

Plusieurs types des énergies renouvelables existent (Figure I-1). On peut les classer dans l'ordre d'importance de leur exploitation en cinq(05) grandes familles [1]:

- L'énergie solaire.
- L'énergie éolienne.
- L'énergie hydraulique.

- La biomasse.
- La géothermie.

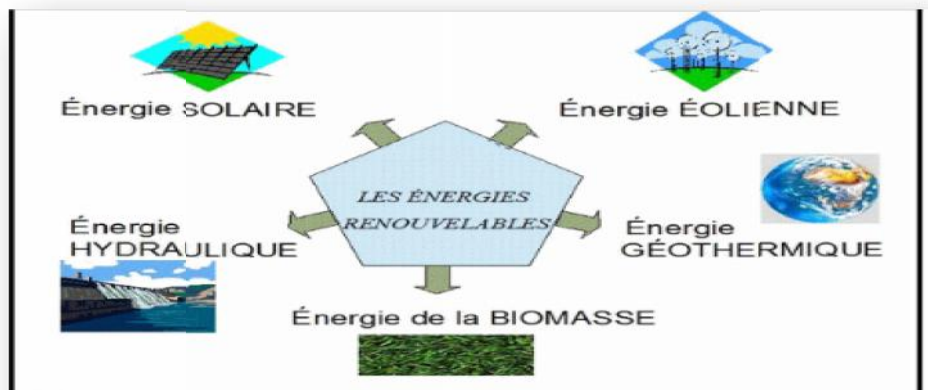


Figure I-1: Les différents types des énergies renouvelables [1].

I .2. L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des énergies qui peut être investie et convertie en énergies thermiques ou électriques grâce au rayonnement solaire reçu par la terre. Le meilleur avantage de cette technologie est que sa source, le soleil, est sans fin et ne peut pas s'épuiser. De plus, le soleil brille partout, ce qui signifie que les technologies de l'énergie solaire sont une option viable pour tout le monde [2].

Bien que le principal inconvénient soit que ces technologies ne fonctionnent pas la nuit en raison de l'absence d'irradiance solaire. Il est également important de noter que l'énergie solaire peut varier en termes d'intensité d'un endroit à un autre [2].

De manière générale, on peut exploiter l'énergie solaire par deux processus qui sont :

- La conversion de sa lumière visible en électricité, qui est appelé effet photo-électrique [2].
- Le stockage et le transfert de ses composants de chaleur pour le chauffage, qui est visée à l'énergie solaire thermique [2].

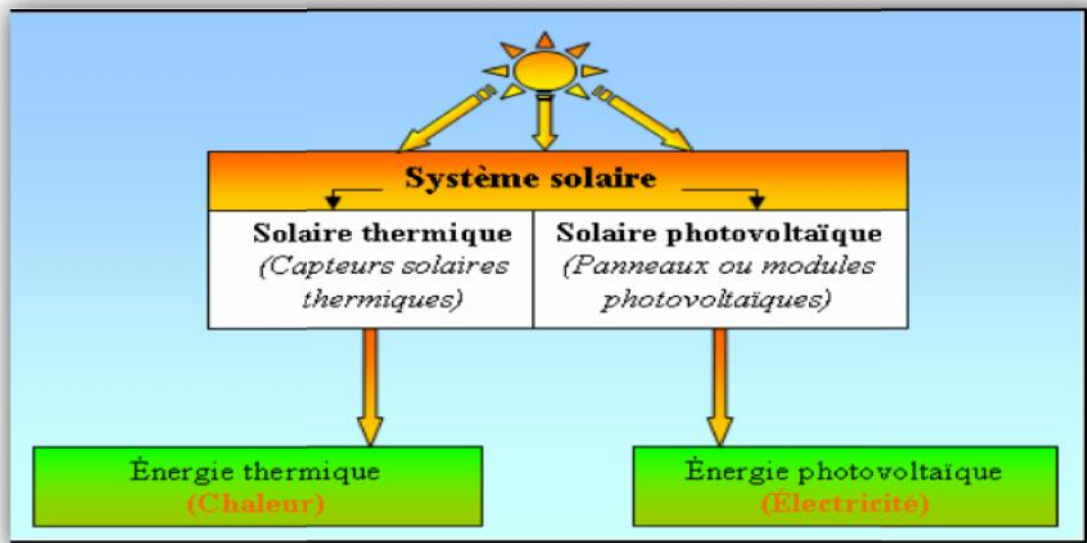


Figure I-2 : L'exploitation de l'énergie solaire [3].

Le soleil est une source abondante et écologique d'énergie renouvelable. Aujourd'hui, nous captions l'énergie solaire pour chauffer les maisons et l'eau, et pour produire de l'électricité au moyen de trois différentes méthodes et technologies :

L'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie photovoltaïque.

A .L'énergie solaire passive

Le terme «passif» renvoie aux techniques utilisées pour capter l'énergie. Ces techniques misent sur la conception des immeubles et le type de matériaux utilisés pour les construire. La conception solaire passive ne date pas d'hier. Il y a cent ans, des familles peignaient des réservoirs noirs et les plaçaient au soleil pour chauffer leur eau. Les surfaces noires absorbaient la chaleur qui était transférée du métal des réservoirs à l'eau. Cette méthode est toujours utilisée dans les pays chauds.

B .L'énergie solaire active

Le système d'énergie solaire active utilise des capteurs solaires pour capter l'énergie du soleil et produire de la chaleur afin d'alimenter des pompes et des ventilateurs qui distribuent de l'eau et de l'air chaud.

C .L'énergie photovoltaïque

Le processus photovoltaïque transforme l'énergie de rayonnement du soleil en courant électrique continu par des panneaux solaires. Le physicien français Edmond Becquerel (le père d'Antoine Henri Becquerel, connu pour sa découverte de la radioactivité) a décrit l'effet en 1839, mais ce n'est que vers le milieu et la fin des années 1950 que des cellules photovoltaïques pratiques ont été commercialisées.

Cette énergie qui ne représente que 0,8% des énergies renouvelables mondiales n'est pas encore très significative. Elle est cependant rentrée dans une phase d'augmentation exponentielle de sa production avec une évolution actuelle de plus de 40% par an. Ainsi la production mondiale de photopiles est passée sur la période 1997-2007 de 125,8 MWC à 3733 MWC. Elle devrait dépasser les 10 000 MWC en 2010 [4].



Figure I-3 : Exemple d'énergie solaire photovoltaïque [4].

I. 3. Le gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [5]. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances.

L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

I.3.1. Gisement solaire au sol

Le gisement solaire au sol est très variable comme présenté sur la figure (I-4). Nous constatons une variabilité importante les jours nuageux (1) par rapport aux jours avec éclaircies (2) et les jours de soleil (3).

L'irradiation du soleil jours nuageux est environ 200 W/m^2 alors qu'elle est de 1000 W/m^2 pour les jours ensoleillés.

La présence de nuages modifie sensiblement l'importance des rayonnements du soleil, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant [6].

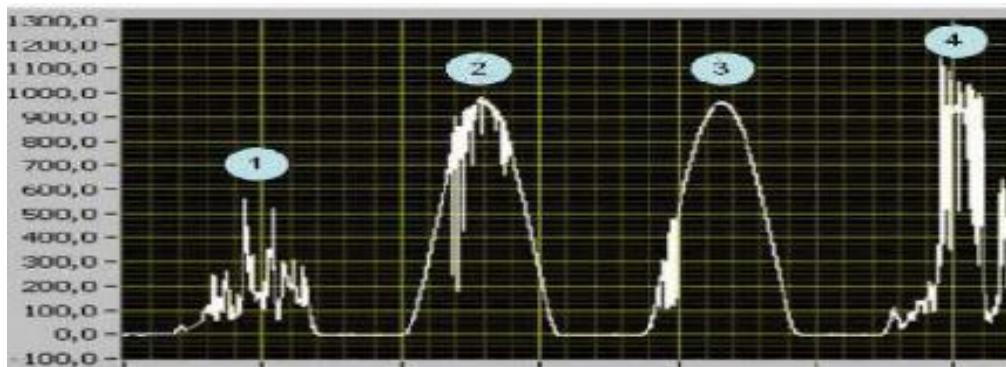


Figure I-4 : Irradiation globale (W/m^2) au sol.

Par ailleurs, l'orientation et l'inclinaison sont essentielles. L'idéal est une orientation plein sud.

Néanmoins, si l'on a une orientation Est et une pente de 20° , le rendement est d'environ 87% (donc 13% de pertes par rapport à un positionnement optimal). Sur le disque solaire de la figure (1.7), on constate que dans toutes les orientations et inclinaisons, les pertes par rapport à un positionnement optimal restent inférieures à 50%, ce qui montre que l'on peut généralement utiliser l'énergie solaire quelle que soit le positionnement.

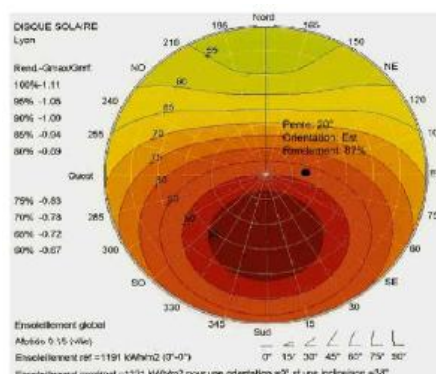


Figure I-5 : Disque Solaire.

I.3.2. Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [7].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure (I-6) :

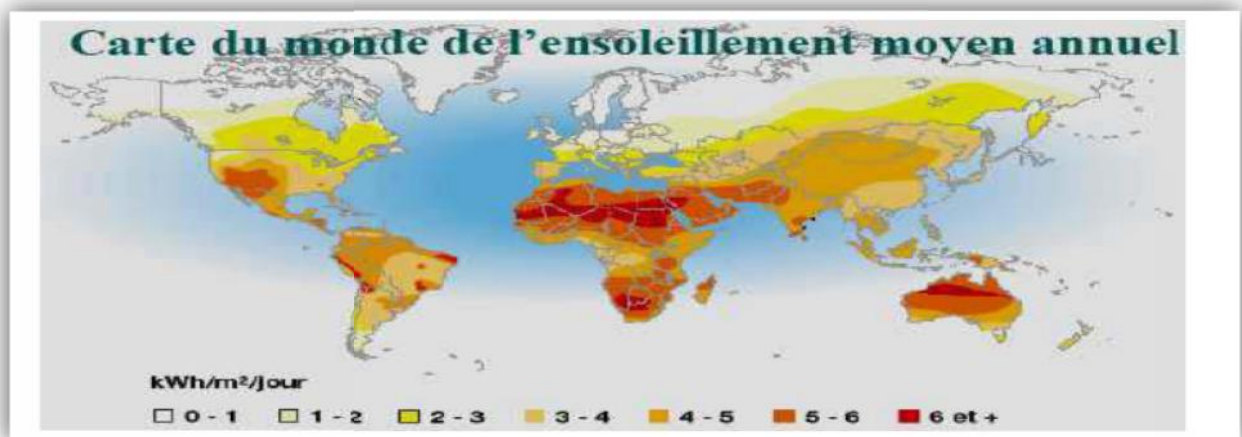


Figure I-6 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

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, soit 169.000 T Wh/an pour le solaire thermique, 13,9 T Wh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel.

I.4. Conversion thermique

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus connus d'échange d'énergie. Qui peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température, il est régi par une combinaison de loi physique, les transferts thermiques ont, aussi bien dans le domaine des sciences pures que dans celui des applications technologiques, un rôle souvent essentiel. Ce rôle devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, calorifugeage, utilisation de l'énergie solaire,...). [8] et on site essentiellement les capteurs solaire qui convertissent l'énergie solaire en électricité pour les

panneaux photovoltaïque ou en chaleur pour les capteurs solaires thermiques ou bien en électricité et en chaleur pour les capteurs hybrides. À cause de non efficacité totale des capteurs (les pertes) l'énergie ne se convertie pas totalement.

I.5.Conversion photovoltaïques

I.5.1. Définition

La conversion photovoltaïque, utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque) .Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot «photo» (en grec «phot » qui signifie «lumière») et du mot «Volt» (patronyme du physicien A Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

La conversion photovoltaïque utilise le principe de la transformation directe de l'énergie lumineuse en une énergie électrique par le biais des cellules solaires, ces dernières sont capables d'effectuer cette transformation.

La première cellule solaire à homo jonction en silicium a été fabriquée en 1954 aux laboratoires Bell avec un rendement voisin de 4.5% [9]. En 1960, ce rendement a été porté à une valeur supérieure à 10% pour les cellules solaires à base de silicium monocristallin. De nombreux travaux de recherche sur l'amélioration du rendement de conversion ont été publiés. Jusqu'à 1972, les applications des cellules solaires étaient réservées au seul usage spatial à cause de leurs prix très élevés et leurs faibles rendements. Cependant, l'augmentation du rendement a été considérée plus déterminante par rapport à la réduction du coût, car toute amélioration des performances, optimisation des paramètres, s'applique directement sur le prix de l'énergie produite [10].

I.5.2.La cellule photovoltaïque(PV)

Le fonctionnement de la cellule PV est base sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. La Fig. I-7illustre la coupe d'une cellule PV.

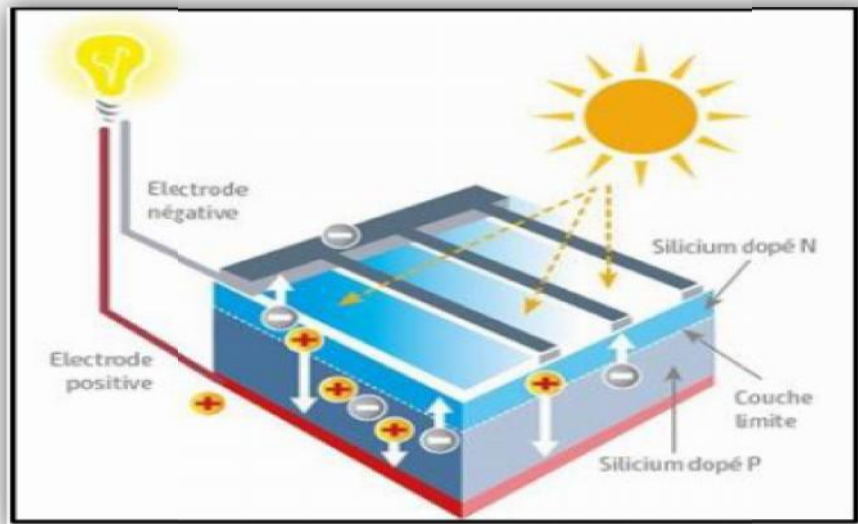


Figure I-7 : Le schéma sur l'effet photovoltaïque [11].

Une cellule PV est réalisée à partir d'un matériau semi-conducteur (par exemple le silicium). Sa réalisation est comparable à une diode classique. La cellule est composée de deux différentes couches. La couche supérieure est dopée N et la couche inférieure est dopée P créant ainsi une jonction PN.

Cette jonction PN crée une barrière de potentiel. Lorsque les grains de lumière (les photons) heurtent la surface de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la matière. Ce gain d'énergie libère des électrons de ces atomes, créant des trous et des électrons.

Ceci engendre donc une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel crée un champ E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule PV. Le courant et la tension fournis par une cellule PV dépendent de différents paramètres.

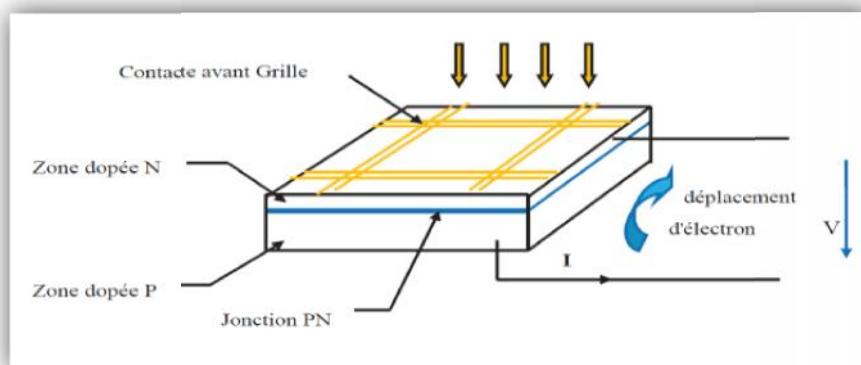


Figure I-8 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V. La

Fig. (I-9)représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [12].

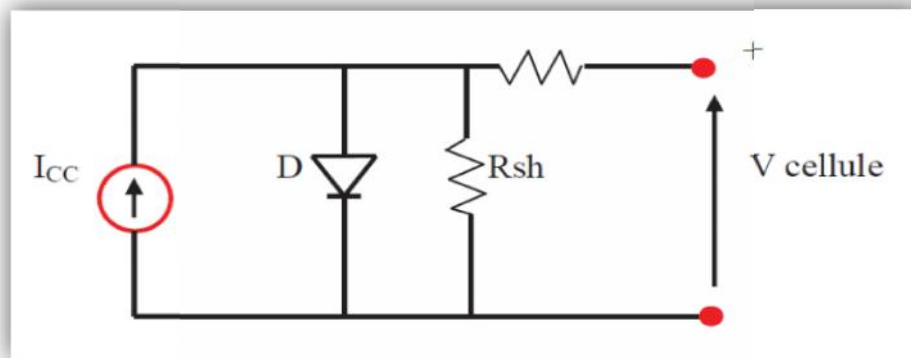


Figure I-9 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s Représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction [13].

I.5.3. Les différents types des cellules photovoltaïques

Existe plusieurs familles de cellules photovoltaïques. Actuellement, les plus répandues sur le marché sont les cellules en silicium cristallin et les cellules en couches minces. D'autres en sont au stade de la Recherche et Développement.

1. Les cellules en silicium cristallin

Ce type de cellule est constitué de fines plaques de silicium, un élément chimique très abondant et qui s'extrait notamment du sable ou du quartz. Le silicium est obtenu à partir d'un seul cristal ou de plusieurs cristaux : on parle alors de cellules monocristallines ou multi cristallines.

Les cellules en silicium cristallin sont d'un bon rendement (de 14 à 15 % pour le multi cristallin et de près de 16 à 19 % pour le monocristallin). Elles représentent plus de 90 % du marché actuel.

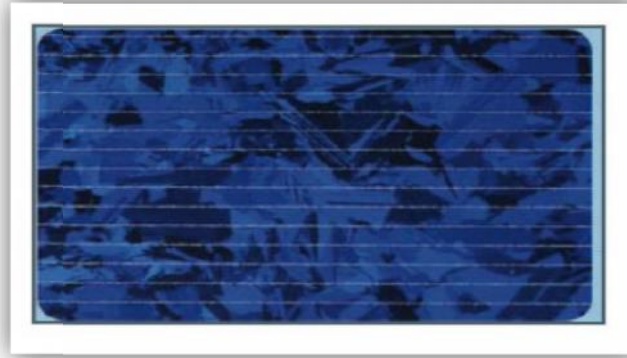


Figure I-10 : La cellule en silicium cristallin.

2. Les cellules en couches minces

Les cellules en couches minces sont fabriquées en déposant une ou plusieurs couches semi-conductrices et photosensibles sur un support de verre, de plastique, d'acier...

Cette technologie permet de diminuer le coût de fabrication, mais son rendement est inférieur à celui des cellules en silicium cristallin (il est de l'ordre de 5 à 13 %). Les cellules en couches minces les plus répandues sont en silicium amorphe, composées de silicium projeté sur un matériel souple.

La technologie des cellules en couches minces connaît actuellement un fort développement, sa part de marché étant passée de 2 %, il y a quelques années, à plus de 10 % aujourd'hui.

Propriétés de la cellule amorphes :

- Peut fonctionner sous la lumière fluorescente.
- Fonctionnement si faible luminosité.
- Fonctionnement par temps couvert.
- Fonctionnement si ombrage partiel.
- La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.

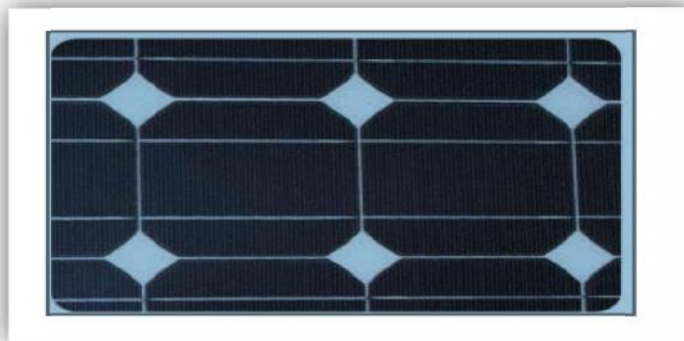


Figure I-11 : La cellule en couches minces.

3. Les cellules à concentration

Elles sont placées au sein d'un foyer optique qui concentre la lumière. Leur rendement est élevé, de l'ordre de 20 à 30 %, mais elles doivent absolument être placées sur un support mobile afin d'être constamment positionnées face au soleil.

4. Les cellules organiques

Composées de semi-conducteurs organiques déposés sur un substrat de plastique ou de verre, ces cellules, encore au stade expérimental, offrent un rendement moyennement élevé (de l'ordre de 5 à 10 %) mais présentent des perspectives intéressantes de réduction de coûts.

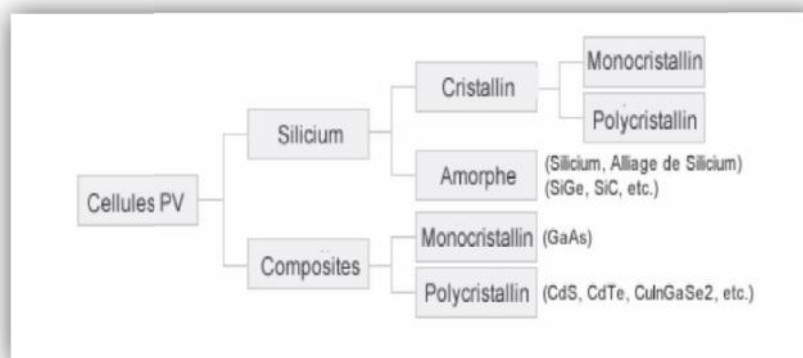


Figure I-12 : Les différents types des cellules.

I.6. Les panneaux solaires

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée la sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser deux sortes de panneaux solaires, le plus répandu étant le panneau solaire photovoltaïque

qui produit de l'électricité à partir de l'impact des rayons du soleil. L'autre sorte est le panneau solaire thermique qui produit la chaleur pour chauffer les maisons et l'eau.

I.6.1 .Le panneau photovoltaïque

I.6.1 .1. Constitution

Un module photovoltaïque appelé aussi capteur ou panneau photovoltaïque est constitué essentiellement d'un ensemble d'éléments suivants :

➤ Le vitrage

C'est la plaque supérieure du module, il s'agit d'un verre trempé de 4 mm d'épaisseur à une faible teneur en fer. Ceci permet une meilleure transmission optique. La face extérieure du verre, traité à l'acide fluosilicique (H_2SiF_6), est recouverte de nano pores qui piègent la lumière incidente et réduisent la réflexion en surface. En face intérieure, le verre est microstructure, augmentant ainsi le rendement par éclairage diffus [14].

➤ L'EVA

L'EVA (éthylène-acétate de vinyle) est une résine transparente pour à couvrir les cellules photovoltaïques. Chimiquement, elle est formée de chaînes de copolymère d'éthylène et de vinyle d'acétate. L'EVA est utilisée pour plusieurs caractéristiques [14] :

- Sa résistivité électrique très élevée (un très bon isolant électrique).
- Ses températures de fusion et de polymérisation relativement faibles.
- Son très faible taux d'absorption d'eau (étanchéité).
- Sa bonne transmission optique (supérieure à 90%).

➤ Le Mylar

Est un bon isolant électrique utilisé pour isoler électriquement les connexions à la sortie de la face arrière des cellules à une résistivité électrique très élevée [14].

➤ Le Tedlar -Aluminium

L'arrière du module est constitué d'un film multicouche d'aluminium dont le rôle prouvé contre l'humidité et les chocs mécaniques est mis en sandwich entre deux feuilles de Tedlarde 180µm

d'épaisseur. Le rôle majeur du Tedlar, dans un module photovoltaïque, est la protection de surface. En effet, le Tedlar résiste particulièrement bien aux agressions extérieures (UV, variations de température et atmosphères corrosives) [14].

➤ **Le cadre en aluminium**

Le cadre en aluminium se justifie par la haute résistance à l'humidité ainsi qu'aux chocs (mécaniques, à l'usure, la corrosion et à la chaleur) [14].

➤ **La cellule solaire**

Est la base du module PV, elle est formée avec un ou plusieurs matériaux semi-conducteurs avec un dopage différent dans ces couches [11].

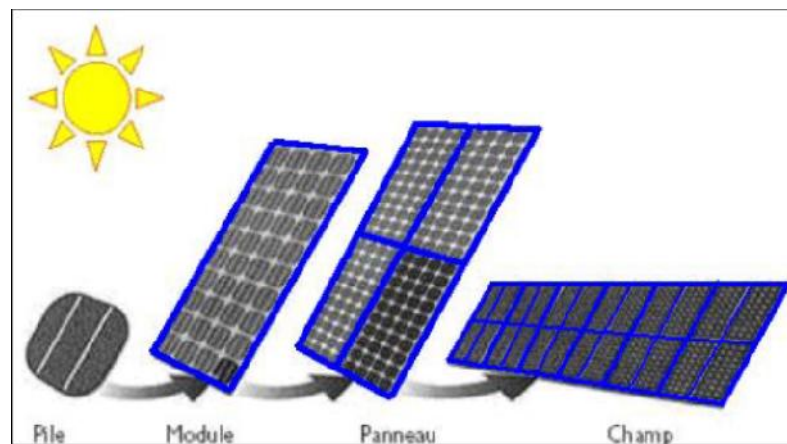


Figure I-13 : La cellule au champ photo voltaïque [15].

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle de la cellule accroît le courant en conservant la tension [16].

I.6.2. Le système photovoltaïque

Ce type de système peut comprendre en dehors du panneau PV, une batterie permettant le stockage de l'énergie électrique produite, un système de régulation de charge permettant la gestion de la batterie, et éventuellement un onduleur permettant la conversion du courant continu en alternatif.

Le système PV peut être connecté directement au réseau électrique par l'intermédiaire d'un onduleur Figure (I-14).

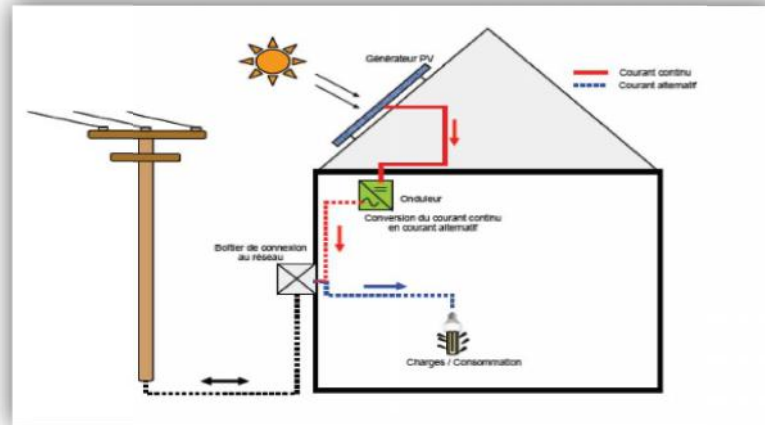


Figure I-14 : Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau.

I.6.3 .Les avantages et inconvénients du système photovoltaïque :

Les avantages et les inconvénients du système photovoltaïque [17] :

❖ Les avantages

- Aucune émission, combustion ou déchets radioactifs (ne contribue pas de façon perceptible au changement climatique mondial ou à la pollution de l'air et de l'eau).
- Faibles coûts d'exploitation (pas de carburant).
- Facile et rapide à installer

❖ Les inconvénients

- La source de carburant est diffuse (la lumière du soleil est une énergie relativement faible densité).
- Coûts initiaux élevés (installés).
- Sortie horaire ou quotidienne imprévisible.
- Manque de stockage d'énergie économiquement efficace.

I.7. Capteurs solaires thermiques

I.7.1. Présentation

Les capteurs solaires thermiques sont des appareils qui transforment l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie thermique sous forme de chaleur et la transmettent à un fluide caloporteur (air ou liquide). [18]

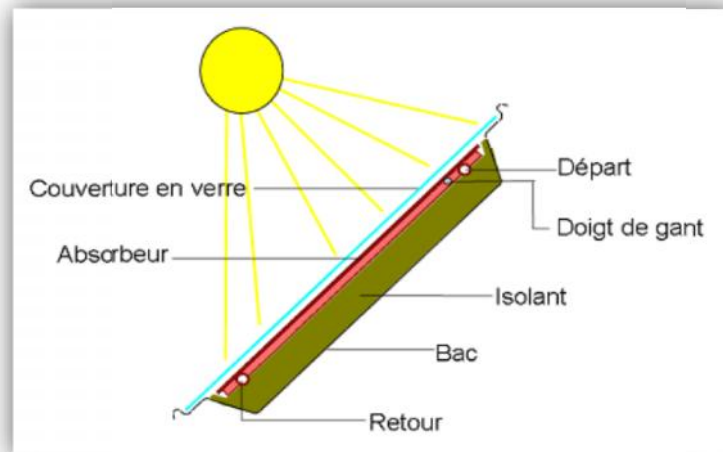


Figure I-15 : Capteur solaire thermique [18].

I.7.2. Les différents types des capteurs thermiques

Les capteurs solaires sont caractérisés par leur mouvement (stationnaire, à poursuite simple et à poursuite double) et par leur température opératoire. Les capteurs stationnaires ont une position du soleil dans le ciel. On en distingue trois types :

A. Capteur solaire plan

Ces capteurs peuvent atteindre des températures de chauffe de 50 à 80°C lorsque les déperditions thermiques sont limitées en face avant du capteur par une protection (vitre, plexiglas, polycarbonate, ... etc.).

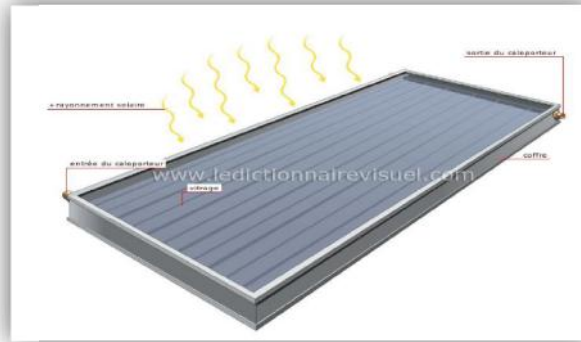


Figure I-16 : Capteur solaire plan [18].

B. Capteur solaire parabolique composé

Ces capteurs sont plutôt utilisés dans le contexte d'applications industrielles, pour l'obtention de températures supérieures à 120°C . La concentration du rayonnement solaire permet de diminuer la surface de réception et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur.

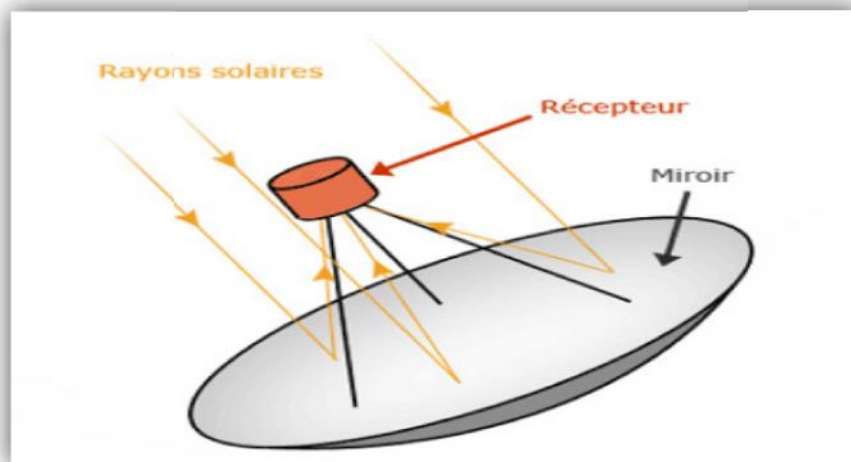


Figure I-17 : Capteur solaire parabolique.

C. Capteur solaire à tube sous vide

Le vide assure une isolation limitant les déperditions de chaleur par rayonnement et convection. Ce type de capteur est plus spécifiquement adapté aux applications nécessitant de hautes températures, en particulier dans les procédés industriels. Leur température de chauffe dépasse les $100 - 120^{\circ}\text{C}$.

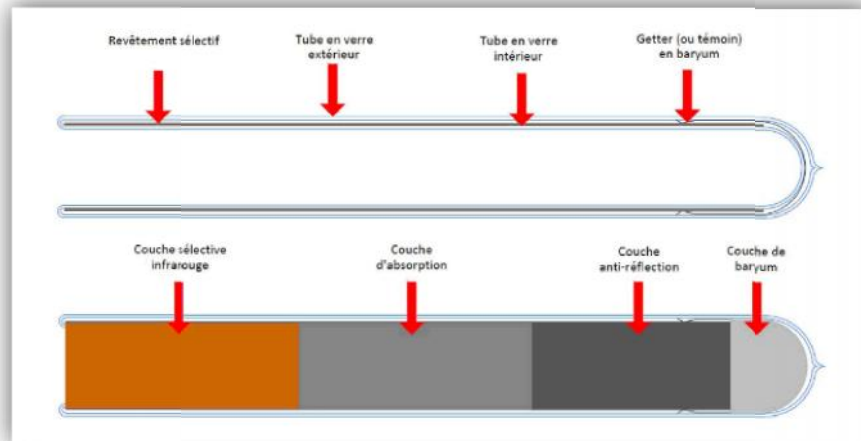


Figure I-18 : Capteur solaire à tube sous vide.

Le capteur solaire plan est tout système exposé au rayonnement solaire afin de le capter et de le transformer en énergie thermique. Ce système de captage a pour base l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre $(0.3 \text{ et } 3 \mu\text{m})$, il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante.

L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre $4 \text{ et } 30 \mu\text{m}$). Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers la surface absorbante et par moitié vers l'extérieur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur.

I.7.3 Les principaux composants d'un capteur solaire plan

Le capteur solaire comprend les éléments suivants :

- Le corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant
- Un système de refroidissement par le fluide caloporteur
- Un isolant thermique (dos et cotés non exposés)
- Une couverture transparente (face avant, exposés au rayonnement) qui assure l'effet de serre
- Un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble.

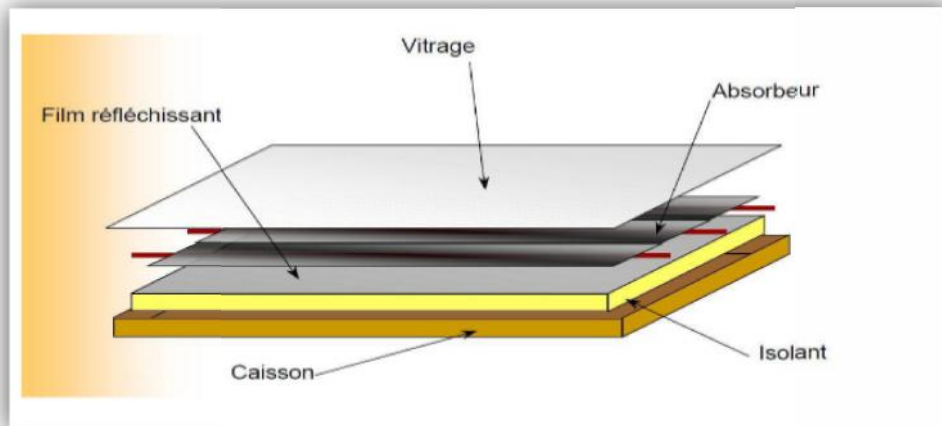


Figure I-19 : Les composants principaux d'un capteur solaire plan [18].

On peut classer les capteurs selon :

A .Le fluide de travail utilisé

On peut trouver :

Ñ Des capteurs solaires à air

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

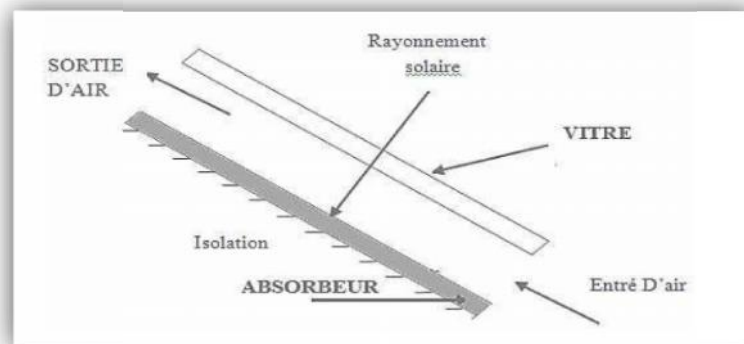


Figure I-20 : Capteurs solaires thermique à air [18].

Ñ Des 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). Les capteurs à eau peuvent être classés en capteurs à :

- ✓ Faible pression de circulation, tel est le cas du chauffage des piscines.

- ✓ Haute pression de circulation où le circuit d'eau est généralement constitué de tubes de cuivre et de plaques métalliques qui augmentent la surface d'absorption.

L'eau et l'air sont les principaux fluides de travail utilisés pour les capteurs solaires plans, mais il en existe d'autres, tels que les hydrocarbures qui sont utilisés pour la réfrigération et la génération d'électricité.



Figure I-21 : Capteurs solaires thermique à eau [18].

B .L'orientation des capteurs

Les capteurs solaires peuvent être :

Ñ Des capteurs fixes

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques, et présentent les propriétés suivantes :

- La simplicité et la fiabilité.
- Un faible entretien.
- Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).
- L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité.

Ñ Des capteurs à poursuite

Le capteur solaire peut être muni d'un dispositif de guidage automatique dans la direction de provenance du flux lumineux, ce qui va améliorer le rendement du capteur.

C .Les types des composants

Les composants des collecteurs diffèrent d'un capteur à un autre, on peut classer les capteurs suivant :

Ñ La couverture

Elle peut exister ou pas, on peut alors trouver :

- ✓ Les capteurs solaires plans non vitrés

Ils sont constitués d'un réseau de tubes peints en noir en plastique résistant aux rayons U.V, sans couverture transparente. Ils sont essentiellement utilisés pour le chauffage de l'eau des piscines extérieures en été et assurent des températures relativement basses de 30 à 35°C.

- ✓ Les capteurs solaires plans vitrés

Le vitrage crée un effet de serre qui permet d'atteindre des températures de 70°C à 90°C et augmente ainsi le rendement. Le capteur solaire peut avoir une ou plusieurs couvertures transparentes.

• L'absorbeur

L'absorbeur peut être classé suivant sa forme. On trouve :

- ✓ Les capteurs plans.
- ✓ Les capteurs à cavités.

I.7.4 Mode de fonctionnement d'un capteur solaire plan

Le capteur plan effectue la transformation de l'énergie solaire incidente arrivant sur celui-ci en énergie thermique à basse température. Cette transformation est assurée par un processus appelé l'effet de serre. Les rayons du soleil émis en majorité dans la gamme des longueurs d'onde visible ($\sim 0.5 \mu\text{m}$), traversent la couverture transparente du capteur et tombent sur l'absorbeur. Celui-ci étant noir, il absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent il se chauffe. Du fait de sa température, il réémet vers l'avant dans la gamme infrarouge ($\sim 9\mu\text{m}$). Le verre est parfaitement opaque à l'infrarouge et réfléchit à nouveau les rayons vers l'absorbeur. La chaleur reste donc prisonnière entre la couverture transparente et l'absorbeur. Cette énergie est transmise vers le

liquide caloporteur qui circule dans l'échelle tubulaire du capteur qui conduit cette chaleur vers l'utilisation.

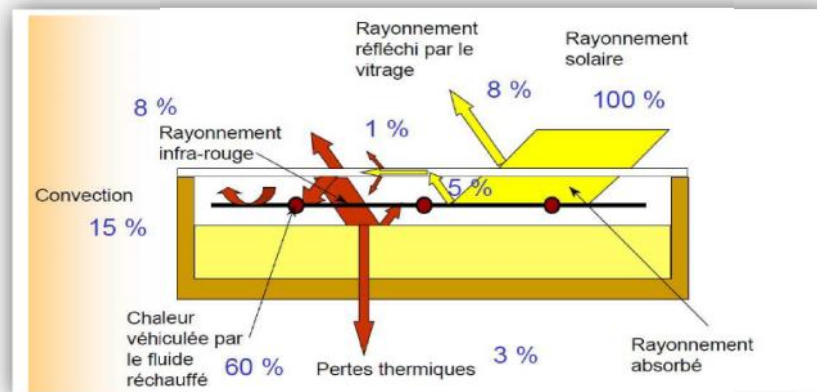


Figure I-22 : Schéma Principe de fonctionnement.

A.3. Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan

Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan peuvent être classés en deux catégories : les paramètres externes et les paramètres internes.

A.4. Les paramètres externes

Les principaux paramètres externes qui peuvent intervenir directement sur les performances d'un capteur plan sont

- Paramètre d'ensoleillement : le rayonnement solaire, position du soleil, durée d'insolation, ...etc.
- Température ambiante
- Vitesse du vent

A.5. Les paramètres internes

Paramètres géométriques :

- Les paramètres de position : angle d'inclinaison, orientation du capteur.
- La surface du capteur
- Les dimensions de différents éléments : épaisseur, longueur et largeur

Paramètres de fonctionnement :

- La température d'entrée du fluide caloporteur
- Le débit massique du fluide caloporteur
- Les températures des différents éléments du capteur

Ces paramètres sont très importants. Ils permettent, en tenant compte du coût, d'avoir une température de sortie du fluide élevée (puissance utile élevée). En d'autres termes; un meilleur rendement du capteur.

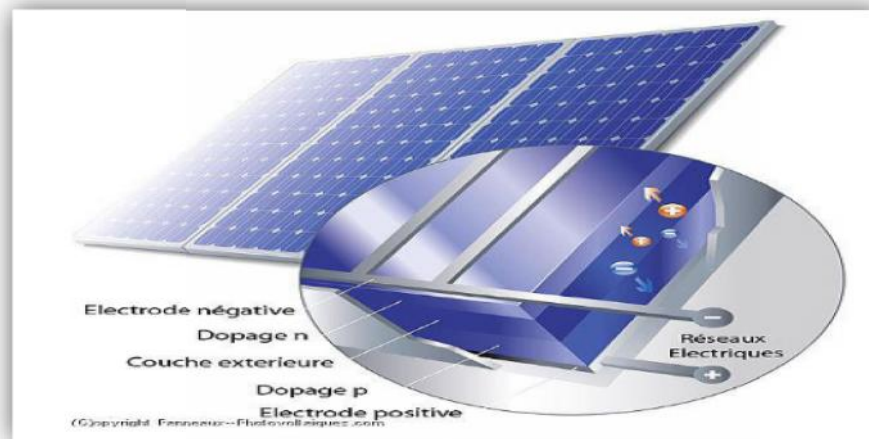


Figure I-23 : Panneaux solaires photovoltaïques.

I.8. Méthode de refroidissement des panneaux solaires

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses ; elle présente l'avantage d'être propre et inépuisable. Cependant, les cellules solaires photovoltaïques (PV) ne convertissent qu'une partie du rayonnement solaire incident, tandis que le reste favorise son réchauffement et donc l'élévation de sa température. Ce qui a pour effet d'affecter l'efficacité de ces cellules et celle des panneaux PV qu'elles composent. Pour atténuer cet effet négatif de l'élévation de température, on a recours au refroidissement. De nombreuses techniques de refroidissement sont proposées dans la littérature, notamment celles utilisant de l'eau comme fluide caloporteur. [19] ont fait circuler cette eau dans un échangeur de chaleur à serpentin selon différentes configurations de ses tubes. Ce qui a permis d'améliorer l'efficacité du panneau PV de 10.5 à 17.2%. Pour une meilleure homogénéisation du champ de température dans le panneau PV, [20] proposent un échangeur à micro canaux. Une autre technique de refroidissement [21], qui améliore l'efficacité de 14.1%, consiste à pulvériser de l'eau, simultanément sur les deux faces du panneau PV. [22] ont utilisé une éponge fixée sur la face arrière du panneau PV. Cette éponge qui

est continuellement imbibée d'eau a permis d'améliorer l'efficacité de ce panneau de 29.4%. Pour l'autonomie de fonctionnement de ces systèmes de refroidissement par eau, [23] proposent de refroidir l'eau chaude, en sortie du panneau PV refroidi, à travers un échangeur enfouis dans le sol. Par ailleurs, dans une étude expérimentale de refroidissement d'un panneau PV par ruissellement d'eau sur sa face avant [24], l'eau circule en circuit fermé entre ce panneau et un réservoir de stockage. Selon que le refroidissement soit continu durant la journée ou en intermittence d'une heure, l'efficacité du panneau est améliorée, respectivement, de 28.4 et 10.7%.

I. 9. Les capteurs solaires hybrides photovoltaïque thermique PV/T

Un capteur photovoltaïque thermique (PV/T) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre habituellement perdue, en chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules

PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé et selon le type d'absorbeur et la couverture

I. 10. La Classification des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques

Les capteurs solaires hybrides PVT plan peuvent être classés selon le fluide caloporteur utilisé (l'eau, l'air ou les deux simultanément) [25] :

- Capteur **hybride PV/T à eau** : c'est un système photovoltaïque thermique qui utilise l'eau comme agent thermique.

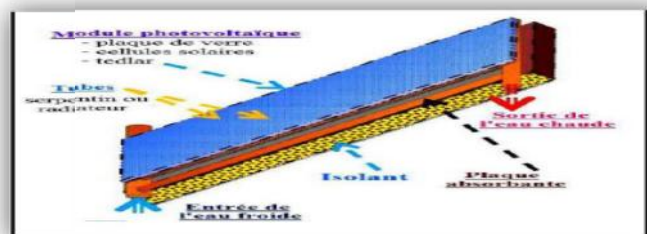


Figure. I-24 : Les capteurs solaires hybride PV/T à a eau [25].

Un capteur solaire PV/T hybride à eau est étudié en régime dynamique par **Chow** [26] qui en réalisé un modèle adapté aux simulations thermiques en régime transitoire. Il s'appuie pour cela sur les

travaux de **Bergene** et **Iovvik**[27] qui présentent en 1995 la modélisation d'une configuration similaire de capteur solaire PV/T hybride à eau. Ce modèle thermique se base sur la méthode des volumes finis et permet le calcul des performances horaires, des gains thermique et électriques, des rendements et du comportement thermique des diverses couches de ce capteur solaire. Le composant est constitué d'une couche de verre séparée d'un panneau PV par une lame d'air confinée comme elle montre la Figé (1.25). Le panneau PV est fixé à un absorbeur par l'intermédiaire d'une couche adhésive composée d'EVA (éthylène acétate de vinyle) et de tedlar. Cet absorbeur se présente sous forme d'ailette soudées des tubes de circulation d'eau parallèles régulièrement espacés et connectés aux deux extrémités par des tubes de jonction. Cette disposition permet d'uniformiser le débit d'eau dans chacun des tubes. Les côtés et le fond du capteur solaire sont isolés.

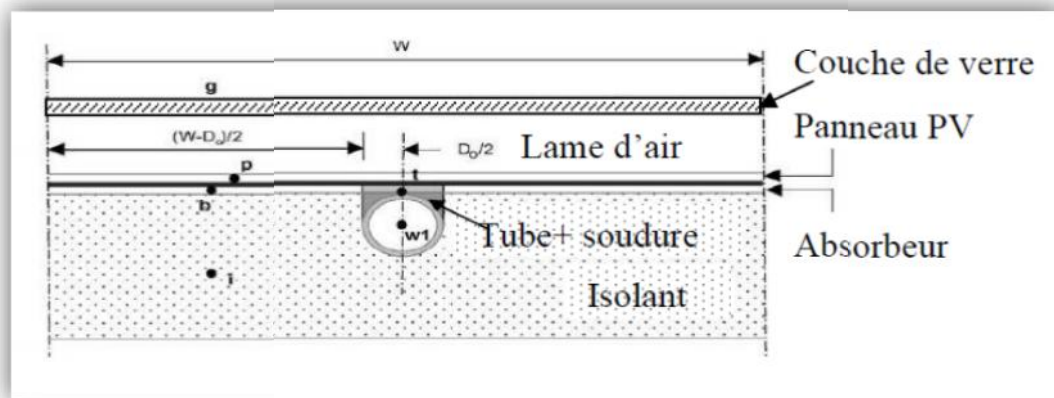


Figure I-25 : Coupe transversale du capteur solaire PV/T hybride à eau [26].

- **Capteur hybride PV/T à air** : c'est un système photovoltaïque thermique utilise l'air comme fluide caloporteur.



Figure I-26 : Les capteurs solaires hybride PV/T à air [28].

- **Capteur hybride PV/T à Nano fluide**

Les nano fluides sont utilisés dans le système PV/T, parce que ces fluides présentent de meilleures propriétés thermo physiques, ce qui est bénéfique pour améliorer le transfert de chaleur d'un collecteur PV/T [29].



Figure I-27 : Les capteurs solaires hybride PV/T à Nano fluide [29].

Les systèmes hybrides photo voltaïque thermique sont conçus par un couplage d'un capteur thermique et un autre photovoltaïque. Le rendement de la cellule diminue avec l'augmentation de la température ambiante d'où la nécessité du refroidissement de ces cellules avec un fluide caloporteur.

Dans les panneaux solaires thermiques ou voltaïques se on distingue les trois types de transfert de chaleur.

I.11. Transfert par conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. [30]

La transmission de chaleur par ce moyen est d'autant plus faible que le matériau est épais et de faible densité.

Dans le cas d'un capteur solaire, l'énergie est absorbée par la vitre et par les cellules de silicium et la chaleur est conduite à l'arrière et avant du capteur par l'intermédiaire des couches intervenantes. La loi de Fourier pour l'état d'équilibre, des applications unidimensionnelles est comme suit:

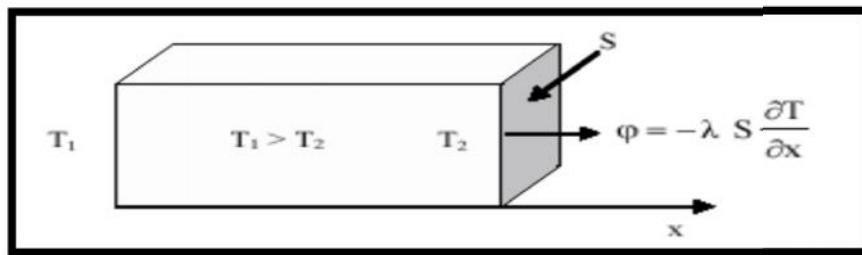


Figure I-28 : Schéma de transfert de chaleur conduction loi de Fourier [30].

Cette équation est donnée dans le cas où k est une constante.

Avec :

Q : flux de chaleur exprimée en (W).

A : Aire de la section perpendiculaire au flux de chaleur, exprimée en (m²).

λ : Conductivité thermique du solide exprimée en (W/mk).

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température dans la section d'aire A exprimée en (°C/m).

Pour une plaque plane simple d'épaisseur L , l'équation devient :

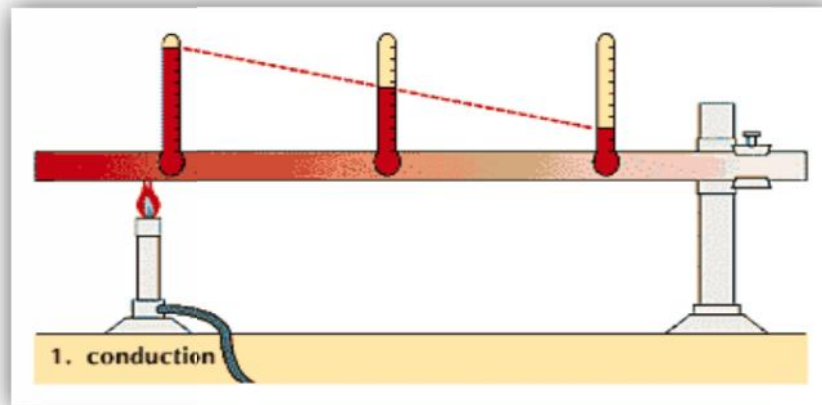


Figure I-29. Schéma de transfert de chaleur par conduction [30].

I .12. Transfert par convection

Les phénomènes de convection interviennent dans la transmission de la chaleur chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes, lorsque se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. [31]

Le transfert de chaleur par convection est décrit en utilisant des corrélations entre certains paramètres sans dimensions. De tels paramètres sont les nombres de Nusselt, de Reynolds et de Prandtl. Ces paramètres sont employés afin de déterminer la valeur de h pour chaque cas :

$$Q = hA (T_p - T_{\infty}) \quad (.3)$$

La loi de Newton du refroidissement est alors employée afin de calculer le transfert de chaleur par convection.

Avec :

Q : flux de chaleur exprimée en (W).

h : Coefficient d'échange de chaleur par convection exprimée en (W/m².K).

A : Aire de la surface d'échange de chaleur exprimée en (m²).

$(T_p - T_{\infty})$: La différence de température de la paroi et du fluide respectivement (K).

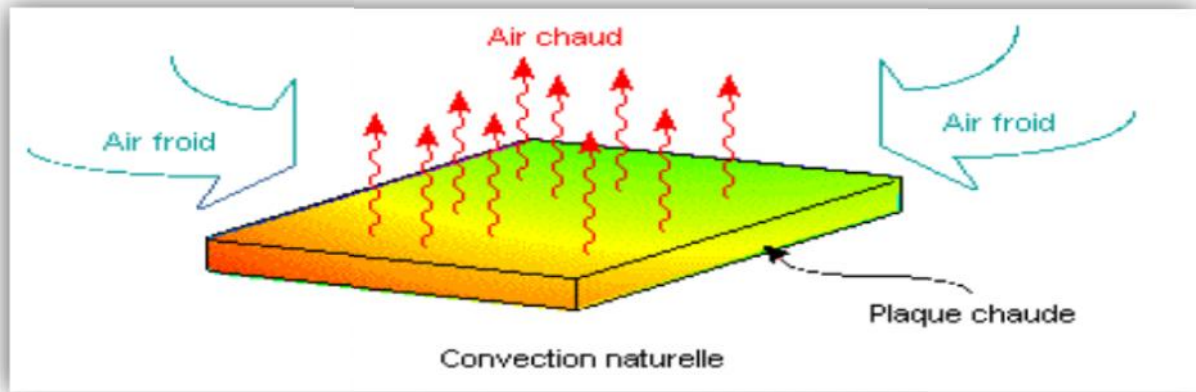


Figure I-30 : Schéma de transfert de chaleur convectif [31].

Il y a trois types de convection :

A .Convection libre ou naturelle

Le phénomène de convection naturelle thermique apparaît spontanément, sous le seul effet des différences de masse volumique résultantes des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (le champ gravifique,...). [31][32]

B .Convection forcée :

Le phénomène de convection forcée apparaît quand le mouvement du fluide est imposé par une cause mécanique extérieure (pompe, ventilateur,...) au système. [31][32]

C .Convection mixte :

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convection sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. [31][32]

I .13.Transfert par rayonnement

C'est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un milieu à haute température vers un autre à basse température lorsque ces milieux sont séparés dans l'espace, ce mode de Transfert ne nécessite pas de support matériel et peut donc s'effectuer dans le vide, en générale les sources de rayonnement sont des solides et le rayonnement se fait par la surface. [30]

L'énergie rayonnée par unité de temps, par une surface A d'un corps noir est donnée d'après la loi de Stephan-Boltzman (en 1884) par :

$$Q = \sigma A T^4 \text{ (I. 4)}$$

Si on prend le rayonnement entre un corps et le milieu environnant nous avons la relation :

$$Q = \varepsilon_p \sigma A_p (T_p^4 - T_f^4) \text{ (I. 5)}$$

Avec :

Q : la chaleur transmise par rayonnement.

ε_p : Facteur d'émissivité du corps.

σ : Constante de Stephan- Boltzman. $\sigma = 5.66 \cdot 10^{-8}$ en $\text{J/s m}^2\text{k}^4$

T : Température du corps en kelvin.

La valeur de ε_p vaut 1 pour un corps noir.

La plupart des gaz monoatomiques ou poly-atomique symétriques (H_2 , N_2 , O_2 , ...) n'absorbent et n'émettent aucun rayonnement thermique. Par contre les gaz poly-atomiques non symétriques émettent un tel rayonnement.

Un corps étant rarement totalement isolé, il recevra également le rayonnement émit par le gaz qui l'environne ou par d'autres corps lui faisant face.

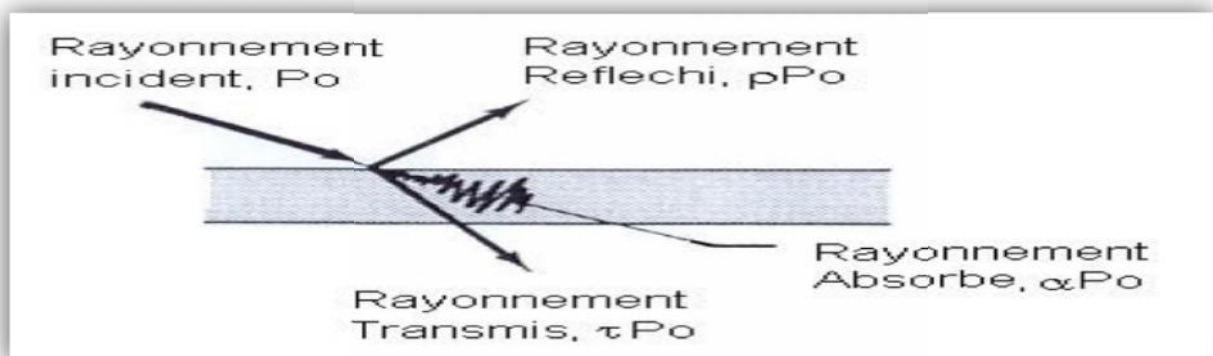


Figure I-31 : Rayonnement absorbé par un volume [30].

I.14. Les nombres sans dimensions

I.14.1. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est proportionnel au rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Il peut être exprimé comme :

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (.6)$$

Où

v : La vitesse moyenne [m/s].

D_h : le diamètre hydraulique du tube intren.

Le nombre de Reynolds permet de quantifier les écoulements laminaires et turbulents. Les écoulements à nombre de Reynolds élevé sont générale turbulents, alors que les écoulements où les forces d'inertie sont faibles par rapport aux forces visqueuses sont plus souvent laminaires.

I.14.2. Nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt est proportionnel au rapport entre le transfert thermique total et Le transfert par conduction. Il peut être exprimé comme :

$$Num = \frac{h_m D_h}{k_f} \quad (I.7).$$

k_f : conductivite thermique du fluide.

D_h : le diamètre hydraulique du tube intren.

I.14.3. Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof est proportionnel au rapport entre les forces de gravité par les forces visqueuse.

$$\frac{F_g}{F_\mu} = \frac{\text{Forcesdegravité}}{\text{Forcesdevisqueusité}} \quad (.8)$$

$$\frac{F_g}{F_\mu} = \frac{\rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot T \cdot L_c^3}{\mu^2} \quad (.9)$$

Où

g : L'accélération de la pesanteur [ms^{-2}].

T : La différence de température.

I.14.4. Nombre de Rayleigh Ra

Le nombre de Rayleigh est proportionnel entre l'importance relative de la poussée d'Archimède et le produit de la trainée visqueuse par le taux de diffusion thermique.

Il peut être exprimé comme :

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g}{\nu \alpha} (T_s - T_{ext}) L_c^3 \quad (.10).$$

Où

T_s : La température de la paroi.

T_∞ : La température du fluide loin de la paroi.

ν La viscosité cinématique $= \frac{\mu}{\rho}$ [$m^2 s^{-1}$].

α La diffusivité thermique $= \frac{K}{\rho c}$ [$m^2 s^{-1}$].

- L'élément perturbateur : poussée d'Archimède.
- Les éléments stabilisateurs : la viscosité et la conductivité thermique.
 - Si $Ra < 1710 = Ra_c$, l'écoulement est stable.
 - Si $Ra > 1710$, apparition des rouleaux de Bénard.

Ra_c Étant la valeur critique de Rayleigh dans une couche horizontale infinie.

I.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse sur les différents types des énergies renouvelables, un aperçu général a été donné sur l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement de la cellule et du capteur solaire.

Chapitre II

Les Nano Fluides

Chapitre II

Les Nanofluides

II.1. Généralités sur les nanofluides

II.1. Introduction

Le développement des nanotechnologies constitue un challenge pour les années à venir. Les nanosciences étudient la structure de la matière au niveau moléculaire donc à l'échelle nanométrique dans le but d'innover dans de nombreux domaines tels que : l'environnement, la production, le refroidissement des composants électroniques, la biologie, le diagnostic médical, le traitement de l'eau, refroidissement dans un moteur thermique et le stockage de l'énergie. Les fluides caloporteurs de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent parfois leur capacité de transfert de chaleur . L'utilisation des nano fluides, particules de taille nanométrique de conductivité thermique très élevée en suspension dans un fluide caloporteur, est susceptible d'apporter des gains en performances thermiques très importants. De nombreuses recherches ont été menées sur cette nouvelle génération de fluides afin d'apporter une meilleure compréhension des mécanismes physiques mis en jeu lors de l'utilisation des nano fluides, et mettre ainsi au point des liquides caloporteurs plus performants.

II.2. Les nanofluides

Les nanofluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés. Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Or, les fluides les plus employés tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène-glycol (EG) ne disposent que d'une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins. Avec les nanofluides, l'idée est alors d'insérer, au sein du fluide de base, des nanoparticules afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange [34]. Ce terme nanofluide a été introduit par Choi. Les types de nanoparticules sont [33] :

- ✓ Métalliques : le cuivre (**Cu**), l'aluminium (**Al**), l'or (**Au**), l'argent (**Ag**).
- ✓ Oxydes : l'oxyde de cuivre (**CuO**) , l'oxyde de l'aluminium (**Al₂O₃**) , le de titane (**TiO₂**).
- ✓ Nanotubes de carbone.

Un nanofluide est une solution colloïdale contenant des particules solides de petite taille, désignée sous le terme de « nanoparticules », en suspension dans un liquide de base dont on veut modifier au progresser certaines de propriétés, notamment thermiques. Le choix des liquides de bases est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un telle fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule, les solvants plus utilisés sont :

- ✓ L'eau
- ✓ L'éthylène-glycol, EG
- ✓ Les huiles
- ✓ Le toluène

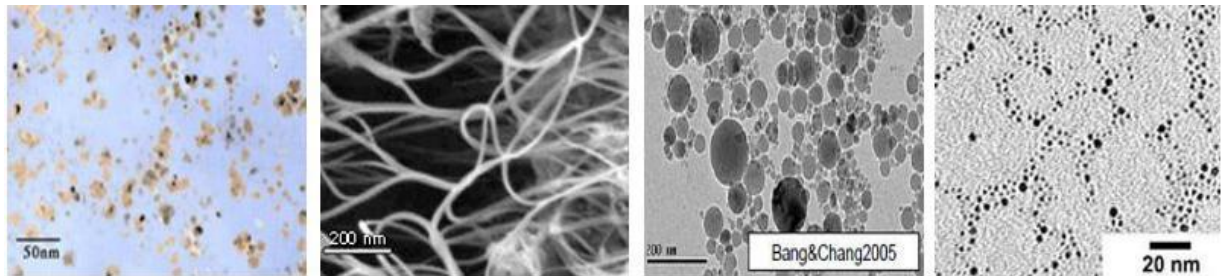


Figure II.1: Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau +nanotube ; eau + alumine ; eau + or à 2n

II.3. Préparation des nanofluides

Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories :

- Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- Les procédés chimique, comme la pyrolyse laser ou la précipitation chimique.

En outre, il existe deux méthodes principales pour produire des nanofluides :

A-La méthode en deux étapes

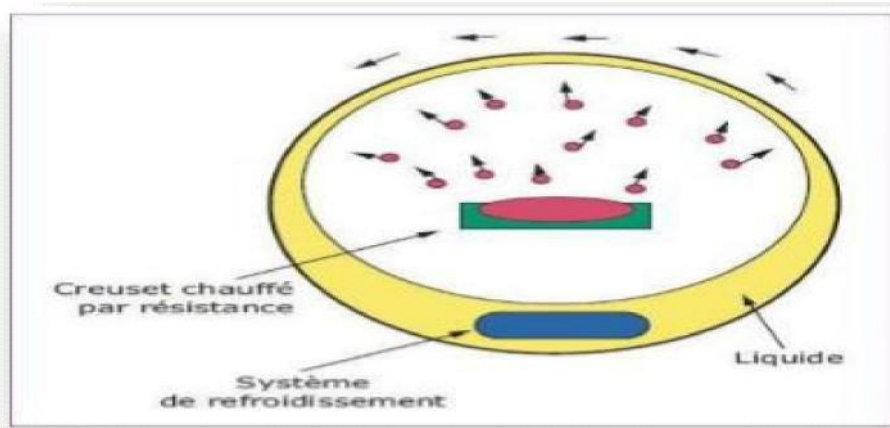
consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif au d'ultrason est souvent nécessaire afin de briser agglomérant. En outre, pour

éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le pH.

On peut également utiliser les forces de répulsion stérique à l'aide de molécule adsorbé ou greffées sur la surface.

B- La méthode en une seule étape

consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et plus la conductivité thermique du mélange est améliorée. Néanmoins, pour une famille de nanofluides donnée, les résultats de la littérature présentent une dispersion assez forte. Cette dispersion peut être attribuée au mode de synthèse des nanofluides et/ou à la méthode de mesure.



FigureII.2: Procèdes de synthèse des nanofluides en une seule étape [34]

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électromouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules Fonctionnalisées. En thermique, les nanofluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement de composants électriques et électroniques, radars, automobile...etc).

Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons **X** de forte puissance , ainsi que des Micro Electro Mechanical Systems [34].

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électromouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules Fonctionnalisées.

En thermique, les nanofluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement de composants électriques et électroniques, radars, automobile...etc).

II.4. Autres applications:

- L'échangeur de chaleur
- le refroidissement d'éléments électroniques (produire un nanofluide stable qui est compatible avec des circuits et des composants électroniques).
- Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulations de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pourraient entraîner une augmentation de l'efficacité énergétique des réfrigérateurs).
- Aéronautique et spatial
- Refroidissement des systèmes nucléaire.
- Transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique
- Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage stockage thermique).

II.5. Les avantages des nanofluides:

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides .
- Haute dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules .
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de Chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

II.6. Les inconvénients des nanofluides:

- Fortes pertes de charge.
- Erosion .
- Sédimentation.
- Bouchons dans les écoulements.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.

II.7. Domaines d'application des nano fluides

Les dispersions de nanoparticules trouvent de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétiques, électriques et thermiques. Ils sont présents dans les secteurs de l'environnement, de l'énergie, du textile, de la chimie, des cosmétiques, de la santé, de l'automobile, du bâtiment, etc. On les trouve aussi :

- Refroidissement des systèmes nucléaires, des composants électriques et électroniques.
- Transport (gestion de refroidissement / véhicule moteur thermique).
- Echangeurs de chaleur.
- Agents de contraste en imagerie médicale.
- Biomédecine.
- Autres applications : caloducs, piles à combustible, chauffage solaire de l'eau, refroidisseurs, réfrigérateurs domestiques, forages, lubrifiants, stockage thermique, ...

II.8. Propriétés thermo physiques des nanofluides

De nombreuses études ont été menées afin de mesurer, mais aussi d'expliquer et de prédire, l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides. Différentes méthodes de mesure de conductivité thermique ont été employées, la plus courante reste la méthode utilisant un fil chaud en régime transitoire. Néanmoins, compte tenu de la dispersion des résultats, des biais expérimentaux ont été suspectés et d'autres méthodes de mesure ont été utilisées, comme la méthode 3, les méthodes stationnaires utilisant une différence de température entre deux plaques ou deux cylindres et les méthodes optiques basées sur la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température [35].

II.8.1. la fraction volumique (ϕ)

La fraction volumique est un rapport sans dimension entre deux volumes, le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). La valeur de la fraction volumique est variée entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivant :

$$\phi = \frac{\text{volumesolid}}{\text{volumetotaledunanofluide}} = \frac{v_s}{v_s+v_f} \left(\frac{v_s}{v_s+v_f} \right) \quad (\text{II.1})$$

Où

vs : Volume des nanoparticules solides [m³].

vf: Volume du fluide de base [m³].

II.8.2. Conductivité thermique (k) :

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très importants dans le phénomène de transfert de chaleur, elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température. En plus de sa variation en fonction de la température, la conductivité thermique du nanofluide varié en fonction de la fraction volumique aussi, la conductivité thermique d'un nanofluide est calculée selon les deux modèles suivant :

A-Modèle de Maxwell :

Maxwell à présenter son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique de nanofluide, mais ce modèle est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, et que cette condition peut être considéré comme un point négative pour le modèle, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules du forme sphériques. Le modèle de Maxwell (1873) [36]est donné par la formule suivante :

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\varphi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\varphi} k_f \quad (\text{II.2})$$

Où

k_{nf}: La conductivité thermique du nanofluide.

k_f: La conductivité thermique du fluide de base.

k_s: La conductivité thermique des particules solides.

B-Modèle de Hamilton et Crosser :

Le modèle de Hamilton et Crosser (1962) [37]a été établi pour résoudre la limite de modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'a valable que dans le cas des particules sphériques une chose qui rend le modèle nos efficace pour la description du phénomène étudié. Pour cela le modèle du Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nanofluide quelque soit la forme de la nanoparticule, et ça en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité (). Ce facteur est définit comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivant :

$$k_{nf} = \frac{k_s + (n-1)k_f + (n-1)(k_f - k_s)\varphi}{k_s + (n-1)k_f - (k_f - k_s)\varphi} k_f \quad (\text{II.3})$$

Où (n) est un facteur de forme empirique donné par : $n = \frac{3}{\psi}$

$n=3$ pour les particules sphériques et $n=6$ pour les particules cylindriques.

Pour ($\psi=1$) (particules sphériques) le modèle de Hamilton et Crosser est identique au modèle de Maxwell.

C-Modèle de Yu et Choi

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi (2003)[38]. Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique. Cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. De plus, ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique est plus grande que la conductivité thermique de liquide. Ce modèle est donné par la formule suivante :

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1+\beta)^3\varphi}{k_s + 2k_f + 2(k_s + k_f)(1+\beta)^3\varphi} k_f \quad (\text{II.4})$$

Où β est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

D-Modèles corrélations semi-empirique

Il existe plusieurs corrélations semi-empiriques basées sur des résultats expérimentaux utilisées pour calculer la conductivité thermique des différents nanofluides:

$$k_{nf} = (28.905 \psi^2 + 2.8273 \psi + 1)k_f \quad \text{Pour le nanofluide (EG+Al}_2\text{O}_3) \quad (\text{II.5})$$

$$k_{nf} = (-13 \psi^2 + 6.3 \psi + 1)k_f \quad \text{Pour le nanofluide (Al}_2\text{O}_3\text{+eau)} \quad (\text{II.6})$$

$$k_{nf} = (11.6 \psi^2 + 9.6 \psi + 1)k_f \quad \text{Pour le nanofluide (Cu+eau)} \quad (\text{II.7})$$

$$k_{nf} = (7146 \psi^2 + 76.6 \psi + 1)k_f \quad \text{Pour le nanofluide (huile+ntc)} \quad (\text{II.8})$$

Les équations (II.5), (II.6), (II.7) et (II.8) sont des corrélations empiriques utilisées pour estimer la conductivité thermique des nanofluides (EG+Al₂O₃), (Al₂O₃+eau), le nanofluide (Cu+eau) et le nanofluide (huile+nanotube de carbone) respectivement.

II.8.3. Viscosité dynamique (μ)

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement.

On peut donc parler de la viscosité comme étant une mesure du frottement interne d'un fluide. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé.

La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nanofluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température.

Cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide. Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes :

A-Modèle d'Einstein

La viscosité dynamique d'un nanofluide est donnée par Einstein (1906) [39] pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivantes :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \quad (\text{II.9})$$

Où

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nanofluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

φ : La fraction volumique des nanoparticules.

B-Modèle de Brinkman :

Par contre, Brinkman (1952)[40] a étudié la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (\text{II.10})$$

II.8.4. La masse volumique ()

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique à une température donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange.

Dans le cas d'un mélange, la masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \left[\frac{m}{v} \right] = \frac{m_f + m_s}{v_f + v_s} = \frac{\rho_f v_f + \rho_s v_s}{v_f + v_s} \quad (\text{II.11})$$

A partir de la relation (II.1), on déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{II.12})$$

Où

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules.

II.8.5. La chaleur massique (Cp)

La chaleur massique ou la chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $c_p = dQ/mdt$. La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut citer les deux modèles suivantes :

A-Modèle du Pak et Cho

Pak et Cho (1998)(41) ont utilisé la formule suivante :

$$(c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(c_p)_f + \varphi(c_p)_s \quad (\text{II.13})$$

B-Modèle du Xuan et Roetzel

Xuan et Roetzel (2000) ont utilisé la formule suivante :

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s \quad (\text{II.14})$$

II.8.6. Coefficient d'expansion volumique ()

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation (II.12), on déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_s}{(1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_s} \quad (\text{II.15})$$

Où

β_{nf} : Le coefficient de dilatabilité du nanofluide.

β_f : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_s : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

Chapitre III

***Formulation Mathématique et
Simulation Numérique***

Chapitre III

Formulation Mathématique et Simulation Numérique

III.1. Introduction

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

III.2. Géométrie du problème

La géométrie configuration on considérée est illustrée sur la figure (III.1). Il s'agit d'un panneau photovoltaïque hybride fonctionnant avec une cellule photovoltaïque et un absorbeur à tube contenant un fluide qui est l'eau ensuite un nano fluide constitué respectivement des éléments suivants :

- Un vitrage : comme plaque supérieure
- Une cellule photovoltaïque : son rôle est de transformer le rayonnement solaire en électricité.
- Une plaque absorbante : emmagasiné la chaleur et la transférer vers le fluide caloporteur.
- Un tube dans lequel s'écoule le fluide caloporteur : (eau ou nano-fluide Cu/eau, TiO₂/eau) son rôle d'évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante
- Un isolant à l'arrière : pour minimiser les pertes thermiques

Notre configuration figure(III.2) c'est limité à un petit domaine pour faciliter la construction de la configuration et les simulations.

Dans notre problème, on s'intéresse à la convection thermique avec rayonnement solaire dans le tube du panneau lorsque ce dernier est soumis à une irradiation solaire sous les conditions normales. Dans ce chapitre on va formuler notre modèle mathématique, les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions initiales et aux limites appropriées à notre configuration.

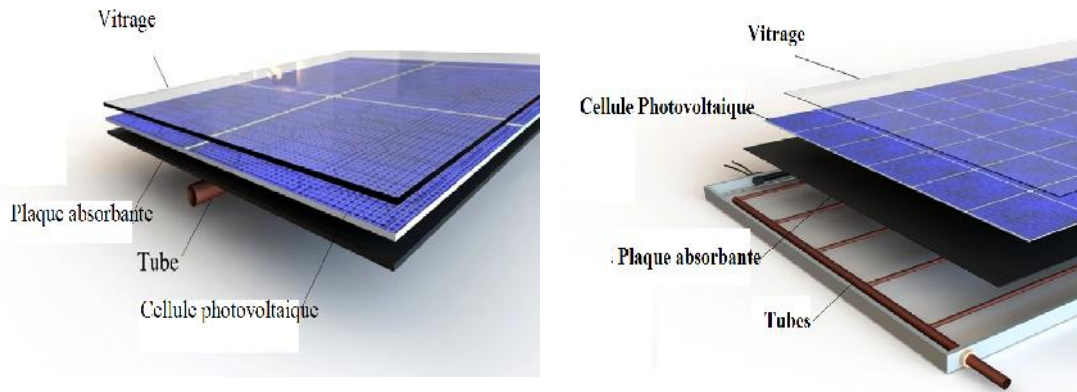


Figure III.1 : Photo du panneau PV et ces éléments

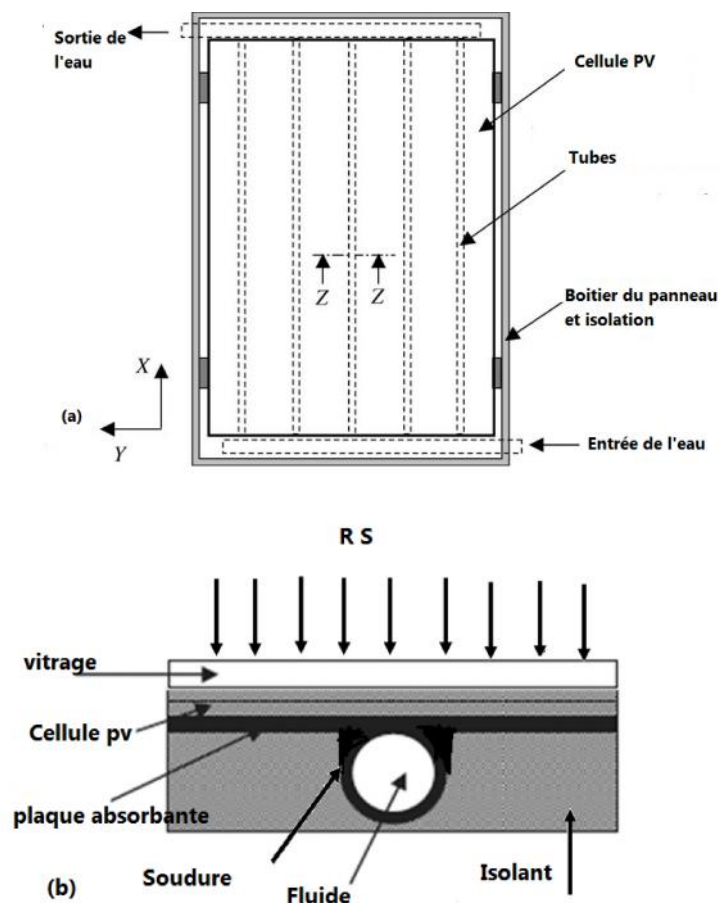


Figure III.2 : Vue de dessus du panneau PV (a), la géométrie étudiée (section z-z)

III.3. Hypothèses

A fin de simplifier la formulation mathématique de notre problème, nous adapterons les Hypothèses simplificatrices suivantes :

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

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

T_0 : Température de référence.

ρ_0 : Masse volumique du fluide.

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

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

ρ_0 : la masse volumique à T_0 .

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

III.4. Equations générales de conservation

Compte tenue les hypothèses simplificatrices formulées ci-dessus les équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement, d'énergie.ces équations en coordonnées cylindriques dans les directions ($\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$) s'écrivent comme suit :

➤ Équation de continuité

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

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

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

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

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

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

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

➤ **Équation d'énergie**

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

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

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

II-4.1. Equation représentatives pour le nano fluide

Les équations gouvernantes dans le cas d'un nano fluides sont identiques aux précédentes (III.1- III.2- III.3- III.4- III.5- III.6) sauf dans les propriétés du nano fluide et assumant les mêmes hypothèses ces équations s'écrivent comme suit :

➤ **Équation de continuité**

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{III.7})$$

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

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(u v)}{\partial y} + \frac{\partial(u w)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.8})$$

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

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.9})$$

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

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \beta_{nf} (T - T_0) \quad (\text{III.10}).$$

➤ **Équation d'énergie**

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} \right) = \left(\frac{K}{C_p} \right)_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.11}).$$

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

$$\rho_{nf} C_{p_{nf}} \left(\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \right) = k_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho_{nf} C_{p_{nf}}} \mathbf{q}_r \quad (\text{III.12}).$$

Propriétés physiques du nano fluide sont exprimées par les relations suivantes :

- **La densité volumique**

$$\rho_{nf} = (1-\varphi) \rho_f + \varphi \rho_s \quad (\text{III.13}).$$

- **La chaleur spécifique**

D'après modèle du Pak et Cho

$$c_{p_{nf}} = (1-\varphi) C_{p_f} + \varphi (C_p)_s \quad (\text{III.14}).$$

- **Le coefficient de dilatation volumique**

Modèle du Pak et Cho

$$\beta_{nf} = (1-\varphi) \beta_f + \varphi \beta_s \quad (\text{III.15}).$$

- **La conductivité thermique**

Modèle de Hamilton et Crosser

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_s)\phi}{K_s + (n-1)K_f + (K_f - K_s)\phi} K_f \quad (\text{III.16}).$$

- **Viscosité dynamique**

Pour la viscosité la formule utilisée est celle du modèle de **Brinkman**

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (\text{III.17}).$$

III.5. Le couplage convection-rayonnement :

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

III.5.1. Modèle de transfert radiatif de Rosseland

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

III.5.2. Equation de modèle Rosseland

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

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (\text{III.18}).$$

est donnée par l'équation suivante

$$\Gamma = \frac{1}{(3(a+\sigma_s) - c\sigma_s)} \quad (\text{III.19}).$$

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

$$G = 4 n^2 T^4 \quad (\text{III.20}).$$

Où n est l'indice de réfraction.

$$q_r = -16 n^2 T^3 \nabla T \quad (\text{III.21}).$$

III.6. Bilan thermique du capteur hybride PV/T à base

➤ Pour le vitrage :

$$M_v C_{pv} \left(\frac{dT_v}{dt} \right) = P_v A_v - h_{rv} (T_{ciel} - T_v) A_v - h_{vv} (T_a - T_v) A_v - h_{cv} (T_{Pvc} - T_v) A_v \quad (III.22).$$

Avec:

M_v : Masse du vitrage, (kg)

C_{pv} : Chaleur spécifique du vitrage, (J/kg .K)

A_v : Surface de la vitre, (m²)

P_v : Quantité d'énergie absorbée pour le vitrage, (W/m²)

h_{vv} : Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'ambiance, (W/m².K)

h_{rv} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel, (W/m².K)

h_{Pvcv} : Coefficient d'échange thermique par conduction entre la vitre et la Pvc, (W/m².K)

T_v : Température du vitrage, (K)

T_a : Température ambiante (K)

T_{Pvc} : Température de la Pvc, (K)

T_{ciel} : Température du ciel (K)

La puissance absorbée par le vitrage P_v est calculée par l'équation suivante [42]:

$$P_v = p_{glob} \times \alpha_v \quad (III.23).$$

Tel que:

P_{glob} : représente l'intensité de rayonnement global incident sur un plan incliné, cette quantité est estimée par la méthode développée [42].

α_v : Représente le coefficient d'absorption du vitrage

➤ Pour la Pvc :

$$M_{Pvc} C_{pPvc} \left(\frac{dT_{Pvc}}{dt} \right) = P_{Pvc} \cdot A_{Pvc} + h_{Pvcv} (T_v - T_{Pvc}) A_{abs} + h_{cPvc} (T_{abs} - T_{Pvc}) A_{Pvc} - Q_{ele} \cdot A_{Pvc} \quad (III.24).$$

Avec:

M_{Pvc} : Masse de la pvc, (kg).

C_{pPvc} : Chaleur spécifique de la Pvc, (J/ kg.K).

A_{Pvc} : Surface de la Pvc, (m²).

h_{cPvc} : Coefficient d'échange thermique par conduction entre la Pvc et l'absorbeur, (W/m².K)

T_{abs} : Température de l'absorbeur, (K)

La quantité d'énergie solaire P_{pvc} (W/m²), absorbée par la Pvc, est donnée par l'expression suivante [43]:

$$P_{Pvc} = \tau_v \times \alpha_{Pvc} \times \beta_{Pvc} \times P_{glob} \quad (III.25).$$

Avec:

α_{Pvc} : Coefficient d'absorption de la Pvc

β_{Pvc} : Facteur remplissage, qui représente le rapport entre la surface couverte par les Pvc et la surface totale du module PV. D'après Tiwari et al, 2007 [44], ce facteur est inférieur à l'unité et il a une valeur maximale lorsque toute la zone est couverte par une cellule solaire (cellule solaire rectangulaire).

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre

La puissance électrique Q_{ele} (W/m²), produite par la Pvc est donnée par la formule suivante [44]:

$$Q_{ele} = n_{ele} \times P_{glob} \times \beta_{Pvc} \times \tau_v \quad (III.26).$$

Avec:

n_{ele} : Rendement électrique de la Pvc.

➤ Pour l'absorbeur

$$M_{abs} C_{p_{abs}} \left(\frac{dT_{abs}}{dt} \right) = h_{cc} (T_{Pvc} - T_{abs}) A_{Pvc} + h_{vabs} (T_f - T_{abs}) A_{abs} + h_{rabs} (T_{is} - T_{abs}) A_{abs} + A_{abs} \times P_{abs} \quad (III.27).$$

M_{abs} : Masse de l'absorbeur, (kg)

$C_{p_{abs}}$: Chaleur spécifique du absorbeur, (J/ kg.K)

A_{abs} : Surface de l'absorbeur, (m²)

h_{vabs} : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'absorbeur et le fluide, (W/m².K)

h_{rabs} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et l'isolant, (W/m².K)

T_f et T_{is} : Représente ent respectivement la température du fluide et de l'isolation, (K)

La puissance absorbée par l'absorbeur P_{abs} (W/m²) est donnée par la relation suivante [43]:

$$P_{abs} = \tau_v \times (1 - \beta_{Pvc}) \times \alpha_{abs} \times P_{glob} \quad (III.28).$$

Avec:

α_{abs} : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

➤ **Pour l'écoulement de l'eau dans le conduit**

$$M_f C_{p_f \text{ eau}} \left(\frac{dT_f}{dt} \right) = h_{vabs} (T_{abs} - T_f) A_{abs} + h_{vis} (T_{is} - T_f) A_{is} - \dot{m} C_{p_f \text{ eau}} (T_{sortie} - T_{entree}) A_f \quad (III.29).$$

Avec:

M_f : Masse du fluide, (kg)

$C_{p \text{ eau}}$: Chaleur spécifique du fluide, (J/ kg.K)

A_f : Surface traversée par le fluide, (m²)

h_{vis} : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'eau et l'isolant, (W/m².K)

T_{entree} et T_{sortie} : Représentent respectivement la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du canal, (K)

\dot{m} : Débit massique de l'eau, (kg/s).

➤ **Pour l'isolant**

$$M_{is} C_{p_{is}} \left(\frac{dT_{is}}{dt} \right) = h_{vis} (T_f - T_{is}) A_{is} + (h_{ci} + h_{va}) (T_a - T_{is}) A_{is} + h_{rabs} (T_{abs} - T_{is}) A_{is} + A_{is} \times h_{ra} (T_{sol} - T_{is}) \quad (III.30).$$

Avec:

M_{is} : Masse de l'isolant, (kg)

C_{is} : Chaleur spécifique de l'isolant, (J /kg.K)

A_{bis} : Surface de l'isolant, (m²)

h_{ci} : Coefficient d'échange thermique par conduction à travers l'isolant, (W/m².K)

h_{ra} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol, (W/m².K)

h_{va} : Coefficient d'échange thermique par convection de l'air qui se trouve entre l'isolant et le sol, (W/m².K)

T_{sol} : Température du sol, (K)

III. 7 .Les coefficients des échanges thermiques :

Les échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement dans le système hybride a étudié, nécessitent la détermination des différents coefficients de transfert thermique.

➤ **L'échange thermique par conduction**

Généralement le coefficient d'échange thermique par conduction unidimensionnelle est donné par la formule suivante:

$$h_c = \frac{k}{e} \quad (\text{III.31}).$$

Avec :

e : Epaisseur de la paroi,(m)

k : Conductivité thermique du matériau, (W /m.K)

Le coefficient d'échange thermique par conduction entre la Pvc et le verre

$$h_{pvcv} = \frac{k_v}{e_v} \quad (\text{III.32}).$$

k_v et e_v : Représentent respectivement la conductivité thermique et l'épaisseur du vitrage.

h_{pvcv} : Le coefficient d'échange thermique par conduction entre la Pvc et le absorbeur peut être calculé par :

$$h_{cpvc} = \frac{k_{pvc}}{e_{pvc}} + \frac{k_{abs}}{e_{abs}} \quad (\text{III.33}).$$

k_{pvc} , k_{abs} et e_{pvc} , e_{abs} :Sont respectivement les conductivités thermiques et les épaisseurs de la Pvc et le absorbeur.

Le coefficient d'échange thermique par conduction dans l'isolant est calculé par :

$$h_{ci} = \frac{k_i}{e_i} \quad (\text{III.34}).$$

k_i et e_i : Représentent respectivement la conductivité thermique et l'épaisseur de l'isolant.

➤ **L'échange thermique par rayonnement :**

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitrage et le ciel peut être exprimé par Swin bank par la relation suivante [45] :

$$h_{rv} = \sigma \epsilon_v (T_v^4 - T_{ciel}^4) / (T_v - T_a) \quad (\text{III.35}).$$

Avec:

σ : Constante de Stephan Boltzmann, $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

ϵ_v : Emissivité du vitrage

Selon **Ong** ,1995 [46], Température du ciel est évaluée par la relation suivante :

$$T_{\text{ciel}} = 0,0552(T_a)^{1,5} \quad (\text{III.36}).$$

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et l'isolation peut être exprimé par [45]:

$$h_{\text{rt}} = \sigma(T_{\text{abs}} + T_{\text{is}})(T_{\text{abs}}^2 + T_{\text{is}}^2) / \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{is}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{abs}}} - 1 \right) \quad (\text{III.37}).$$

Avec :

ϵ_{is} et ϵ_{abs} : Représentent respectivement l'émissivité de l'isolant et le absorbeur Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol peut être calculé par:

$$h_{\text{ra}} = \sigma\epsilon_{\text{is}}(T_{\text{sol}} + T_{\text{is}})(T_{\text{sol}}^2 + T_{\text{is}}^2) \quad (\text{III.38}).$$

➤ L'échange thermique par convection

Les coefficients d'échange thermiques par convection sont calculés par les corrélations empiriques utilisant le nombre de Nusselt, de la conductivité thermique de l'eau et d'une longueur caractéristique du canal (L_c) qui est dans ce cas un canal rectangulaire, est présentée par un diamètre hydraulique, noté (D_h). En l'espèce, la convection forcée est mise en jeu entre deux plaques parallèles et un fluide à l'intérieur d'un canal. Pour cela on a utilisé des corrélations expérimentales, en définissant le nombre de Reynold, de Prandtl et de Nusselt [45,47].

Les coefficients d'échange thermique par convection sont calculés par la relation suivante :

$$h_{\text{vt}} = h_{\text{vis}} = Nu \times \frac{k_{\text{eau}}}{D_h} \quad (\text{III.39}).$$

Avec:

K_{eau} : Conductivité thermique de l'eau, (W/ m .K)

D_h : Diamètre hydraulique du canal, (m)

$$Nu = 0,023 \times Re_{\text{eau}}^{0,8} \times Pr_{\text{eau}}^{0,4} \quad (\text{III.40}).$$

Avec :

Pr_{eau} : Nombre de Prandtl

Re_{eau} : Nombre de Reynolds de l'eau

$Re_e = 800$

III.8. Procédure de résolution numérique

Pour résoudre les équations représentatives du mouvement, il est indispensable d'utiliser un outil numérique convenable à cet effet.

Pour réaliser nos simulations nous avons utilisé le code de calcul « **Fluent** » 6.3.26 qui utilise la méthode des volumes finis. Le préprocesseur **Gambit** a été utilisé pour faire la construction de la géométrie, génération de maillage et l'incorporation des conditions aux limites.

III.9. Définition de la CFD « Computational Fluid Dynamics » :

La CFD "Computational Fluid Dynamics" « Dynamique des Fluides Numérique », est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique. Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides (les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes) que l'on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique., résolues par des méthodes numériques. FLUENT peut modéliser les phénomènes suivants:

- Écoulement dans des géométries 2D ou 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés.

III.10. Présentation des logiciels Gambit et Fluent

III.10.1. Préprocesseur Gambit

C'est un préprocesseur intégré pour l'analyse en CFD (computational fluid Dynamics), il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques, Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle. Les options de génération de maillage de Gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré. Sinon, Gambit génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite. Le préprocesseur permet aussi de définir les conditions aux limites appropriées aux frontières du domaine de calcul. Il existe deux méthodes possibles pour réaliser le maillage sur GAMBIT:

- ✓ Soit avoir un volume et le mailler régulièrement sans avoir maillé les arêtes,
- ✓ Soit mailler partie par partie, c'est-à-dire utiliser le maillage défini sur les lignes pour mailler les surfaces et par la suite les volumes.

C'est le deuxième type de maillage que nous avons choisi.

III.10.2. Code Fluent

Fluent est un logiciel de calculs numériques en dynamique des fluides CFD (Computational Fluid Dynamics) destiné à effectuer des simulations numériques des problèmes d'écoulements fluides. Le package Fluent s'appuie sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations régissant le mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents tels que :

- Ecoulements 2D ou 3D ;
- Ecoulement stationnaire ou in stationnaire ;
- Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) ;
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- Fluide Newtonien ou non ;
- Transfert de chaleur par conduction, par convection ou les deux(Conjugué) ou radiatif
- Ecoulement avec changements de phases ;
- Ecoulements au milieu poreux.

L'ensemble géométrie et génération de maillage se fait à l'aide du logiciel Gambit qui constitue un

III.10.3. Les avantages de fluent (CFD)

- ✓ Perspicacité et précision
- ✓ Prévoyance
- ✓ Efficacité et rapidité
- ✓ Facilité d'utilisation
- ✓ Puissante de visualisation

III.11. Etapes principales de simulation

Ce sont des démarches qui constituent les pas essentiels pour se servir de la meilleure façon de Fluent et de son générateur de maille Gambit:

- ✓ Lancement de Gambit
- ✓ Construction du domaine physique
- ✓ Exportation du fichier à Fluent
- ✓ Lancement de Fluent
- ✓ Lecteur du fichier .mesh
- ✓ Imposition des conditions physiques et spatiales
- ✓ Contrôle de la convergence
- ✓ Affichage des résultats

III.12. La conception du domaine physique

III.12.1 Création de la géométrie

Le chemin d'application de gambit est le suivant :

C: /Fluent .Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe

Vous pouvez créer un raccourci dans la barre des tâches. S'il y a un problème d'exécution, Supprimer tous les fichiers « .Lok » dans le répertoire

C: /Fluent.Ic/ntbin/ntx86 et relancer Gambit.exe.

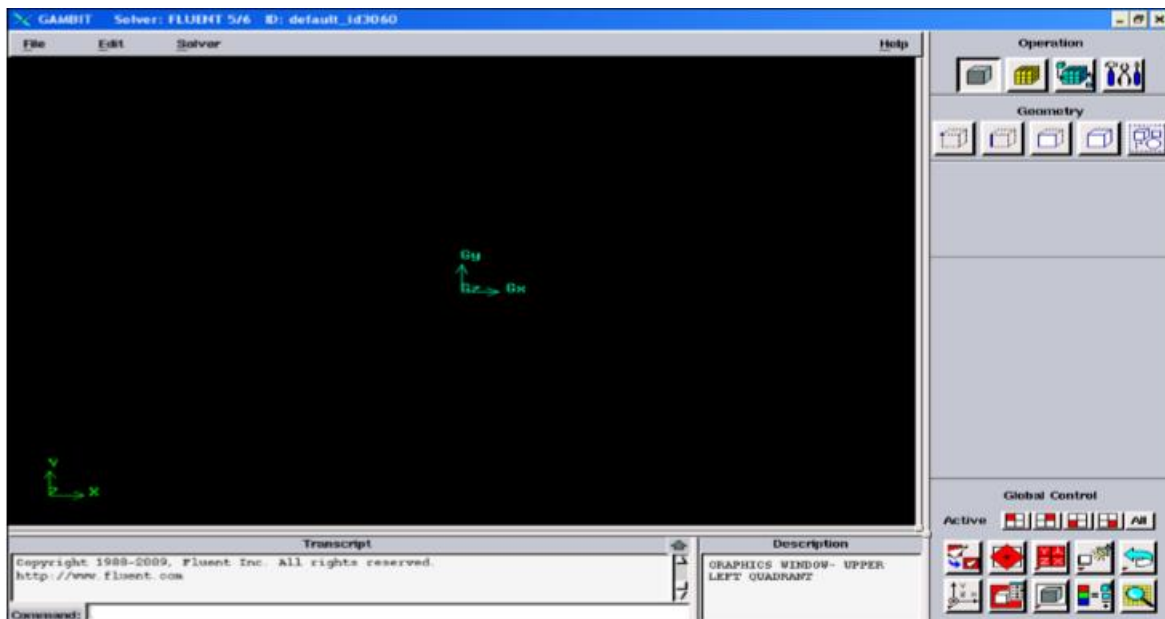


Fig. III.3: vue globale de Gambit.

III.12.2. Création d'une face rectangulaire

Appuyer sur les boutons suivant successivement pour créer une face rectangulaire



Fig. III.4 : Création d'une face rectangulaire.

III.12.3. Création des faces circulaires

Appuyer sur les boutons suivant successivement pour créer une face circulaire :



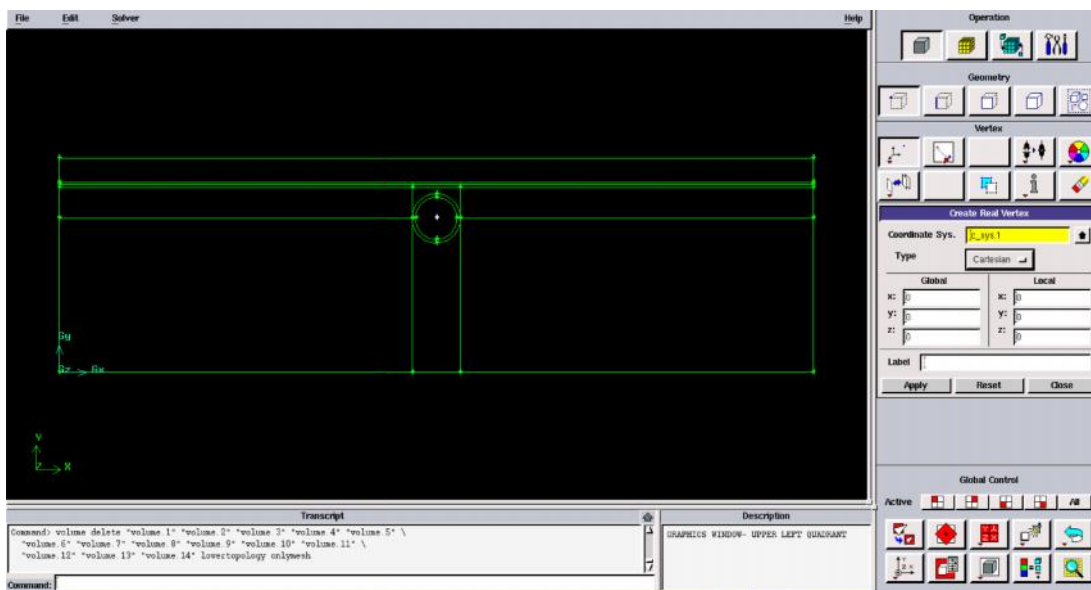
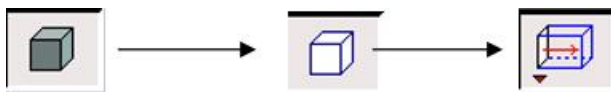


Fig. III.5 : Création des faces circulaires.

III.12.4. Création des volumes :

Appuyer sur les boutons ci-dessous successivement pour la création des volumes.



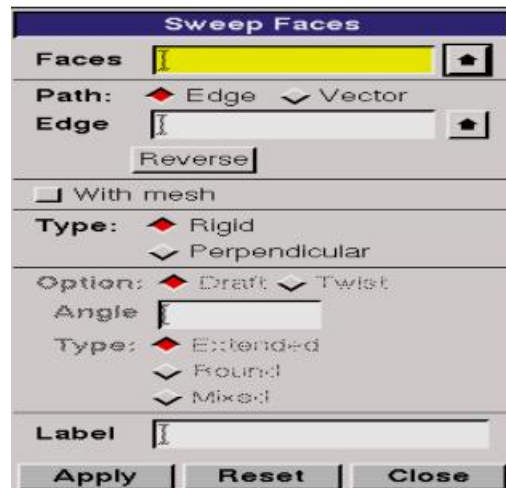


Fig. III.6 : Création des volumes

III .12.5. Création d'un trou dans une ailette circulaire

Création d'un cylindre et application de la soustraction des volumes:

- Création d'un cylindre dans l'axe z positive:

Appuyer sur les boutons suivant successivement

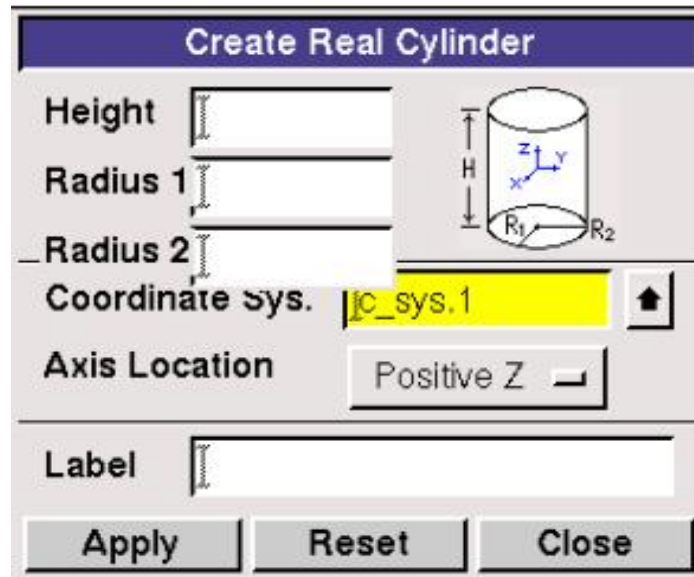


Fig. III.7 : Création d'un cylindre dans l'axe z positive

- Soustraction des volumes:

Appuyer sur les boutons ci-dessous successivement pour la Soustraction des volumes.

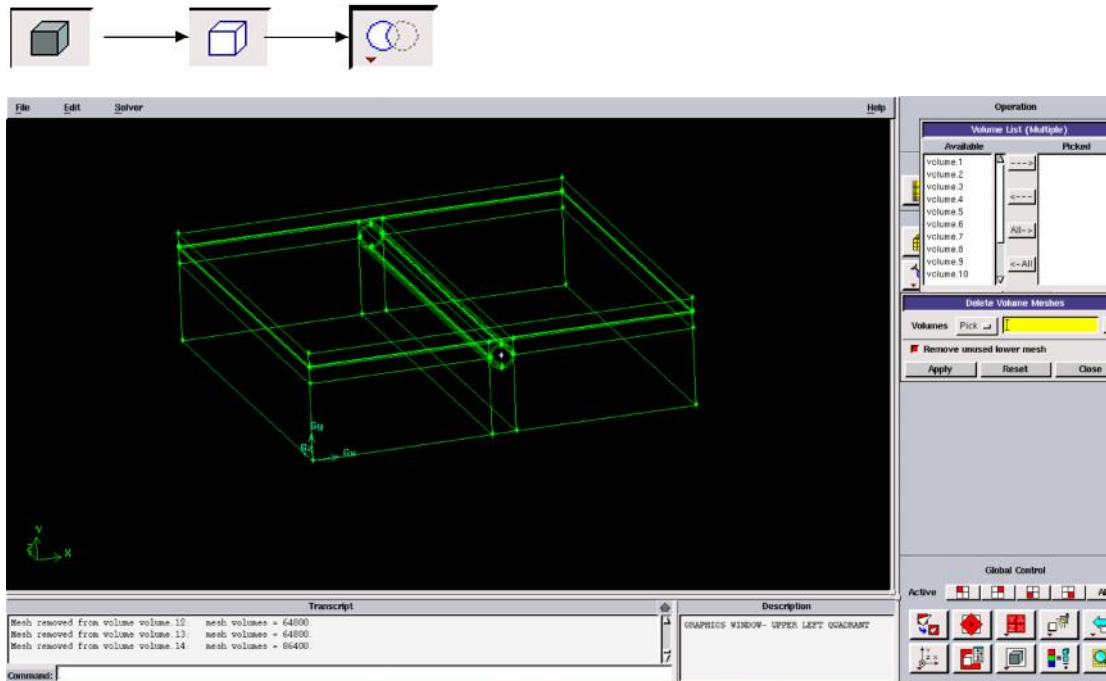


Fig. III.8: Soustraction des volumes.

III.12.6. Le maillage du domaine physique:

C'est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud, ou on trouve les composantes u , v et w du vecteur vitesse qui se trouve au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points.

III.12.6.1. Maillage des lignes (edges):

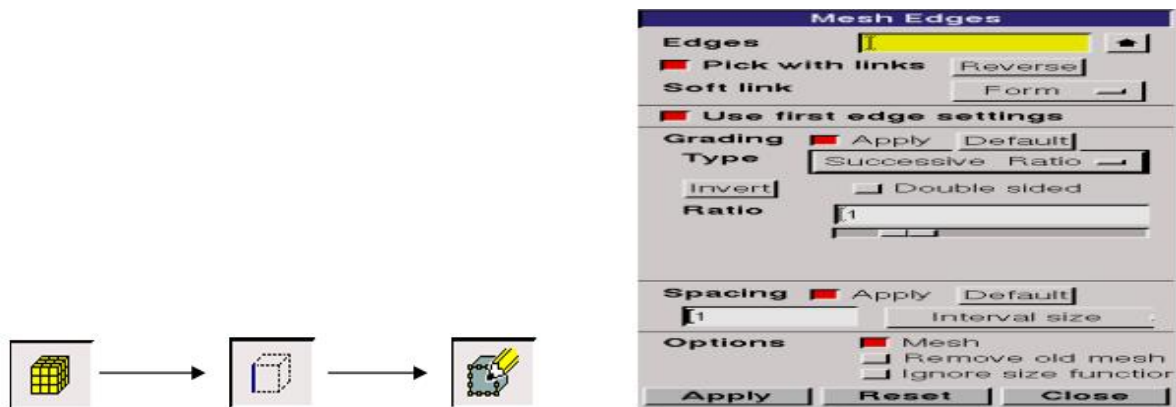


Fig. III.9 : Maillage des lignes (edges)

III.12.6.2 Maillage des volumes:

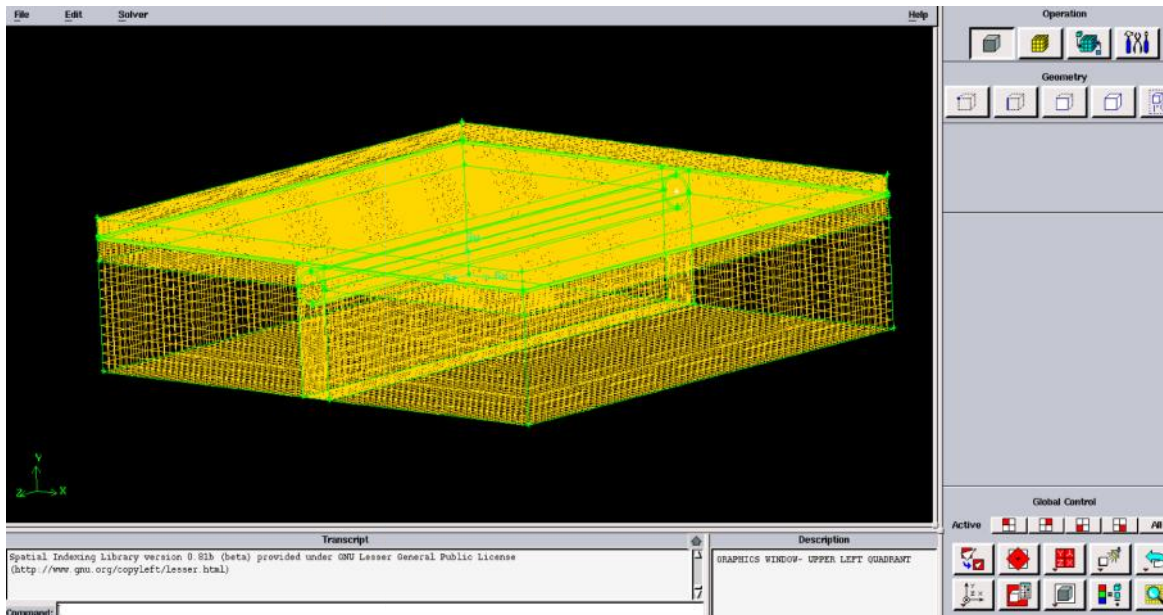


Fig.III.10: Maillage des volumes.

III.12.7. Condition aux limites

Une fois que la géométrie et le maillage du domaine physique étudié sont définis, nous spécifierons les zones géométriques sur lesquelles nous allons appliquer les conditions aux limites.

Le logiciel GAMBIT propose différents types de conditions aux limites. Nous en utilisons trois : vitesse d'entrée, condition de parois, condition à la sortie.

La première condition aux limites " **velocity inlet** " correspond à une vitesse et une température imposées à l'entrée du domaine ,

La deuxième condition aux limites est de type " **wall** ",

La troisième condition aux limites est " **pressure outlet**",

-Détermination des zones fluides et des zones solides.



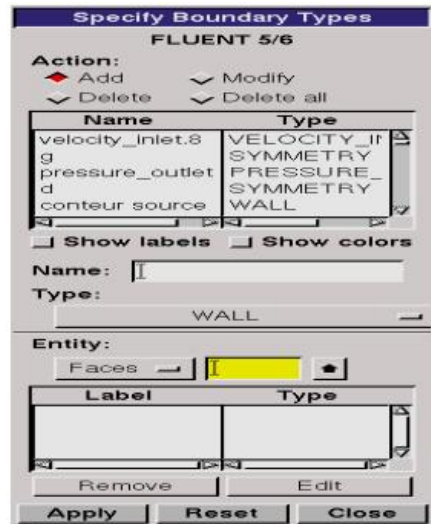
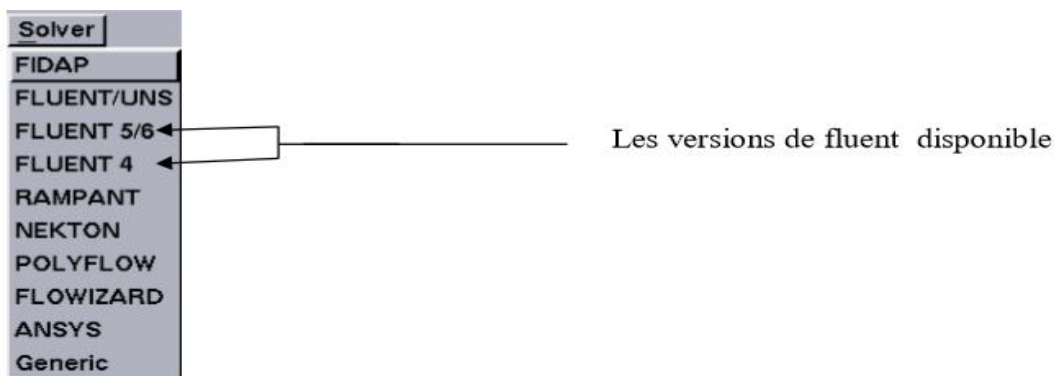


Fig. III.11 : Conditions aux limites.

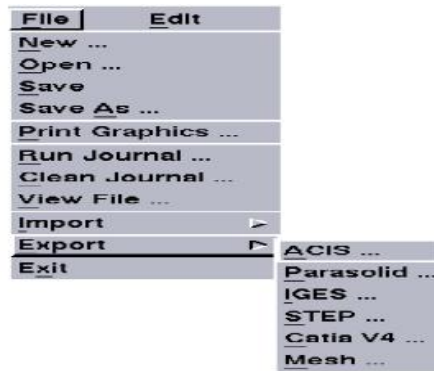
III.12.8. Choix de la version Fluent:

On peut choisir la version disponible de Fluent depuis Gambit comme suit:



III.12.9. L'exportation du fichier M_{sh} :

Une fois que la géométrie a été créée, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, depuis le préprocesseur Gambit vers le solveur Fluent en format M_{sh} (M_{sh} = maillage en anglais) pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser.



III.12.10. Types des fichiers qui sont créés par gambit

Quatre fichiers sont créés par défaut :

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

III.13. La procédure de calcul par Fluent

III.13.1. Démarrage de Fluent

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

Les étapes de simulation sous Fluent sont les suivantes :

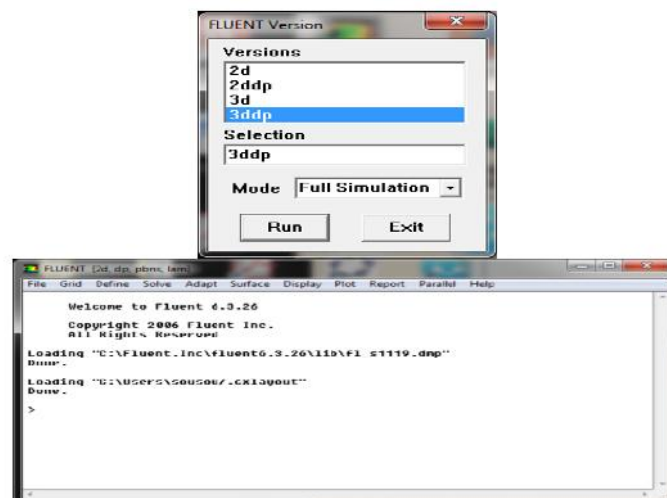


Fig. III.12: Vue globale de Fluent .

III.13.2. Lire le fichier dissipateur.msh

File > Read > Case

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

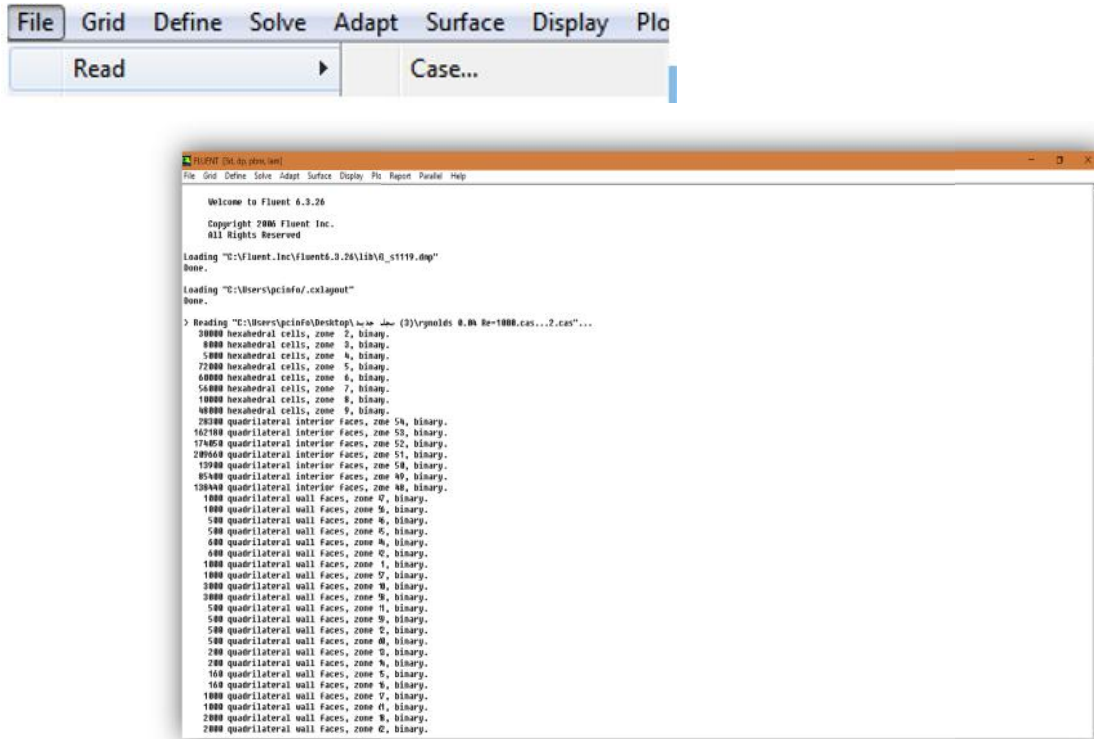
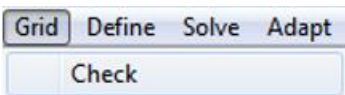


Fig. III.13: Importation de la géométrie.

III.13.3. Vérification du maillage

Grid > Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.



III.13.4. Lissage du maillage

Grid > smooth/swap

Pour s'assurer de la qualité de maillage, il est pratique de lisser le maillage. Cliquer sur le bouton Smooth puis sur le bouton Swap.

Répéter jusqu'à ce que Fluent affiche que zéro faces sont swapped.

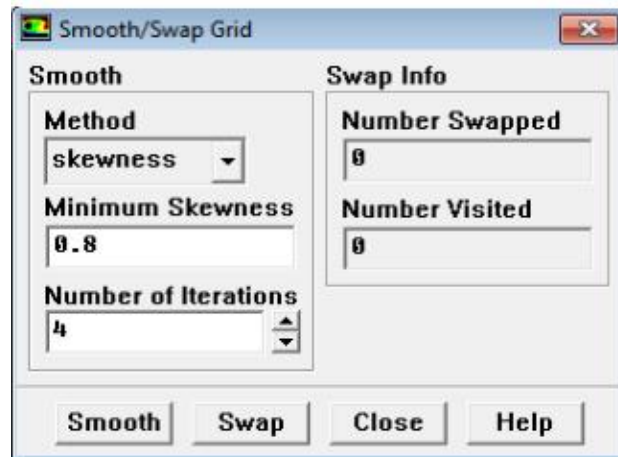


Fig. III.14 : vérifier la qualité de maillage

III.13.5. Vérifier l'échelle

Grid>Scale

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

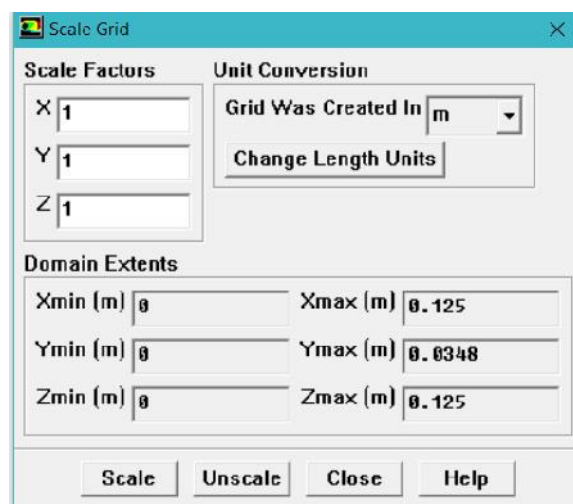


Fig. III.15: vérification de l'échelle

III.13.6. Présentation de la géométrie

Display >Grid

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

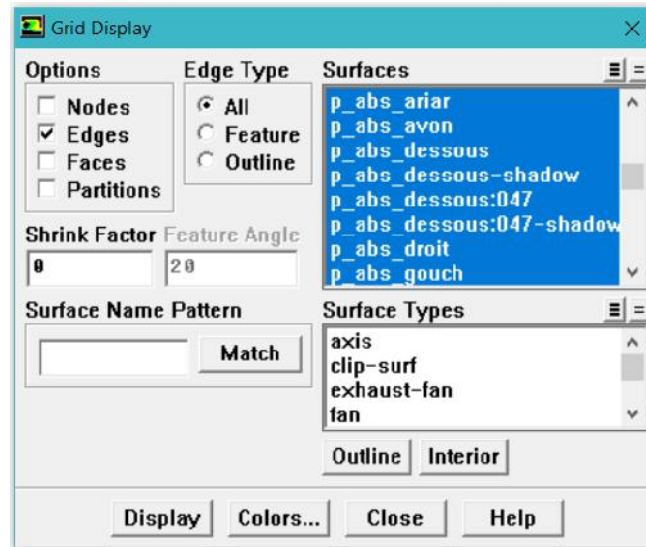


Fig. III.16: Affichage de la grille et vérification des conditions aux limites.

III.13.7. Choix du solveur

Define>Models>Solver

Sous "Fluent", on peut choisir entre plusieurs formulations du solveur:

- La formulation "Segregated", ou isolée (implicite) : Cette formulation résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et quand c'est nécessaire celle de l'énergie séquentiellement, c'est-à-dire isolées les unes des autres (implicite par défaut).

Le solveur isolé est classiquement employé pour les écoulements incompressibles à modérément compressibles.

- La formulation "Coupled", ou couplée (implicite ou explicite) : cette option permet aux équations gouvernantes d'être résolues simultanément, c'est-à-dire couplées les unes avec les autres. Cependant, les autres scalaires, tels que les quantités de la turbulence, sont traités isolément. Initialement, ce mode a été conçu pour les écoulements compressibles à grandes vitesses.

Ceci lui donne un avantage pour le traitement des écoulements hautement couplés (forte interdépendance entre la densité, l'énergie et les moments) avec des forces de volumes (ex. flottabilité et forces de rotation). Il faut signaler que le solveur couplé implicite requiert presque le double de la mémoire qu'utiliserait le solveur isolé, alors que le solveur couplé explicite vient au milieu, en terme de besoins en ressources, mais converge plus lentement que la formulation implicite et n'est conseillé que pour les écoulements in stationnaires.

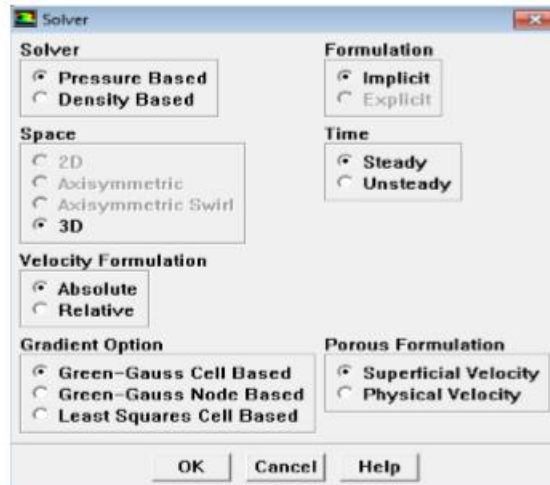


Fig. III.17 : Choix de solveur.

III.13.8. Autorisation du transfert de chaleur

Define>Models>Energy

Formulation de l'équation d'énergie

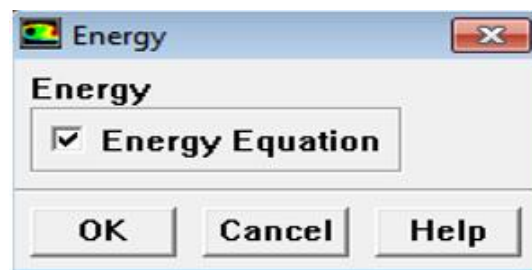


Fig. III.18: Autorisation l'équation de l'énergie.

III.13.9. Choix du type d'écoulement:

Define >Models>Viscous

En écoulement laminaire est l'option par défaut. Nous n'avons donc pas besoin de changer

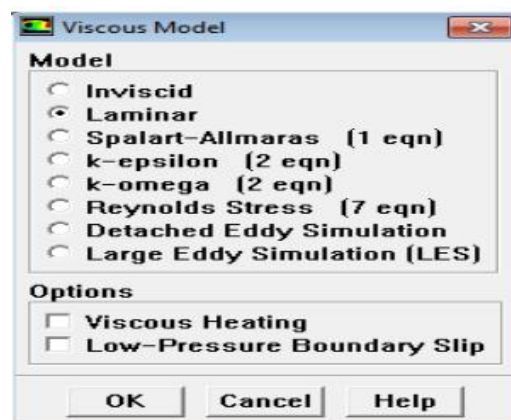


Fig. III.19: Choix du type d'écoulement.

III.13.10 Choix du modèle de rayonnement

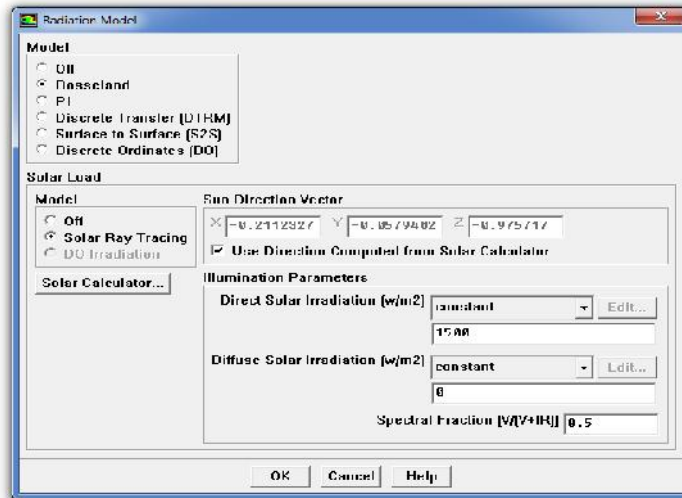


Figure. III.20: Choix du modèle de rayonnement

III.13.11 Définir la position pour le calcul solaire

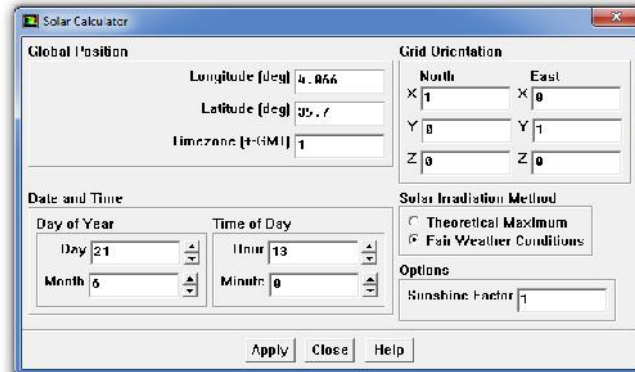


Figure. III.21: Calculs solaires

III.13.12. Définir les propriétés des matériaux :

Define >Materials...

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

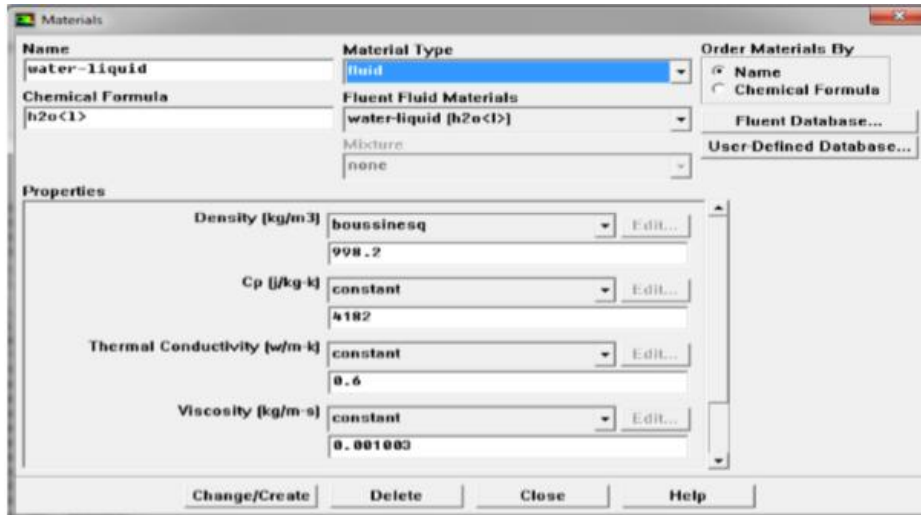


Fig. III.22 : Définir les propriétés physiques des matériaux

Les matériaux et le fluide utilisés pour notre étude sont choisis à partir de la banque de données dans Fluent.

-Nous avons utilisé deux types de fluide l'eau et les nano fluides (eau+TiO₃ et eau+Cu).

- Les matériaux utilisés : pour le dissipateur de chaleur c'est l'aluminium et le silicium pour le composant électronique. L'aluminium existe par défaut dans la banque de données de Fluent, nous avons ajouté le silicium et ses propriétés physiques dans la base de données de Fluent.

III.13.13. Définir les conditions aux limites

Define>Operating condition

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

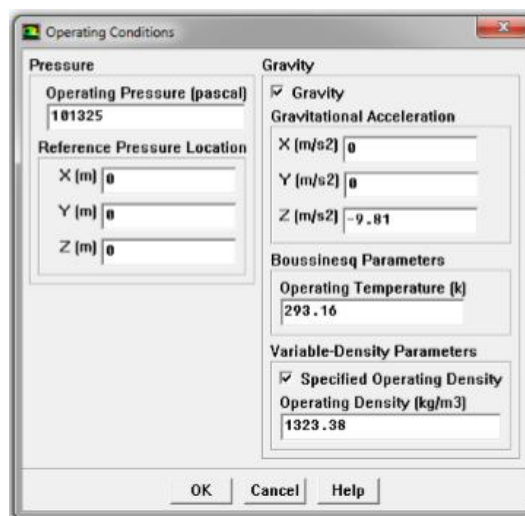


Fig. III.23 : Choix de la pression de référence.

Define>Boundary Conditions...

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

Il faut fixer les conditions aux limites:

-Velocity inlet: utilisée pour les écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue. Nous avons défini une vitesse d'entrée qui correspond aux nombres de Reynolds $50 < Re < 500$. La température à l'entrée $T_0=20^\circ\text{C}=293.16\text{K}$.

-Pressure outlet: spécifié la pression statique de sortie.

L'utilisation de pressure outlet sert à définir la pression statique de la sortie, l'utilisation de la condition pressure outlet au lieu de outflow a souvent comme conséquence une meilleure convergence.

-Wall: est utilisé pour délimiter les régions solides des fluides, en générale on utilise les propriétés d'une paroi lisse.

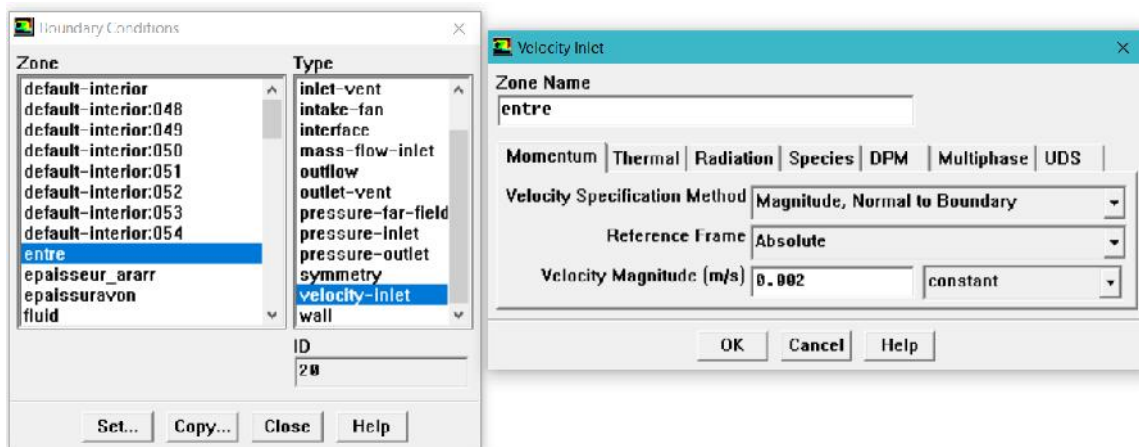


Fig. III.24: Valeurs des conditions aux limites.

III.13.14. Les facteurs de sous- relaxation

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

$$\Phi^{old} + \alpha \Delta \Phi = ne \text{ w}$$

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

Les valeurs de sous-relaxation sont données dans le tableau suivant:

	pression	Quantité de mouvement	Energie	Densité
Modèle laminaire	0.2	0.6	1	1

Tableau III.1 Les facteurs de sous relaxation.

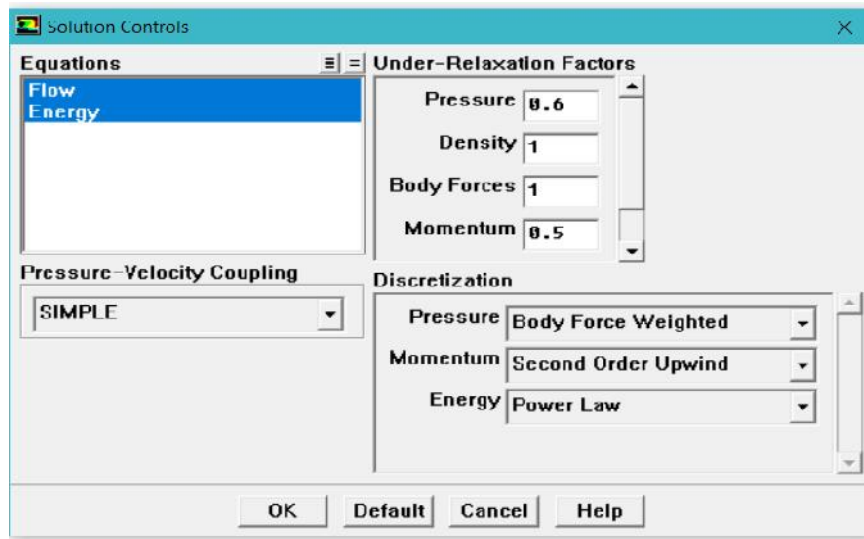


Fig.III.25 : Choix des facteurs de sous relaxation et les schémas de discrétisation

III.13.15. Initialisation du calcul

Solve>Initialize>Initialize...

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

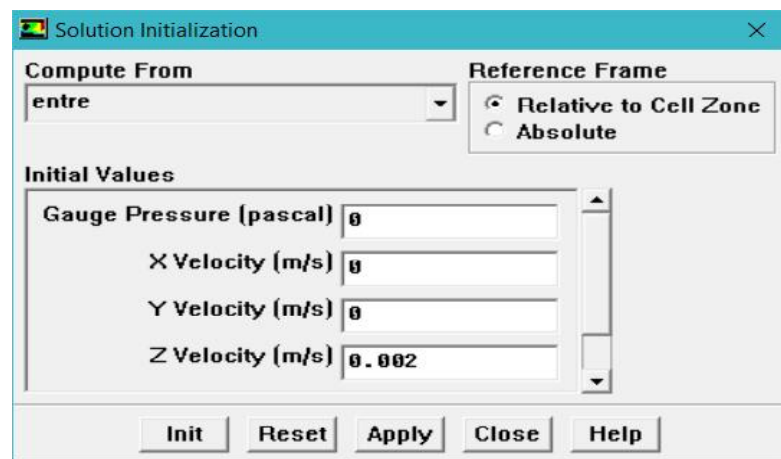


Fig. III.26: Initialisation de la solution.

III.13.16. Choix du résidu

Solve > Monitors > Residual...

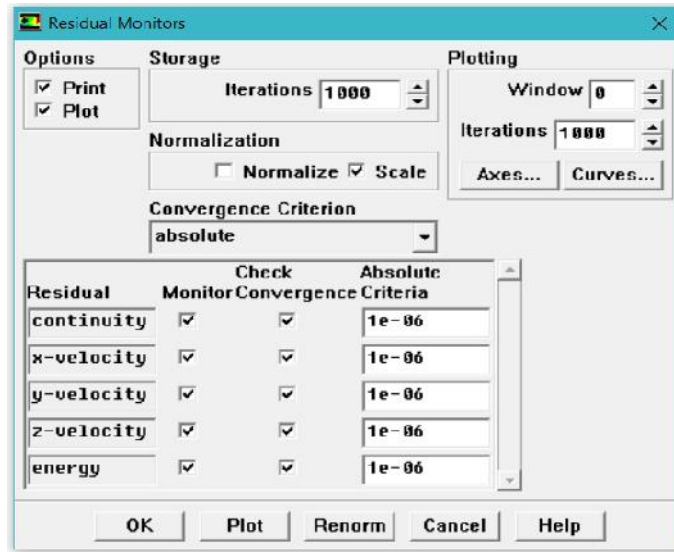


Fig.III.27: Choix des résidus.

Pour activer le tracé des résidus et observer la convergence de notre solution on sélectionne print et plot. En général une décroissance en magnitude des résidus indique une convergence au moins qualitative.

III.13.17. Critère de convergence:

A chaque itération, Fluent permet de juger de l'état de la convergence par le biais du calcul des résidus $R\phi$ pour chaque variable (pression, composantes de vitesse, fractions massiques des composés...).

Par définition, $R\phi$ peut s'écrire :

$$R\phi = \frac{\text{maillon}(\sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + S_a - a_p\phi_p)}{\sum_{million} a_p\phi_p} < \varepsilon \quad (\text{III.40}).$$

Ces résidus nous renseignent sur le degré de déséquilibre de l'équation associée à chaque variable sur toutes les mailles du domaine. La convergence est déterminée à partir de ces résidus. Il est conseillé d'examiner d'une part, les résidus ainsi que leur évolution et d'autre part, les valeurs des quantités calculées. Le choix adéquat des conditions initiales permet d'atteindre une convergence accélérée et une solution stable.

III.13.18. Calcul

Solve > Iterate :

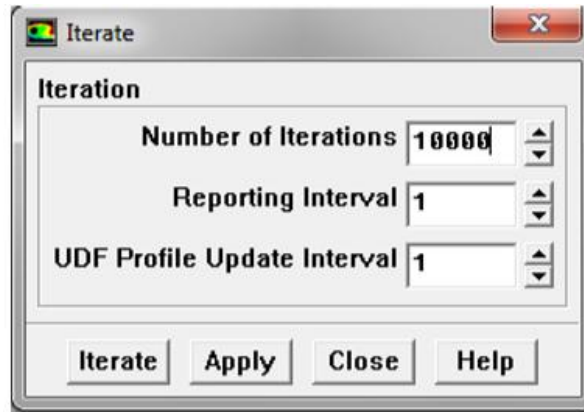


Fig. III. 28: Choix des nombres des itérations

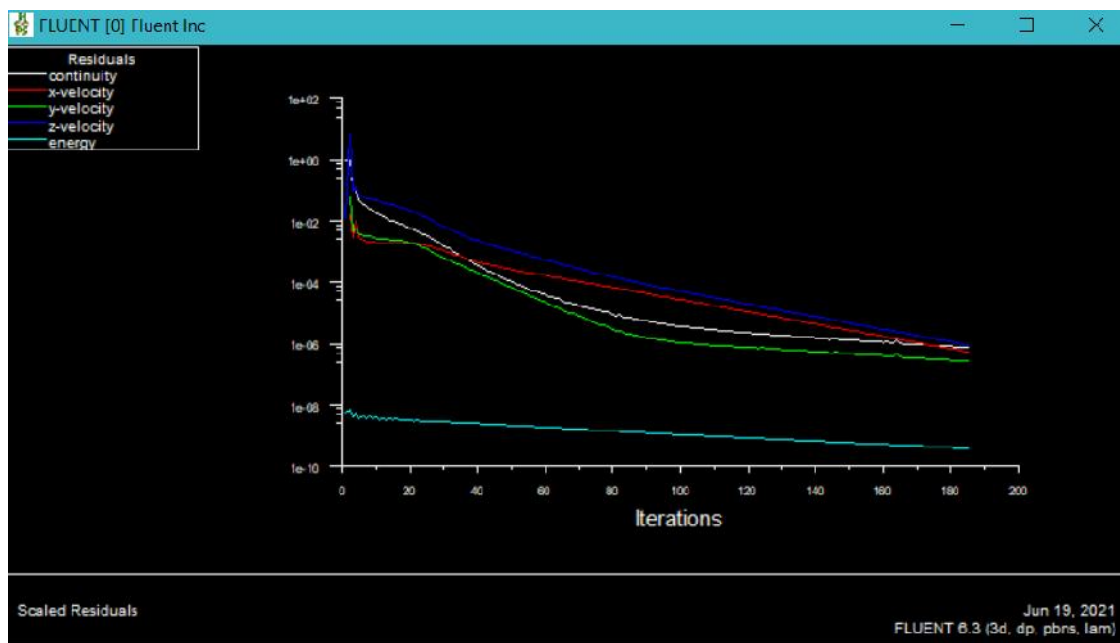


Fig. III.29 : Allure de l'évolution des résidus de calcul.

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

III.13.19. Visualisation des résultants

Display> Contours

Display>vecteur

Display> pathlines

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

Le logiciel Fluent fournit des outils intégrés de post-traitement. Toutefois, rien n'interdit d'exporter les données dans divers formats afin de les traiter sous d'autres logiciels tels que : TECPLOT pour la visualisation, ou Origin pour une analyse plus poussée.

-Calcul de la température moyenne:

Report > surface integrals

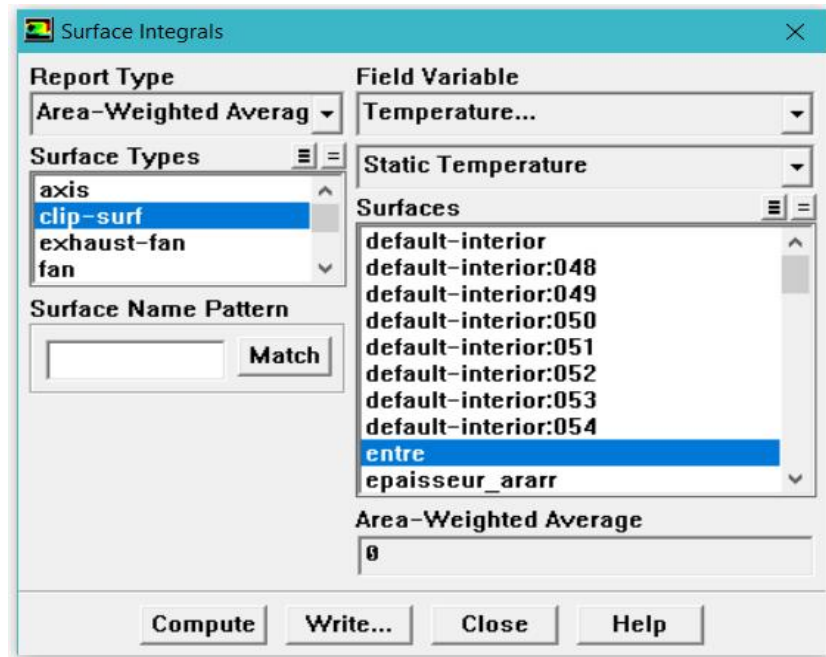


Fig. III.3: Calcul de la température moyenne.

-Calcul de la densité du flux moyen

Report > Flux Reports

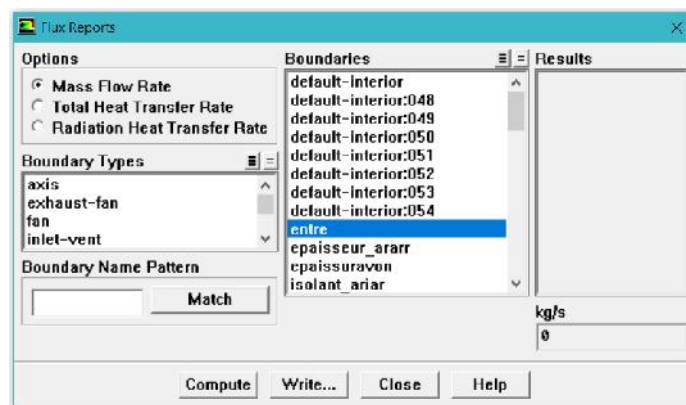


Fig. III.31 : Calcul de la densité du débit massique moyen

- Calcul de la température de mélange (T_m)

Report > volume integral

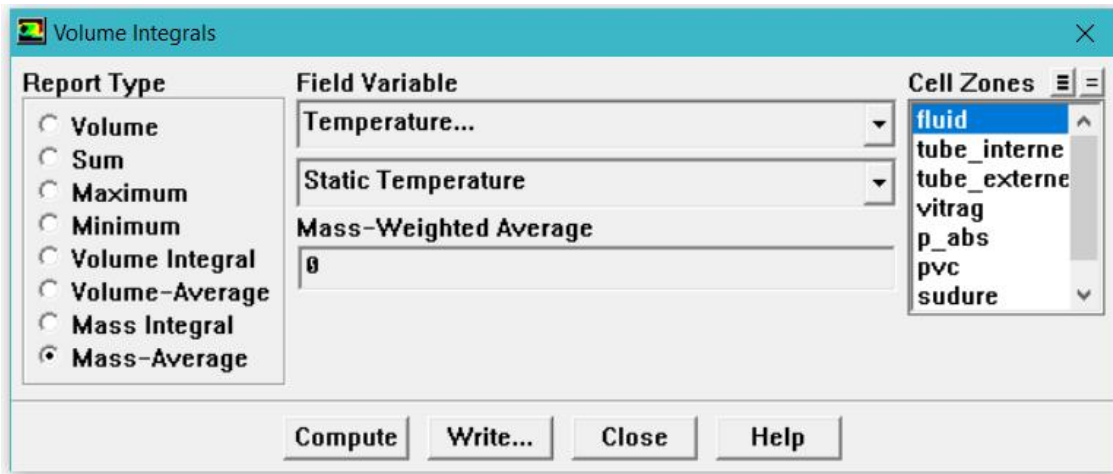


Fig. III. 32 : Calcul de la température de mélange.

Plot> xyplot

Cette application nous permet de tracer les graphes de certains paramètres pour différentes zones de la configuration.

III.13.20. Sauvegarde de fichier

File > Write > Case & Dat

III.14. Conclusion

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

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Chapitre VI

Résultats et discussions

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de simulations d'un panneau photovoltaïque hybride fonctionnant avec de l'eau. Notre travail a porté sur l'étude du transfert de chaleur dans le tube contenant le fluide caloporteur pour le cas de l'eau ensuite le nano fluide (eau/Cu et eau/TiO₂). C'est-à-dire les nano fluide de fluide de base l'eau où on a ajouté des nanoparticules de Cuivre ou de TiO₂.

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

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

Le fluide eau est porté à la température ambiante $T_a=300K$, le panneau photovoltaïque est soumis à un rayonnement incident $G=1900W/m^2$, la face supérieur du panneau qui est le vitrage est soumise à une température $T_v=350K$ et un coefficient de transfert de chaleur convectif $h_v=30w/m^2K$.

L'objectif de ce travail est de déterminer le taux de transfert de chaleur du fluide dans le tube en variant le débit de ce dernier c'est-à-dire pour des nombres de Reynolds $Re=800,1000$ et 1800 pour l'eau ensuite pour les nano fluides (eau/Cu et eau/TiO₂) à des concentrations $\phi=0.02, 0.04, 0.06$ et 0.08 .

Nous présentons pour notre configuration, les contours de la température en fonction du nombre de Reynolds et les concentrations des nano fluides ainsi que le nombre de Nusselt. Pour présenter les résultats de simulation, on a utilisé le logiciel Origin version 6 pour tracer les courbes.

IV.2. Les paramètres utilisés :

- ❖ Les propriétés physiques de l'eau à la température ambiante $T_a=300K$:
 - Masse volumique : $\rho= 998.2 \text{ kg/m}^3$.
 - La capacité calorifique : $C_p = 4182 \text{ J/kg.K}$.
 - Conductivité thermique $\lambda =0.6 \text{ W/m.K}$.
 - Viscosité dynamique $\mu =1.003 \times 10^{-4} \text{ kg/m.s}$.
- ❖ Les propriétés thermo physique du fluide de base et des particules solide :

	ρ	C_p	β	K	μ
Cu	8933	385	0.0000167	400	-
TiO2	4250	686	0.000018	9	-

Tableaux VI.1 : propriétés thermo physique du fluide de base et des particules solide.

IV.2.1 Variation des propriétés thermo physique du fluide de base l'eau avec les différentes nanoparticules.

Les tableaux (IV.2 et IV.3) montrent les propriétés thermo physiques des nano fluides (eau/Cu) et (eau/TiO₂) calculés selon les modèles de la littérature :

φ	ρ_{nf}	c_p	β_{nf}	K_{nf}	μ_{nf}
0	998.2	4182	0.00021	0.6	0.0001003
0.02	1062.158	3899.47	0.000194	0.643669	0.000937
0.04	1127.216	3652.207	0.00018	0.675378	0.00098
0.06	1192.274	3431.928	0.000167	0.708181	0.001025
0.08	1257.332	3234.444	0.000156	0.742136	0.001069

Tableaux IV.2. : Propriétés thermo physique du nano fluide (eau/TiO₂).

φ	ρ_{nf}	c_p	β_{nf}	K_{nf}	μ_{nf}
0	998.2	4182	0.00021	0.6	0.0001003
0.02	1155.818	3592.544	0.00018	0.650355	0.000936
0.04	1314.536	3147.707	0.000157	0.689259	0.00098
0.06	1473.254	2798.717	0.00014	0.729811	0.001025
0.07	1631.972	2517.609	0.000125	0.772117	0.001069

Tableaux IV.3 : propriétés thermo physique du nano fluide (eau/Cu).

Paramètres	Vitrage	Cellule	Plaque absorbeur	Isolant
Coefficient d'absorption (m ⁻¹)	$\alpha_v=0.04$	$\alpha_c=0.9$	$\alpha_p=0.94$	-
Coefficient de transmission (m ⁻¹)	$\tau_v=0.9$	$\tau_c=0.09$	-	-
Emissivité	$\epsilon_v=0.86$	$\epsilon_c=0.7$	$\epsilon_p=0.7$	$\epsilon_I=0.7$
Épaisseur (mm)	4mm	0.3mm	0.5mm	3cm
Conductivité thermique (W.m-1.K-1)	$k_v=0.9$	$k_c=677$	$k_p=51$	$k_I=0.035$
Densité (kg.m-3)	$\rho_v=2200$	$\rho_c=2330$	$\rho_p=2702$	$\rho_I=24$
Chaleur spécifique (J.kg.K)	$Cp_v=670$	$Cp_c=900$	$Cp_p=871$	$Cp_I=917$

Tableau IV.4 : Paramètres utilisés dans les simulations.

IV.3. Influence du maillage

Le choix du maillage a une grande influence sur la précision des résultats et le temps de calcul. Nous avons effectués plusieurs essais numériques avec des différentes grilles de maillage, à savoir (350400) nœuds, (333200) nœuds, (294000) nœuds et (289000) nœuds.

Le tableau IV.5, montre la variation de la température du fluide dans le tube pour ces différents maillages en fonction du temps de calcul pour un nombre de Richardson $Ri=28$. La figure VI.1, montre aussi la variation de température du fluide en fonction des nombres de nœuds de chacune des grilles.

Notre choix s'est orienté vers la grille(289000) nœuds ce dernier à donné des résultats et un temps de calcul acceptables. Figure IV.2.

	(350400) noeuds	(333200) noeuds	(294000) noeuds	(289000) noeuds
Temps	2h, 40min	3h	49min	45min
Température de fluide (K)	306.159	305.608	306.1804	306.169

Tableau IV.5 : variation de la température en fonction du maillage.

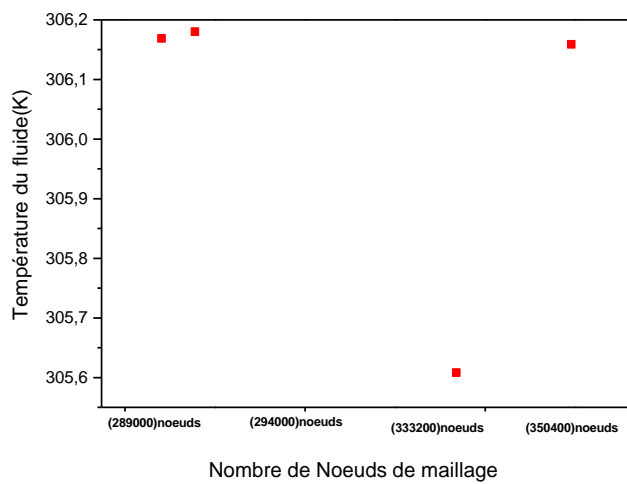


Figure IV.1 : Variation de la température en fonction du maillage

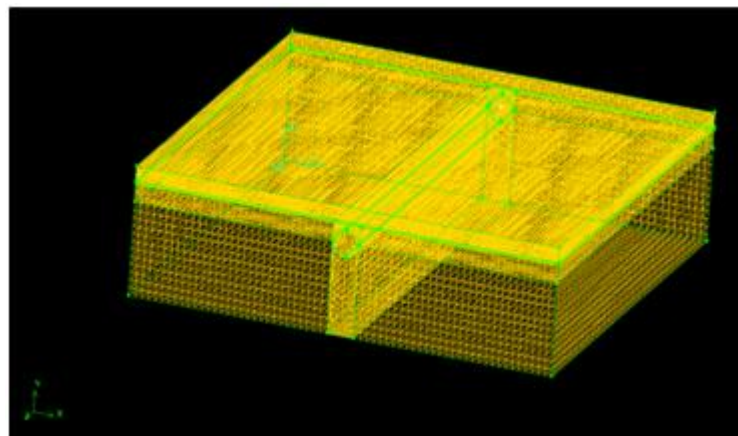


Figure IV.2: Maillage de la configuration

IV.4. Influence du nombre de Reynolds

Pour voir l'influence du nombre de Reynolds sur le transfert de chaleur dans le tube où s'écoule le fluide caloporteur, les simulations ont été faites pour des nombres de Reynolds $Re=800$, 1000 et 1800 ce qui correspond à des nombres de Richardson respectivement $Ri=0.0085$, 0.0054 et 0.001 avec un nombre de Grashof $Gr=5500$. Nous avons utilisé deux types de nanofluide dont le fluide de base est l'eau avec des nanoparticules de Cuivre (eau/Cu) et des nanoparticules de TiO_2 (eau/ TiO_2) avec des concentrations $\phi=0.02$, $\phi=0.04$, $\phi=0.06$ et $\phi=0.08$.

IV.5. Les Contours de température

Figures (VI.3, VI.4, VI.5) montrent la variation des contours de température du fluide dans le tube respectivement pour les nombres de Reynolds $R_e=800$, 1000 et 1800 pour le nano fluide (eau/Cu) à des concentrations $\phi=0.02$, $\phi=0.04$, $\phi=0.06$ et $\phi=0.08$.

Nous constatons que la zone la plus chaude du panneau est la face supérieure qui est le vitrage ensuite cette chaleur est transmise vers la cellule par rayonnement pour être convertie en électricité. La chaleur est transmise ensuite vers la plaque absorbante puis le fluide et en fin l'isolant. La température du fluide diminue quand la concentration augmente mais cette variation est très faible et elle est de l'ordre de 0.01 . Nous constatons aussi que la température diminue lorsque le nombre de Reynolds augmente ainsi le mode de transfert de chaleur par convection forcée est dominant puisque les nombres de Richardson sont de l'ordre de 0.0053 , 0.0034 , 0.001 pour un nombre de Grashof $Gr=3700$.

❖ Nano fluides (eau/Cu)

$R_e=800$

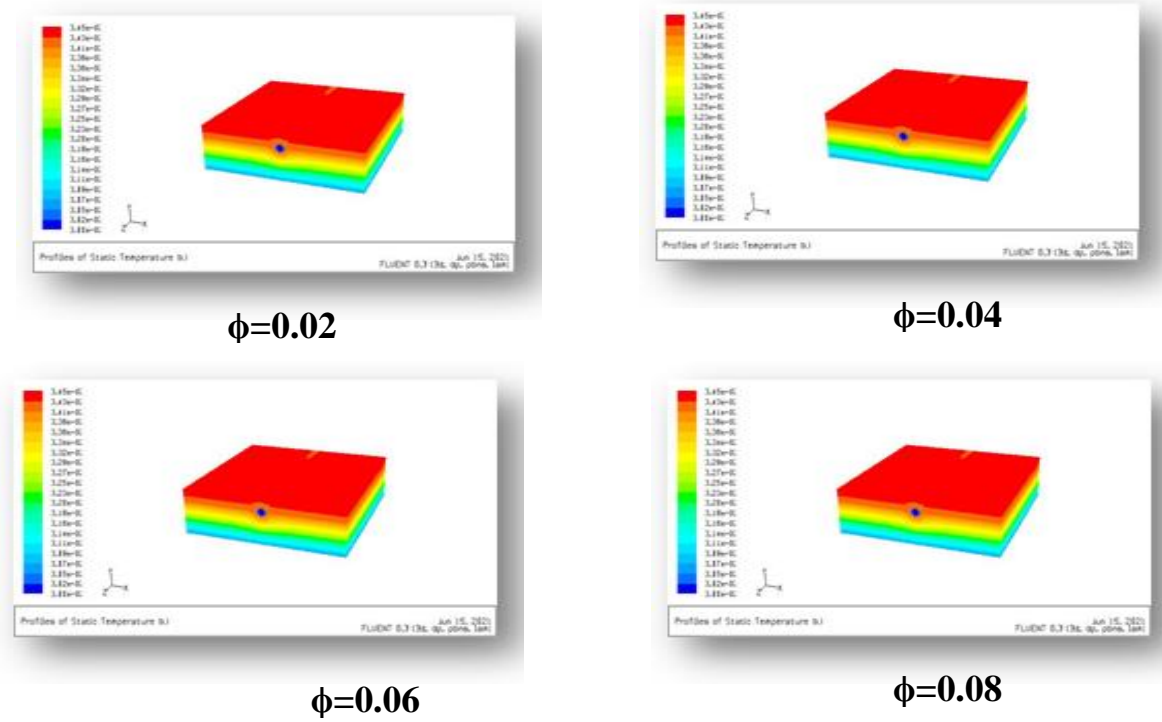
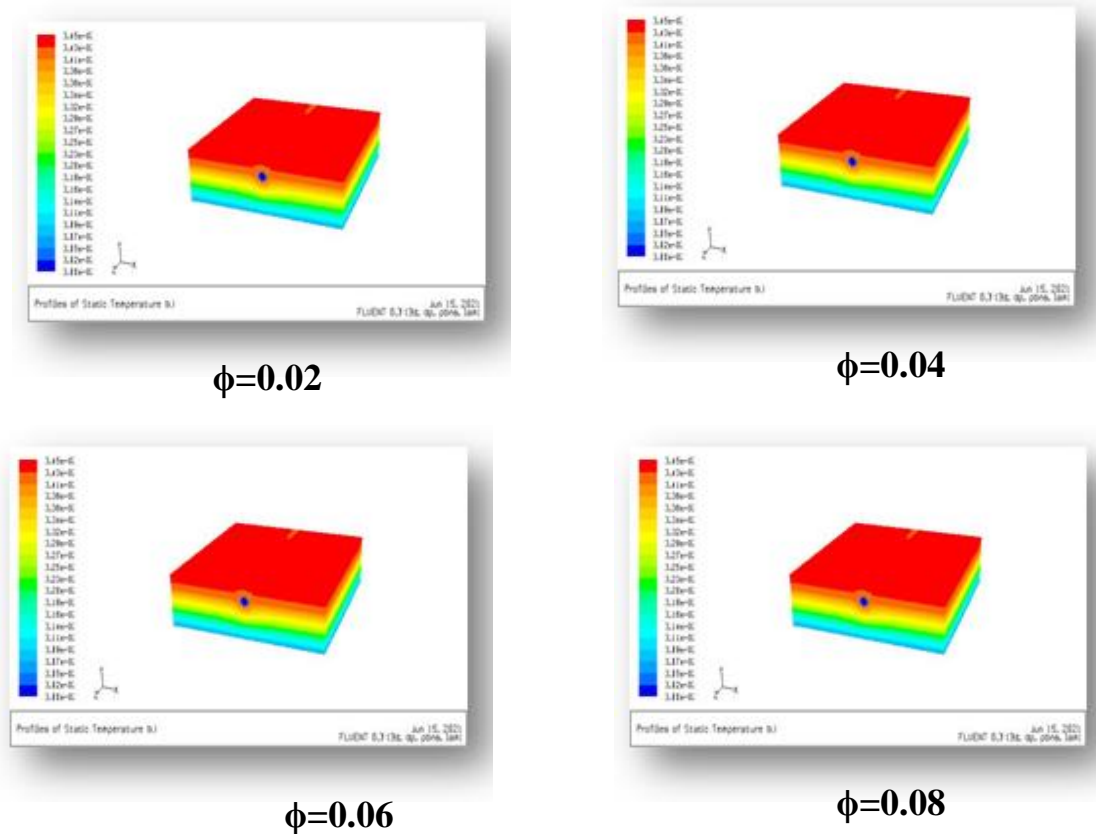


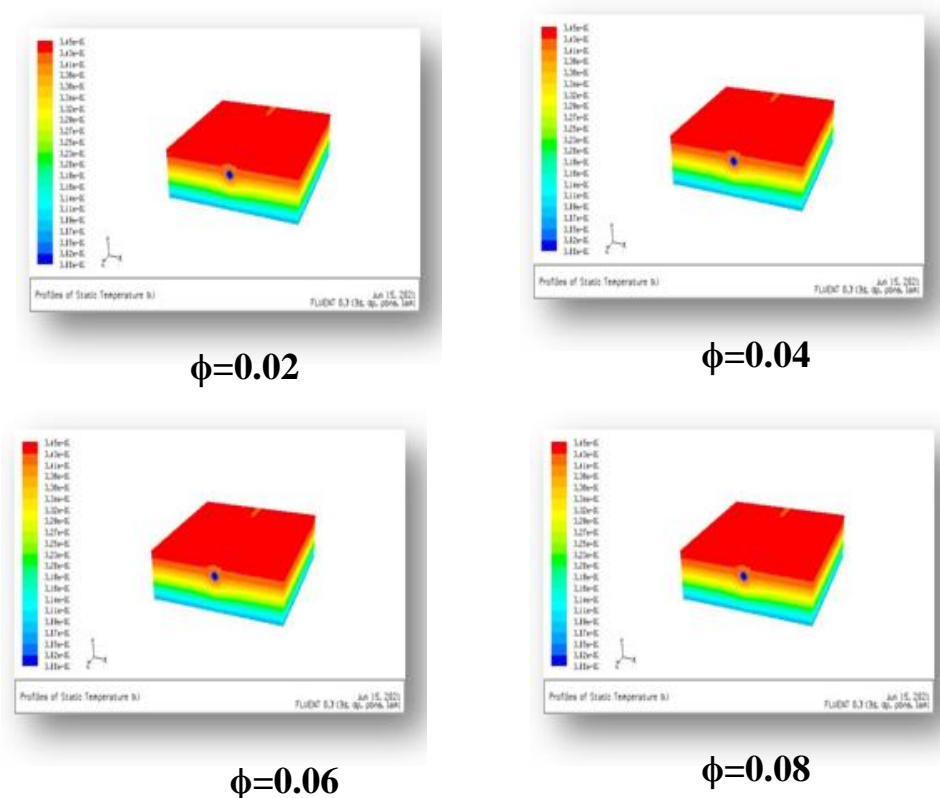
Figure IV.3: Champs de Températures pour $R_e=800$ et le nano fluide (eau/Cu).

$Re=1000$



Figures IV.4: Champs de Températures pour $Re=800$ et le nano fluide (eau/Cu).

$Re=1800$

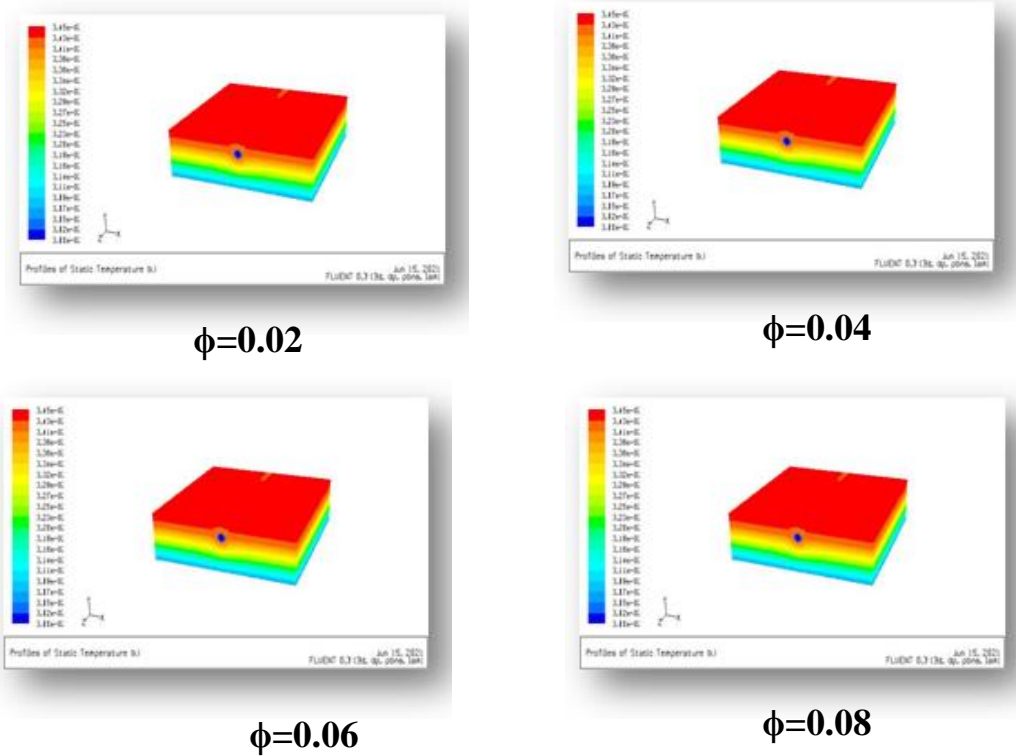


Figures VI.5: Champs de Températures pour $Re=1800$ et le nano fluide (eau/Cu)

Les figures (VI.6, VI.7, VI.8) montrent la variation des contours de température du fluide dans le tube respectivement pour les nombres de Reynolds $Re=800$, 1000 et 1800 pour le nano fluide (eau/TiO_2) à des concentrations $\phi=0.02$, $\phi=0.04$, $\phi=0.06$ et $\phi=0.08$.

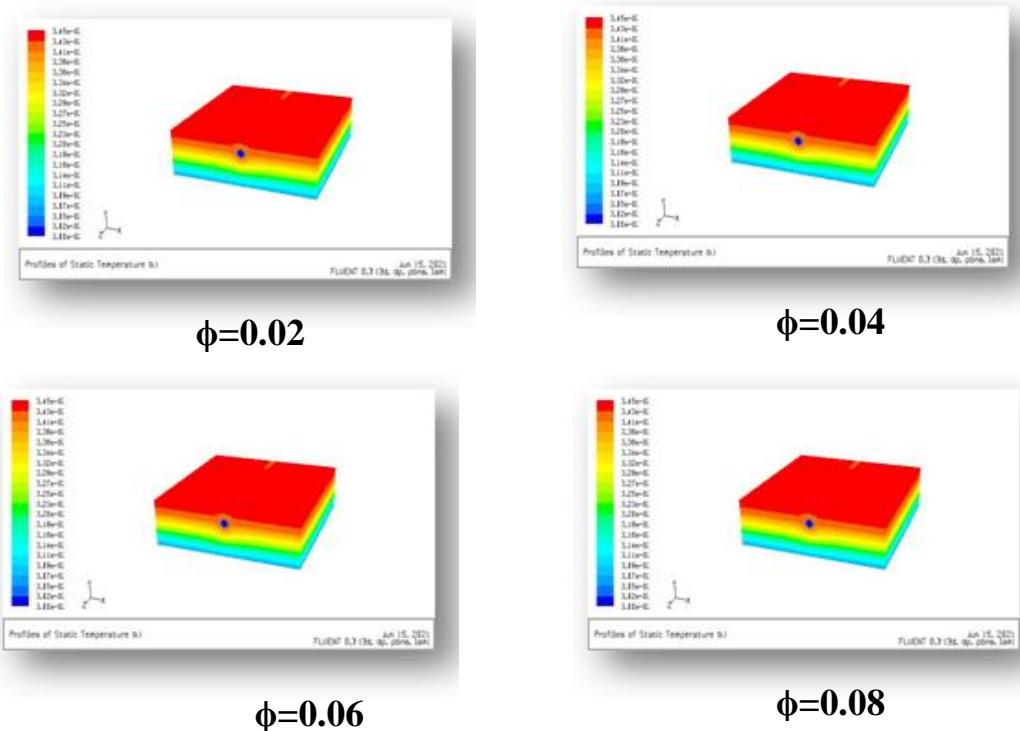
Nous constatons que la zone la plus chaude du panneau est la face supérieure qui est le vitrage ensuite cette chaleur est transmise vers la cellule par rayonnement pour être convertie en électricité. La chaleur est transmise ensuite vers la plaque absorbante puis le fluide et en fin l'isolant. La température du fluide diminue quand la concentration augmente mais cette variation est très faible et elle est de l'ordre de 0.01 . Nous constatons aussi que la température diminue lorsque le nombre de Reynolds augmente ainsi le mode de transfert de chaleur par convection forcée est dominant puisque les nombres de Richardson sont de l'ordre de 0.0085 , 0.0054 et 0.001 , pour un nombre de Grashof $Gr=3600$.

❖ Nano fluides (eau/TiO_2) $Re=800$



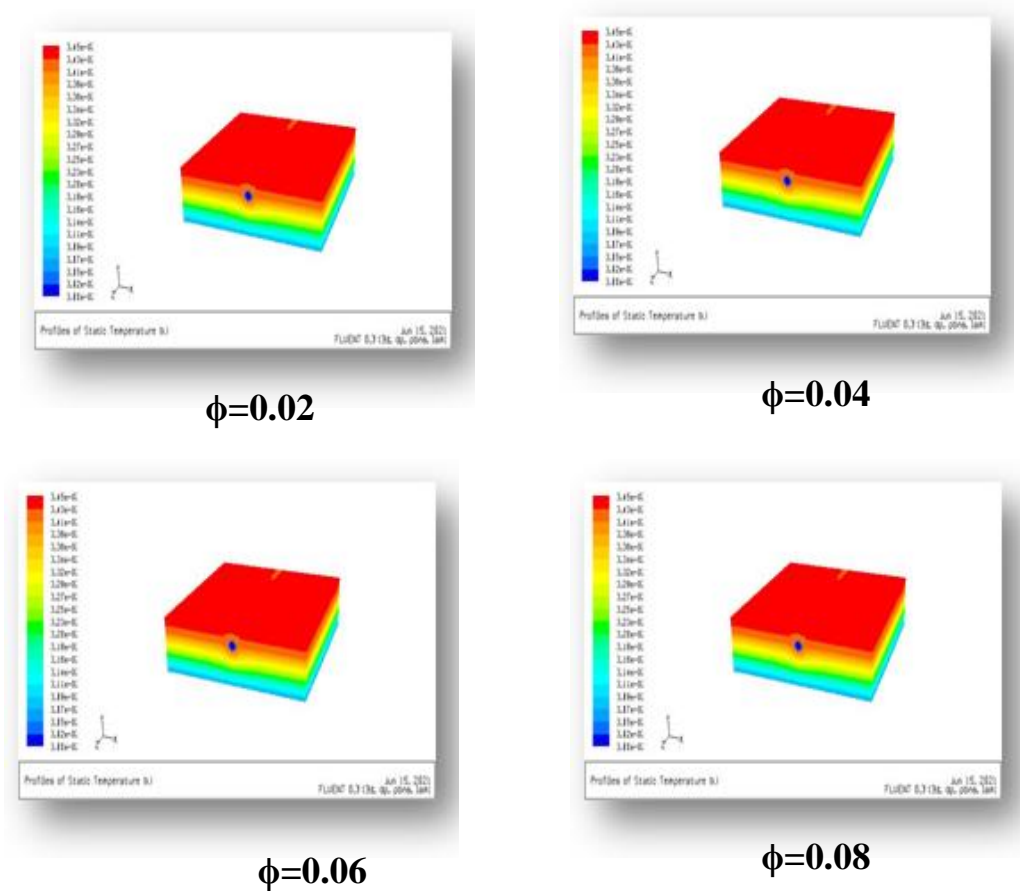
Figures VI.6: Champs de Températures pour $Re=800$ et le nano fluide (eau/TiO_2)

Re=1000



Figures VI.7: Champs de Températures pour $Re=1000$ et le nano fluide (eau/TiO₂)

Re=1800



Figures IV.8: Champs de Températures pour $Re=1800$ et le nano fluide (eau/TiO₂)

IV.6. Influence de la concentration du nano fluide

Pour voir l'influence de la concentration du nano fluide sur la transfert de chaleur dans les éléments du panneau, les figures (VI.9, VI.10, VI.11) montrent la variation de la température dans le panneau en fonction de la concentration du nano fluide (eau/Cu) pour les nombres de Reynolds cités. Il est claire que la température du vitrage est la plus élevée et celle de l'isolant est la plus faible.

La température diminue quand le nombre de Reynolds augmente.

➤ Pour nano fluide (eau/Cu)

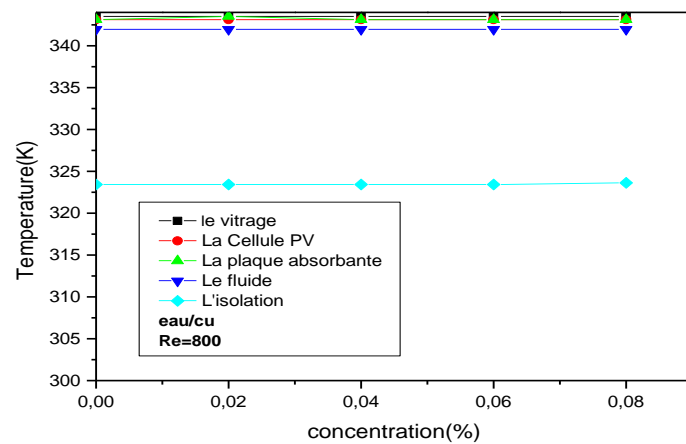


Figure IV.9 : Variation de la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/Cu) $Re=800$

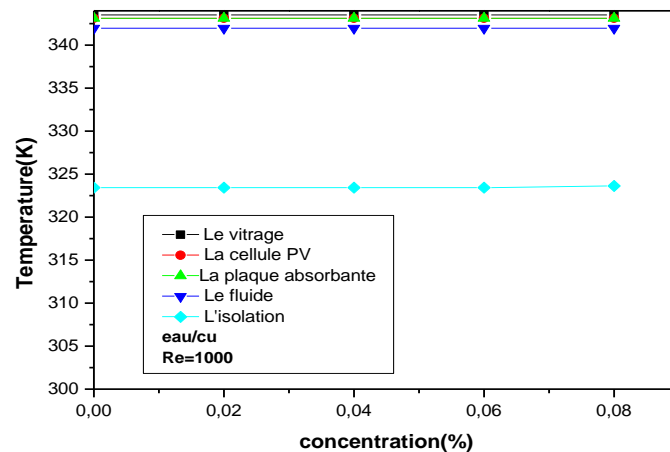


Figure IV.10: Variation de la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/Cu) $Re=1000$

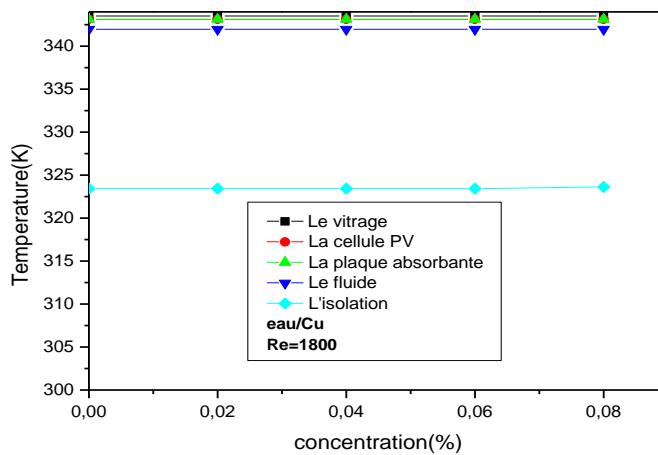


Figure IV.11: Variation de la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/Cu) $Re=1800$

les figures (VI.12, VI.13, VI.14) montrent la variation de la température dans le panneau en fonction de la concentration du nano fluide (eau/TiO₂) pour les nombres de Reynolds cités. Il est clair que la température du vitrage est la plus élevée et celle de l'isolant est la plus faible. La température diminue quand le nombre de Reynolds augmente.

➤ **Pour nano fluide (l'eau/TiO₂)**

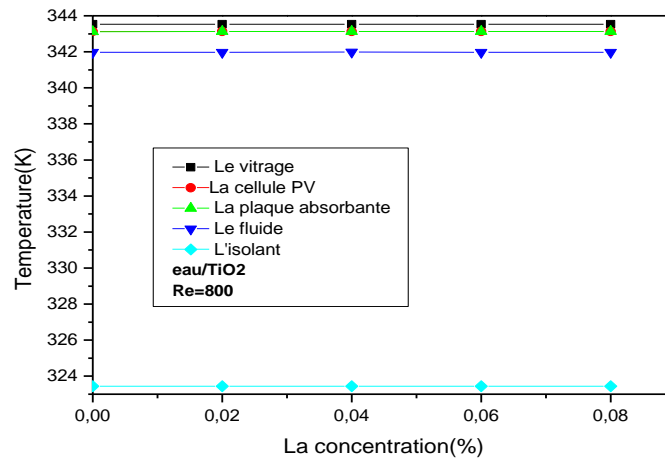


Figure IV.12: Variation de la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/TiO₂) $Re=800$

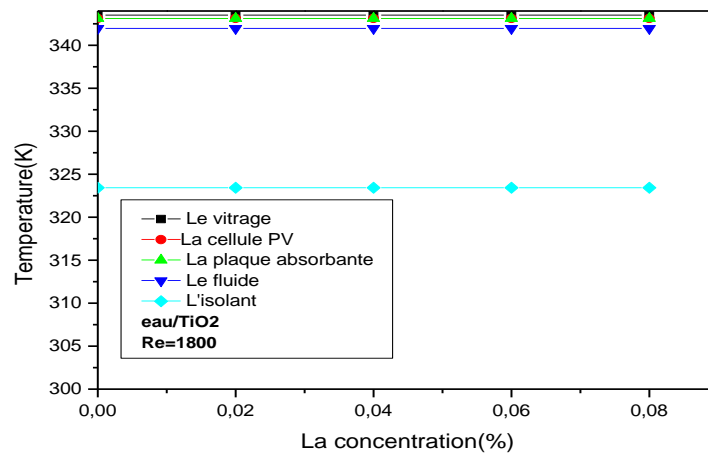


Figure IV.13: Variation de la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/TiO₂) Re=1800

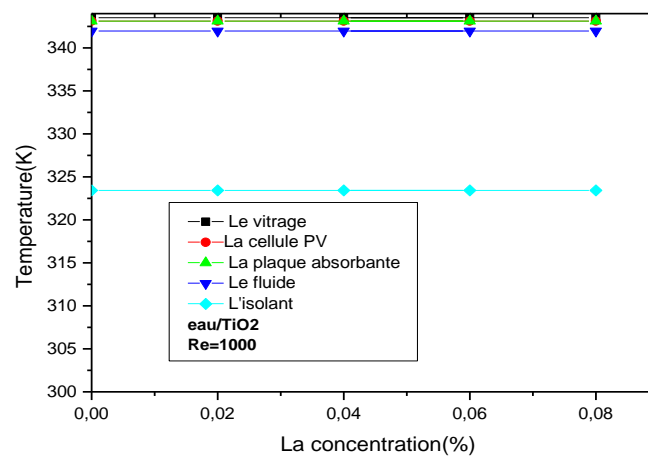


Figure IV.14: Variation de la température des éléments du panneau en fonction de la concentration pour (eau/TiO₂) Re=1000

IV.7. Calcul des nombres adimensionnels

Les tableaux (VI.6, VI.7, VI.8), montrent la variation des nombres adimensionnels pour l'eau $\phi=0$ et pour le nano fluide (eau/Cu) pour les concentrations $\phi=0.02$ et $\phi=0.04$. Le nombre de Nusselt Nu montre le taux de transfert de chaleur par convection et les valeurs du nombre de Richardson montrent que la convection forcée est dominante dans notre cas. Quand le nombre de Reynolds augmente le nombre de Nusselt augmente et le nombre de Richardson diminue.

➤ (Eau)

Re	Nu	Gr	Ri
800	7.906178	5500	0.008516
1000	9.585166	5500	0.00545
1800	17.0059	5500	0.001682

Tableau VI.6: Calcul des nombres adimensionnels pour l'eau $\phi=0$

VI.7.1 Le nano fluide (eau/Cu)

➤ Concentration $\phi = 0.02$

Re	Nu	Gr	Ri
800	4.62282558	3700	0.00579
1000	5.88412638	3700	0.003706
1800	10.4005913	3700	0.001144

Tableau VI.7: Calcul des nombres adimensionnels pour (l'eau/Cu) $\phi=0.02$.

➤ Concentration $\phi = 0.04$

Re	Nu	Gr	Ri
800	4.14366706	3600	0.005623
1000	5.114176801	3600	0.003599
1800	9.023680747	3600	0.00938

Tableau IV.8: Calcul des nombres adimensionnels pour (l'eau/Cu) $\phi=0.04$

IV.7.2 Le nano fluide (eau/TiO₂)

Les tableaux (VI.9, VI.10, VI.8), montrent la variation des nombres adimensionnels pour le nano fluide (eau/TiO₂) pour la concentration $\phi=0.02$ et $\phi=0.04$. Nous constatons dans ces tableaux que lorsque le nombre de Reynolds augmente le nombre de Nusselt augmente aussi et le nombre de Richardson diminue. Le nombre de Nusselt augmente quand la concentration augmente. Nous remarquons aussi que le nombre de Nusselt pour le nano fluide (eau/TiO₂) donne un meilleur taux de transfert de chaleur que celui du nano fluide (eau/Cu) avec des nombres de Grashof 3400 et 3000.

➤ Concentration $\phi = 0.02$

Re	Nu	Gr	Ri
800	5.199602	3400	0.005314
1000	6.441469	3400	0.003401
1800	11.40214	3400	0.00105

Tableau IV.9: Calcul des nombres adimensionnels pour (l'eau/TiO₂) $\phi=0.02$.

➤ Concentration $\phi = 0.04$

Re	Nu	Gr	Ri
800	4.858393	3000	0.004838
1000	6.018086	3000	0.003096
1800	10.6465	3000	0.000956

Tableau IV.10: Calcul des nombres adimensionnels pour (l'eau/TiO₂) $\phi=0.04$.

IV.8. Le nombre de Nusselt Nu

Les figures (VI.15 et VI.16), montrent l'évolution du nombre de Nusselt du nano fluide eau/TiO₂ et celui de l'eau/Cu en fonction de la concentration ϕ , nous constatons que le nombre de Nusselt diminue quand la concentration augmente pour les deux nano fluides et le nombre est plus élevé quand le nombre de Reynolds augmente, le nano fluide eau/TiO₂ donne un meilleur taux de transfert de chaleur.

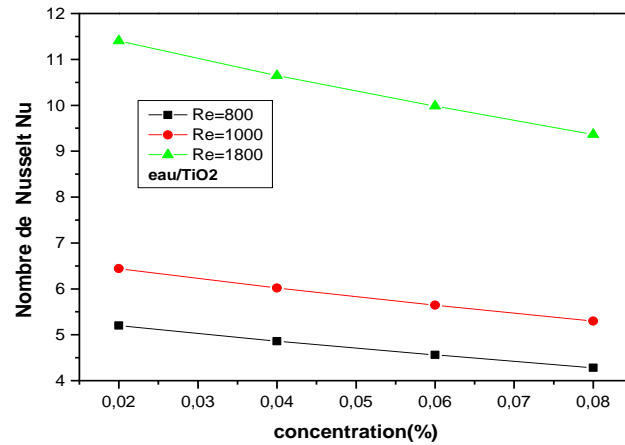


Figure IV.15: Variation du nombre de Nusselt en fonction du concentration pour le nano fluide (eau/TiO2)

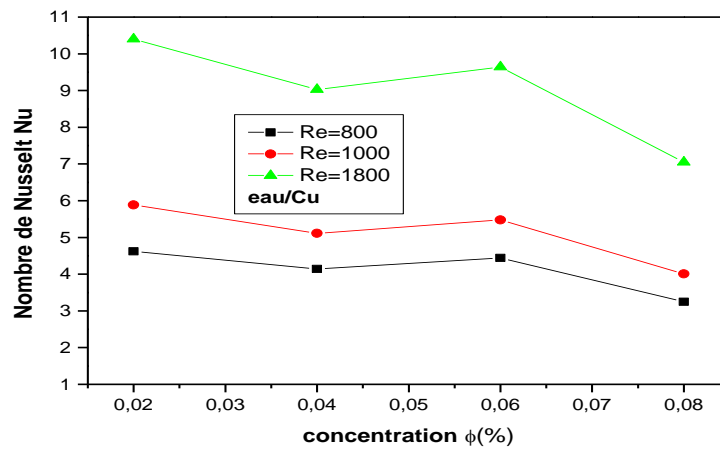


Figure IV.16: Variation du nombre de Nusselt en fonction de la concentration pour le nano fluide (eau/Cu)

Conclusion Générale

Ce travail représente, une étude numérique du transfert de chaleur de l'écoulement d'un nano fluide dans le tube d'un panneau photovoltaïque hybride.

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

Les résultats obtenus représentent les variations des contours et les profils de température ainsi que le nombre de Nusselt relatifs à l'écoulement en fonction des nombres de Reynolds et des concentrations des nano fluides.

Le travail présenté a pour les objectifs suivants :

Comprendre le processus de transfert de chaleur avec rayonnement dans un capteur photovoltaïque hybride en utilisant un nano fluide.

Des simulations ont été effectuées pour des nombres de Reynolds et de Richardson correspondant à la convection forcée.

Le logiciel Fluent a été utilisé avec le couplage de la convection et le rayonnement avec le choix du model de rayonnement de Rosseland.

D'après les résultats nous pouvons conclure que :

- La température du fluide est plus élevée dans la face supérieure du panneau qui est le vitrage, ensuite cette chaleur est transmise vers les autres éléments du panneau à savoir la cellule PV, la plaque absorbante ensuite le fluide.
- La température du fluide diminue quand le nombre de Reynolds augmente.
- La concentration des nanoparticules dans la base fluide a une influence sur le taux de transfert de chaleur, ce dernier diminue quand la concentration des particules nanométriques augmente.
- Le nano fluide (eau/TiO₂) adonné un meilleur taux de transfert de chaleur que celui du nano fluide (eau/Cu), ce taux de transfert de chaleur augmente avec le nombre de Reynolds.

A travers ce travail, nous concluons que l'utilisation des nano fluide a un grand effet sur le refroidissement des éléments du panneau photovoltaïque et permettant ainsi d'améliorer ses performances.

Références

- [1] <http://energie-eolienne.over-blog.com/2016/04/les-energies-renouvelables.html>, Consulter le 22 Juillet 2020 .
- [2] Al-Waeli A. H. A. , Kazem H. A., Chaichan M.T., Sopian K,2019, Photovoltaic/Thermal(PV/T) Systems Principles, Design, and Applications, Switzerland: Springer (ed),p 282.
- [3]Int. Congress, Atlanta, USA, Vol. 3, 1865-1869.HENDRIE S.D,1979:Evaluation of combined photovoltaic / thermal collectors, In Proc. ISES
- [4]L'abedes technologies de l'énergie renouvelable, septembre 2003, www.pollutionprobe.org
- [5] C. H. COX&P.RAGHURAMAN, 1985 :Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collector. Solar Energy, vol. 35, no3, 227-241.
- [6] B. LALOVIC &al, 1986 : Ahybrid amorphous silicon photovoltaïqueand thermal solar collector. Solar Cells, vol. 19, no2, pp. 131-138.
- [7] M. Capderou,1987:Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU.
- [8]J.F.Sacadura, 1980: Initiation eux transferts thermique; Technique et Documentation ; Paris.
- [9] A. Tiwari&al,2006 :Performance evaluation of photovoltaic / thermal solar air collector for composite climate of India, Solar Energy Materials and Solar Cells,175-189.
- [10] Bazilian MD& al,2002 : Thermographic analysis of a building integrated photovoltaic system,Renewable Energy;26:449–61.
- [11] B. J Brinkworth& al, 1997: Thermal regulation of photovoltaic cladding, Solar Energy 61, 169-178.
- [12]A. Bilbao, 2006: Réalisation d'un commande mppt numérique,université de rovira ivirgili .
- [13]H. Belghitri & H., 2009:Modélisation, simulation et optimisation d'un systèmehybride éolien-photovoltaïque' mémoire de magister.
- [14] H. P. Garg & R. S.Adhikari, 1999 : Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs,Int. J. Energy Res.23, 1295-1304.
- [15] BelaidL. S.,2015,Cours Energie Solaire Photovoltaïque,Université A. Mira deBejaia Faculté de Technologie, p 62.
- [16] T.Hauser&H.Rogash, 2000 :Latent heat storage on photovoltaics,In Proc. 16th European PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. Vol III, 2265-2267.
- [17] H. A.Zondag& al,2003 : The yield of different combined PV-thermalcollector designs, Solar Energy, 74, 235 269.

- [18] Y. Tripanagnostopoulos & al, 2000 : Low cost improvements to building integrated air cooled hybrid PV-Thermal systems, Proc. 16th Europ. PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. 1-5 May, Vol II pp. 1874–1899.
- [19] Anas Al Tarabsheh, Spyros Voutetakis, Athanasios Papadopoulos, Panos Seferlis, Issa Etiera, Omar Saraereh, Investigation of Temperature Effects in Efficiency Improvement of Non-Uniformly Cooled Photovoltaic Cells, Chemical Engineering Transactions (2013) Vol. 35.
- [20] A. Muzaffar, Hafiz M. Ali, W. Moazzam, and M. Babar Saeed, Performance enhancement of PV cells through rough micro-channel cooling, AIMS Energy (2015) 3(4), pp. 699-710.
- [21] S. Nizetic, D. Čoko, A. Yadav, F. Grubišić - Čabo, Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response, Energie Conversion and Management (2016) 108, pp. 287–296.
- [22] S. Iqbal, S. Afzal, A. U. Mazhar, H. Anjum, A. Diyyane, Effect of Water Cooling on the Energie Conversion Efficiency of PV Cell, American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences ‘ASRJETS’ (2016).
- [23] S. Jakhar, Manoj S. Sonie and N. Gakkhar, Parametric Modeling and simulation of photovoltaic panels with earth water Heat exchange cooling, Géothermal Energie (2016).
- [24] K. Sukarno, A. H. Ag Sufiyan, H. Rhazali, J. Dayou, Evaluation on Cooling Effect on Solaire PV Power Output Using Laminar H₂O Surface Methode, International Journal Of Renewable Energie Research (2017).
- [25] Zondag H. A. & al, 2002 : The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector, Solar Energy Vol. 72, N°2, 113-128.
- [26] T. T. Chow, 2003 : Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. Solar Energy; 75:143–52.
- [27] Bergene T., O. M. Lovvik, 1995 Model calculations on flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. Solar Energy, , vol. 55, no6, pp. 453-462.
- [28] T. Bergene & O. M. Lovvik, 1995 : Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells, Solar Energy, Vol. 55, 453-462.
- [29] M. G. Villalva & al, 2009 : Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, Journal of power electronics, , May 2009.
- [30] A. Haddad, 2001: Transfert thermique, USNB, 9961-718-01-1.
- [31] Bejan A. & al, 2003 : Heat transfer handbook, TJ250.B35.
- [32] T. Ismail, 2002 : Modelling in transport phenomena, Elsevier Science B.v.

- [33] GLADES Bachir et Benhadid, 'Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nano fluides en configuration de Rayleigh-Bénard', thèse université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.
- [34] RIBIERO João-Paulo, Dossier Technique de l'ingénieur, nm5115, Nano fluides pour les applications thermiques, 2009.
- [35] FOHANNO Stéphane et al, 'Nano fluides et transfert de chaleur par convection naturelle', thèse université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2012.
- [36] **J.C. Maxwell.** A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., (1891).
- [37] **R.L. Hamilton and O.K. Crosser.** Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(3), pp.187-191, (1962).5
- [38] Yu, W. and S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *Journal of nanoparticle research*, 2003. **5**(1): p. 167-171.
- [39] **A. Einstein.** Investigations on the Theory of the Brownian movement. Dover Publications , New York, (1956).
- [40] **H.C. Brinkman.** The viscosity of concentrated suspensions and solution. *J. Chem. Phys.*, 20, pp.571-581, (1952).
- [41] **B.C. Pak and Y.I. Cho.** Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151-170, (1998).
- [42] A. Duffie, J. W. A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons Inc, New York, 1991.
- [43] G. N. Tiwari, S. Dubey, "Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications", RSC Energy. Series N° 2. 2010.
- [44] Tiwari A, Sodha MS, "Parametric study of various configurations of hybrid PV/ thermal air collector: experimental validation of theoretical model", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.91, pp.17-28, 2007.
- [45] J.P. Holman, "Heat Transfer", 10th ed., McGraw-Hill series in Mechanical Engineering, 2010.
- [46] K. S. Ong, "Thermal performance of solar air heaters: Mathematical model and solution procedure", *Solar Energy*, Vol.55, pp. 93-109, 1995.
- [47] F. P. Incropera, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, 2006.

Résumé

L'énergie solaire est une source énergétique alternative, souvent employée pour produire l'électricité par des systèmes photovoltaïques, Ou bien générer de la chaleur par les systèmes solaires thermique. Notre étude s'impose sur le transfert de chaleur par convection forcée du fluide caloporteur du tube d'un capteur photovoltaïque hybride par l'utilisation des nano fluides. L'objectif de ce travail est de pouvoir diminuer la température de la cellule dont son augmentation cause la décroissance du rendement électrique.

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

Les résultats obtenus représentent les variations des contours et les profils de température ainsi que le nombre de Nusselt relatifs à l'écoulement en fonction des nombres de Reynolds et des concentrations des nano fluides. Nous avons conclu que l'utilisation des nano fluides a un grand effet sur le refroidissement des éléments du panneau photovoltaïque et permettant ainsi d'améliorer ses performances.

Mots clés : *Panneaux* photovoltaïques hybrides, convection mixte, nano fluides, simulation numérique, Mots clés: , convection thermique, CFD « FLUENT ».

ملخص

الطاقة الشمسية هي مصدر بديل للطاقة، وغالباً ما تستخدم لإنتاج الكهرباء عن طريق الأنظمة الكهروضوئية، أو لتوليد الحرارة بواسطة الأنظمة الحرارية الشمسية، ودراستنا ضرورية في نقل الحرارة بالحمل القسري لسائل نقل الحرارة لأنبوب الطاقة الكهروضوئية الهجين. الاستشعار عن طريق استخدام السوائل النانوية. الهدف من هذا العمل هو القدرة على خفض درجة حرارة الخلية التي تؤدي زيادتها إلى انخفاض الكفاءة الكهربائية.

تم استخدام برنامج **Gambit and Fluent 6.3.26** لبناء الهندسة والمحاكاة العددية.

النتائج التي تم الحصول عليها تمثل الاختلافات في ملامح وملامح درجة الحرارة وكذلك رقم نسلت المتعلقة بالتدفق كدالة لأرقام رينولدز وتركيزات الموائع النانوية. خلصنا إلى أن استخدام السوائل النانوية له تأثير كبير في تبريد عناصر اللوحة الكهروضوئية وبالتالي تحسين أدائها.

الكلمات المفتاحية: الألواح الكهروضوئية الهجينة، الحمل الحراري المختلط، السوائل النانوية، المحاكاة العددية، الحمل الحراري، **FLUENT** "CFD".