



Université Mohamed Khider de Biskra
Sciences et technologie
Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energetique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
BELDJANI Charafeddine

Le : jeudi 17 septembre 2020

Amélioration du refroidissement d'un module photovoltaïque par l'usage de la nanotechnologie

Jury :

Mr. GUERIRA Belhi	MCA	Université de Biskra	Président
Mr. BELGHAR Nourredine	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Mr. MOUMMI Nouredine	Pr	Université de Biskra	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon très Cher Père.

A ma très Chère Mère.

A mes très Cher Frères.

A mes très cher soeurs.

A mes chers et fidèles amis :

*Mengaa Youssef, Ziane Yahia, Belmehdi
Abdellatif,*

*Merabet Med Arezki, Lamouri
Azzeddine, Bouhelal Mamar, Zid Islam, Gadi
Badreddine, Teggat Mohamed.*

*A toute la promotion Génie mécanique
énergétique 2020.*

Charafeddine

Remerciements

Je veux remercier tout d'abord mon Dieu Allah tout puissant.

Puis je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon à mon encadreur, Pr Noureddine BELGHAR, pour m'avoir guidé, conseillé, et surtout pour sa confiance totale en moi et sa patience tout au cours de ce travail.

Nous sommes conscientes de l'honneur que nous a fait Dr. Belhí Gueríra en étant président du jury et Pr Noureddine Moummí, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à l'ensemble du département de mécanique.

Mes remerciements vont également à mes amis, notamment : Kethiri Aymen, Bouhelal Maamar, Keddouda Abdelhak pour leurs aides.

Mes profonds remerciements vont aussi à mes profs qui m'ont appris durant tout au mon parcours académique jusqu'à maintenant.

Enfin, tous mes remerciements vont à ma deuxième famille et mes amis de la Département qui ont été nombreux à nous aider et à nous encourager.

Merci à tous. Merci pour tout.

Table des matières

Dédicace.....	i
Remerciement.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Nomenclature	xii
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction.....	5
I.2. Synthèse bibliographique.....	5

Chapitre II : MODÉLISATION THERMOPHYSIQUE DES NANOFLUIDES ET L'ÉTATS DE L'ART SUR LES PANNEUX SOLAIRES

II.1 Introduction.....	11
II.2 Généralités sur les nanoparticules et les Nano-fluides.....	12
II.2.1 Les nanoparticules.....	12
II.2.2 Les Nano-Fluides.....	13
II.2.3 Fabrication et préparation des Nano-Fluides.....	14
II.2.4 Propriétés thermo-physiques des Nano-Fluides.....	16
II.2.4.1 La fraction volumique (Φ).....	16
II.2.4.2 La Masse volumique (ρ).....	16
II.2.4.3 La chaleur spécifique (C_p).....	17
II.2.4.4 La Conductivité thermique (K).....	18
II.2.4.5 Le Coefficient d'expansion volumique (β).....	20
II.2.4.6. La Viscosité dynamique (μ).....	20

Table des matières

II.2.5 Domaines d'applications des nano-fluides.....	21
II.6 Les avantages des nano-fluides.....	23
II.7 Les Les inconvénients des nano-fluides.....	23
II.3 Généralité sur le transfert de chaleur.....	24
II.3.1 Transfert de chaleur par conduction.....	24
II.3.2 Transfert de chaleur par rayonnement.....	25
II.3.3 Transfert de chaleur par convection.....	27
II.3.3.1 Convection libre (naturelle).....	28
II.3.3.2 La convection forcée.....	28
II.3.3.3 La convection mixte.....	28
II.3.4 Les nombres sans dimension.....	29
II.3.4.1 Nombre de Reynolds.....	29
II.3.4.2 Nombre de Prandtl.....	30
II.3.4.3 Nombre de Nusselt.....	30
II.3.4.4 Nombre de Grashof.....	31
II.3.4.5 Nombre de Rayleigh.....	31
II.3.4.6 Nombre de Richardson.....	31
II.4 État de l'Art sur les Capteur Hybrides PVT.....	32
II.4.1 Energie solaire thermique.....	32
II.4.1.1 Capteurs solaire thermiques.....	32
II.4.1.2 Composition des capteurs solaires.....	32
II.4.1.3 Les types de capteurs solaires thermiques.....	34
II.4.2 Energie solaire photovoltaïque.....	38
II.4.2.1 Capteurs solaire photovoltaïques.....	38
II.4.2.2 Principe de conversion.....	38
II.4.2.3 La Technologie de cellule photovoltaïque.....	38

II.4.2.4 Types de cellules photovoltaïques.....	39
II.4.2.5. L'Assemblage des panneaux photovoltaïques.....	42
II.4.2.6. Influence de la température.....	43
II.4.3 Le Capteur Solaire Hybride PV/T.....	44
 Chapitre III : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE	
III.1 Introduction.....	47
III.2 La géométrie du problème étudié.....	47
III.3 Modèle mathématique.....	52
III.3.1 Équation de continuité.....	52
III.3.2 Équation de quantité de mouvement.....	53
III.3.3 Équation de conservation d'énergie.....	53
III.4 Hypothèses Simplificatrices Proposées.....	54
III.5 Équations du problème.....	55
III.5.1 Équations de continuité.....	55
III.5.2 Équations de quantité de mouvement.....	55
III.5.3 Équations de l'énergie.....	55
III.6 Modèle Mathématique thermique des composants d'un PV/T.....	56
III.6.1 Principe de l'étude thermique d'un PVT.....	57
III.6.2 Bilan énergétique du capteur hybride PVT.....	58
III.7 Expressions des performances électrique et thermiques des capteurs hybrides..	64
III.8 Conclusion.....	65
 Chapitre IV : FORMULATION NUMÉRIQUE	
IV.1 Introduction.....	67
IV.2 Procédures de la simulation.....	68
IV.2.1 Logiciel ANSYS Workbench.....	68
IV.2.1.1 Menu principal du logiciel de ANSYS Workbench.....	68
IV.2.1.2 Création de la géométrie.....	70
IV.2.1.3 Le maillage.....	75

Table des matières

IV.2.1.4 Configuration.....	79
IV.2.2 Application Web.....	80
IV.2.2.1 Menu principal du L'Application Web.....	81
IV.2.2.2 Input du l'application Web.....	81
IV.2.2.3 Output du l'application Web.....	81
IV.3 Propriétés thermo-physiques.....	82
IV.4 Conclusion.....	83
 Chapitre V : RESULTATS ET DISCUSSIONS	
V.1 Introduction.....	85
V.2 La Convergence.....	85
V.3 Résultats et Interprétation.....	86
V.3.1 Interprétation du champ de la température.....	87
V.3.2 Interprétation des champs de la vitesse.....	87
V.3.3 Interprétation Nombre de Nusselt.....	87
V.4 Conclusion.....	100
Conclusion Générale.....	101
Références bibliographiques.....	103
Annexe A.....	108
Annexe B.....	114
Résumé	

Listes des tableaux

Tableau II.1: Les fonctions et caractéristiques physiques de ces divers matériaux..	42
Tableau III.1 : Dimensionnement du capteur solaire étudiée.....	51
Tableau III.2: Caractéristiques thermo-physiques des différentes composantes du capteur hybride PV/T.....	51
Tableau IV.1: les propriétés de l'eau et le cuivre.....	82
Tableau IV.2: 1 ^{er} Cas les propriétés de nanofluide $\Phi = 0,1$	82
Tableau IV.3: 2 ^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\Phi = 0,2$	82
Tableau IV.4: 1 ^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\Phi = 0,5$	83
Tableau V.1 : Condition aux limites hydrodynamique et thermique.....	86

Liste des figures

Figure II.1: Présentation d'effet des nanoparticules dans un fluide dans un tube.....	12
Figure II.2: illustration microscopique des nano-fluides électronique : a) éthylène glycol + cuivre 0.5% ; b) eau +nanotube ; c) eau + alumine ; d) eau + or à 2nm.....	14
Figure II.3: Procédé de synthèse du nano fluide en une seule étape.....	15
Figure II.4: principe de la conduction thermique.....	25
Figure II.5: Principe du rayonnement thermique.....	26
Figure II.6: Action de fluide en mouvement dans la convection.....	27
Figure II.7: les constituants d'un capteur solaire thermique.....	33
Figure II.8: Capteur solaire moquette.....	35
Figure II.9: éléments d'un capteur solaire plan.....	35
Figure II.10: Capteurs sous vide.....	36
Figure II.11: Tube sous vide.....	36
Figure II.12: Capteur sous vide.....	37
Figure II.13: Capteur sous vide a caloduc.....	37
Figure II.14: Capteur à concentration.....	37
Figure II.15: Principe de Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque.....	38
Figure II.16: Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin.....	39
Figure II.17: Cellule monocristalline.....	40
Figure II.18: Cellule poly cristalline.....	41
Figure II.19: Modules photovoltaïques fabriquées en Silicium amorphe.....	41
Figure II.20: Coupe d'un module photovoltaïque.....	42
Figure II.21: L'Évolution de la Puissance Délivrée par un Ensemble de Modules PV en Fonction de la Température.....	44
Figure II.22: Schéma d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique.....	45
Figure III.1: Présentation de la géométrie étudiée.....	47
Figure III.2: Présentation de la couche vitre de protection.....	48
Figure III.3: Illustration de la géométrie du panneau photovoltaïque.....	49
Figure III.4: Présentation de la surface absorbante (Absorbeur).....	49
Figure III.5: Illustration de l'écoulement fluide caloporteur (nano-fluide).....	50
Figure III.6: Présentation de l'isolation thermique (Bois).....	50
Figure III.7: Présentation du mouvement du nano fluide dans le canal avec les conditions aux limites du phénomène en question.....	52
Figure III.8: Bilan thermique sous une coupe d'un système hybride photovoltaïque /thermique.....	56

Liste des figures

Figure III.9: Présentation des résistances thermique du système à étudier.....	57
Figure III.10: Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds.....	58
Figure III.11: Schéma représentant le bilan thermique au niveau de verre.....	59
Figure III.12: Schéma représentant l'échange thermique au niveau du vitre.....	60
Figure III.13: Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la cellule photovoltaïque.....	61
Figure III.14: Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar.....	62
Figure III.15: Schéma représentant le bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante.....	63
Figure IV.1 : Fenêtre lancement du logiciel.....	68
Figure IV.2 : Menu principal de Workbench.....	68
Figure IV.3 : Création d'une analyse (projet) en mécanique de fluide.....	69
Figure IV.4 : Création d'un projet en mécanique de fluide.....	70
Figure IV.5 : Création d'un modèle géométrique (Design Modeler).....	70
Figure IV.6 : Création d'un modèle (plan de vue).....	71
Figure IV.7 : Création d'esquisse.....	71
Figure IV.8 : Création d'esquisse et Définition des côtes.....	72
Figure IV.9: l'ajoutations de la matière dans le troisième dimension (Z).....	72
Figure IV.10: isolant de capteur solaire hybride PV/T.....	73
Figure IV.11 : Création la plaque absorbante et crée le canal de fluide caloporteur...	74
Figure IV.12 : déclaration de la zone de fluide caloporteur.....	74
Figure IV.13 : La géométrie de capteur solaire hybride PV/T étudiée.....	75
Figure IV.14 : Fenêtre de différentiation des éléments.....	76
Figure IV.15 : Spécification de la méthode de Maillage.....	77
Figure IV.16 : Maillage de la géométrie.....	78
Figure IV.17: Schéma représentant le volume de contrôle bidimensionnel.....	79
Figure IV.18 : Configuration du modèle par le solveur « Fluent ».....	80
Figure IV.19 : Menu principal de L'Application Web.....	81
Figure V.1 : Présentation de l'évolution des résidus de calcul (Convergence de la solution).....	85
Figure V.2 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module photovoltaïque à $Re=50$, $\Phi=0.1$	88
Figure V.3 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module photovoltaïque à $Re=100$, $\Phi=0.1$	88
Figure V.4.: Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module photovoltaïque à $Re=300$, $\Phi=0.1$	88
Figure V.5 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module à $Re=500$, $\Phi=0.1$	89

Liste des figures

Figure V.6 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module photovoltaïque à $Re=50, \Phi=0.2$	89
Figure V.7 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module à $Re=100, \Phi=0.2$	89
Figure V.8 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module à $Re=300, \Phi=0.2$	90
Figure V.9 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module à $Re=500, \Phi=0.2$	90
Figure V.10 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module à $Re=50, \Phi=0.5$	90
Figure V.11 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module photovoltaïque à $Re=100, \Phi=0.5$	91
Figure V.12 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module photovoltaïque à $Re=300, \Phi=0.5$	91
Figure V.13 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la surface de module photovoltaïque à $Re=500, \Phi=0.5$	91
Figure V.14 : Représentation de l'évolution de la température de la surface de module photovoltaïque à des différentes fractions volumiques.....	92
Figure V.15 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=50, \Phi=0.1$	92
Figure V.16 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de section de canal de refroidissement à $Re=100, \Phi=0.1$	92
Figure V.17 : Représentation de <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=300, \Phi=0.1$	93
Figure V.18 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de section de canal de refroidissement à $Re=500, \Phi=0.1$	93
Figure V.19 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=50, \Phi=0.2$	93
Figure V.20 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=100, \Phi=0.2$	94
Figure V.21 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=300, \Phi=0.2$	94
Figure V.22 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=500, \Phi=0.2$	94
Figure V.23 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=50, \Phi=0.5$	95
Figure V.24 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=100, \Phi=0.5$	95
Figure V.25 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=300, \Phi=0.5$	95
Figure V.26 : Représentation <i>la distribution de la température</i> de la section de canal de refroidissement à $Re=500, \Phi=0.5$	96

Liste des figures

Figure V.27: Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=50$, $\Phi=0.1$	96
Figure V.28 : Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=100$, $\Phi=0.1$	96
Figure V.29 : Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=300$, $\Phi=0.1$	97
Figure V.30 : Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=500$, $\Phi=0.1$	97
Figure V.31: Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=50$, $\Phi=0.2$	97
Figure V.32: Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=100$, $\Phi=0.2$	98
Figure V.33 : Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=300$, $\Phi=0.2$	98
Figure V.34: Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=500$, $\Phi=0.2$	98
Figure V.35: Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=50$, $\Phi=0.5$	99
Figure V.36: Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=100$, $\Phi=0.5$	99
Figure V.37 : Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=300$, $\Phi=0.5$	99
Figure V.38: Représentation <i>du contour de la vitesse</i> à $Re=500$, $\Phi=0.5$	100
Figure V.39 : Représentation de l'évolution du nombre de Nusselt à des différentes fractions volumiques.....	100

Nomenclature

Alphabet latin

- C_p : chaleur spécifique [$J. kg^{-1}. K^{-1}$].
 D_h : Diamètre hydraulique [m].
 e : épaisseur [m].
 G : Éclairement global [$W. m^{-2}$].
 g : L'accélération de la pesanteur [$m. s^{-2}$].
 Gr : nombre de Grashof [-].
 h : Coefficient de transfert de chaleur [$W. m^{-2}. ^\circ C^{-1}$].
 k : Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$].
 L : La longueur caractéristique [m].
 m : Masse [Kg].
 \dot{m} : le débit massique de fluide [$Kg. s^{-1}$].
 Nu : nombre de Nusselt [-].
 P : pression du fluide [Pa] .
 P_m : Périmètre mouillé en [m].
 q : Puissance volumique dissipée [W/m^3].
 Re : nombre de Reynold [-].
 Ra : Le nombre de Rayleigh[-]
 Ri : nombre de Richardson [-].
 S : surface [m^2].
 S_p : Section de passage en [m^2].
 T : température [K].
 T_p : Température de la surface [K]
 T_∞ : Température du milieu environnant la surface [K].
 U :Vitesse moyenne du fluide [$m. s^{-1}$].
 u : vitesse [m/s].
 V : volume [m^3]
 v : vitesse [m/s].
 w : vitesse [m/s].
 x : Coordonnée [-].

Nomenclature

- x : Variable d'espace dans la direction du flux [m].
 y : Coordonnée [-].
 z : Coordonnée [-].

Lettres grecques

- α : La diffusivité thermique [$m^2 s^{-1}$].
 β : Le Coefficient d'expansion volumique [K^{-1}].
 dt : Pas de temps
 ε : l'émissivité de la surface.
 ρ : Masse volumique du fluide [$\frac{Kg}{m^3}$].
 τ : Transmittivité
 μ : viscosité dynamique du fluide [$Kg . m^{-1} . s^{-1}$].
 ν : La viscosité cinématique du fluide [$m^2 s^{-1}$].
 σ : Constante de Stéphane Boltzmann [$\frac{K}{m^2} . K^4$]
 λ : Conductivité thermique [$W . m^{-1} K^{-1}$].
 N : facteur de forme empirique .
 Ψ : la sphéricité.
 Φ : fraction volumique.
 \emptyset : Flux de chaleur [W].
 φ : la densité du Flux chaleur [$W . m^{-2}$].
 ΔT : La différence de température [$^{\circ}C$ ou $^{\circ}K$].

Indices

- aill: ailettes .
cell: cellule photovoltaïque.
cond :conduction.
conv : convection.
e: entrée
f: fluide de base.
nf: nano-fluide.
np: des nanoparticules solides.
s : sortie
ted: Tedlar.
v: verre.

Introduction Générale

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre.

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. Le Soleil est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire et de la géothermie profonde.

Les sources d'énergie issues indirectement de l'énergie solaire sont notamment : l'énergie hydraulique, dérivée de l'énergie cinétique de l'eau dont le cycle dépend du Soleil ; l'énergie éolienne, provenant de l'énergie cinétique du vent lié à l'échauffement et à l'évaporation de l'eau, générés par le Soleil, la rotation de la Terre et la force de Coriolis ; l'énergie hydrolienne et l'énergie des vagues, liées aux mouvements des océans et des cours d'eau ; le bois énergie et l'énergie de la biomasse ainsi que la géothermie de très basse température, provenant des couches superficielles du sol réchauffées par le Soleil. On peut ajouter les combustibles fossiles, provenant de matières organiques créées par photosynthèse (charbon, pétrole, gaz naturel...) 2 auxquelles s'ajoute l'énergie biochimique de la matière organique vivante. [1]

L'énergie solaire est actuellement l'une des sources d'énergie renouvelable les plus répandues dans le monde grâce à sa disponibilité généralisée dans le monde, en particulier dans les régions à températures élevées (par exemple le sud d'Algérie). D'une manière générale. L'énergie solaire est utilisée et transférée par des systèmes, qui sont les capteurs solaires.

Dans un capteur solaire thermique la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique repose sur le fait de piéger le rayonnement électromagnétique entre deux surfaces, qui sont : le vitrage et l'absorbeur. Ce dernier communique cette énergie au fluide caloporteur utilisé, que ce soit l'eau ou l'air, Un capteur solaire classique, est composé de plusieurs éléments : La surface absorbante, Couverture transparente, Système de transfert de chaleur par le fluide et l'isolant, Cette énergie est transférée par les types de transfert de chaleur (convection, rayonnement).[2]

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un capteur solaire photovoltaïque, tous les systèmes PV sont constitués d'un panneau PV ou bien un module PV, cet élément de base permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Le module est constitué d'un assemblage en série et / ou en parallèle des cellules solaires, qui peuvent absorber jusqu'à 80% du rayonnement solaire incident. Une petite quantité de cette énergie incidente est transformée en énergie électrique [3], Mais le reste de cette énergie reste sous forme de chaleur, Cette chaleur entraîne une augmentation de la température PV qui à son tour, conduit à une diminution de son efficacité électrique. Il est trouvé que l'augmentation de la température module PV 1°C réduit leur efficacité électrique De plus, la chaleur générée peut altérer la structure interne de la cellule photovoltaïque et provoquer une dégradation thermique.[4]

Alors que l'énergie thermique a un effet négatif sur la durée de vie et l'efficacité électrique des cellules photovoltaïques.

Afin d'améliorer le rendement électrique et de protéger la durée de vie des cellules photovoltaïques, le refroidissement doit être effectué selon différentes techniques. Alors l'idée d'un couplage du système PV standard à un autre système thermique donnant naissance à un capteur hybride photovoltaïque/ thermique (PV/T) générant en même temps de l'électricité et de la chaleur avec un taux de conversion d'énergie plus élevée du rayonnement solaire absorbé. Cette combinaison de ces deux systèmes a permis d'extraire la chaleur de sous les panneaux tout en préservant l'efficacité électrique à un niveau acceptable.

Les techniques classiques du refroidissement des panneaux photovoltaïques (refroidissement par air ou eau). Ne sont pas suffisantes, en raison de la faible conductivité thermique de fluide de refroidissement. L'une des nouvelles méthodes récentes pour l'amélioration du transfert de chaleur au niveau des cellules photovoltaïques est l'application de la nanotechnologie par l'utilisation des **nano-fluides**.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Objectif de l'étude :

L'objectif de ce mémoire est une contribution numérique d'améliorer le refroidissement d'un système solaire hybride (PV / T) en utilisant des différents types des nano-fluides, en améliorant le rendement électrique et en protégeant également la durée de vie des cellules photovoltaïques.

Organisation du mémoire :

Ce mémoire est structuré comme suite :

Le premier chapitre est consacré sur une synthèse bibliographique des recherches précédentes sur les panneaux photovoltaïques thermiques.

Le deuxième chapitre illustre bien des généralités sur l'énergie solaire et comment utilisée cette énergie, ainsi des généralités sur les nano-fluide est sa modélisation thermo physiques et de décrire les différents modèles de la littérature souvent utilisés pour l'estimation des propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, viscosité dynamique masse volumique ...). Ce chapitre est achevé par des notions générales sur le transfert de chaleur.

Le troisième chapitre est consacré sur les équations gouvernent le phénomène physique en question (continuité, quantité de mouvement et l'équation de l'énergie), ainsi qu'un bilan thermique de chaque élément du panneau solaire hybride est présenté ainsi les hypothèses qui traitent ce problème.

Le quatrième chapitre présente avec détails de la formulation numérique à l'aide de logiciels ANSYS Workbench (version 2019), Création de la géométrie et génération du maillage et contrôle de la convergence de la solution lors d'itérations

Le cinquième chapitre illustre une interprétation énergétique des résultats numérique et graphique

Enfin, le mémoire est achevé par une conclusion générale où nous dégagerons les points forts et les résultats de notre étude et les perspectives qu'elle offre.

Chapitre I :

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

Plusieurs recherches expérimentales et numériques ont été faites pour l'amélioration du capteur solaire thermique (hybride) PVT. La majorité des recherches dans cet axe abordent d'analyser les performances thermique et électrique et d'expertiser l'économie des systèmes hybrides à travers l'appréciation du taux de couverture solaire fournie. Pour cela, certains nombres des chercheurs consacrent l'importance sur le développement de modèles thermiques analytiques ou mis ensuite une analogie électrique. Autre recherche intéressant à progresser les performances des éléments solaires existant en progressant les conditions de fonctionnement (pente, orientation des éléments ...) ou par des configurations géométriques créatrices proposées. Ainsi, elles sont basées sur la modification des dimensions ou les propriétés des matériaux constitutifs (isolation thermique, absorbeur, cellules photovoltaïques ...) ou des fluides caloporteurs (air, eau, nano-fluides.). Ces améliorations ont pour but d'augmenter la quantité d'énergie solaire absorbée et que le transfert de chaleur entre le réfrigérant et l'absorbant afin de réduire les pertes de chaleur avec l'extérieur. Les performances du capteur peuvent être calculées en tenant compte de la distribution de température entre les deux tubes du capteur.

I.2 Synthèse bibliographique :

Sarhaddi et al [5] ont étudié l'analyse et l'optimisation exégétique des modules du PV en matière de destruction exégétique ont été réalisés et que l'efficacité exégétique du module PV peut être améliorée si nous diminuons l'énergie thermique de la surface de l'unité Panneau photovoltaïque.

Evola et Marletta [6]

Ont réalisé une optimisation exégétique et thermoéconomique sur un système PVT vitré par l'utilisation de l'eau comme un fluide de travail. À partir la base de la deuxième analyse thermodynamique, Ils ont montré qu'une température d'entrée d'eau optimale peut être trouvée pour augmenter et maximiser l'efficacité exégétique globale du système.

Yu et al [7] ont créé un système hybride solaire pour un PV avec une filtration de l'air saisissant de la production de l'électricité, chauffage et alimentation en eau chaude un système intégré. Ils ont considéré un module photocatalytique qui a utilisé la partie ultraviolette de la lumière du soleil pour provoquer une dégradation

photocatalytique des polluants intérieurs et d'un module PVT qui a utilisé les parties visibles / infrarouges de la lumière du soleil pour produire de l'électricité et de l'air / de l'eau chaude (PC-PV / TAW), Ils ont étudié deux autres modules de système PV / eau thermique (PV / TW) et PV / système air / eau thermique (PV / TAW). Les résultats montrent que l'efficacité des modules (PC-PV / TAW), (PV / TAW) et (PV / TW) est de 64,4%, 69,6% et 67,7%, respectivement. Dans une étude expérimentale étude.

Yang et al [8] ont fait une comparaison entre le PVT et le PVT / PCM modules testés dans un simulateur solaire sous rayonnement constant. Ils ont étudié les paramètres, y compris l'efficacité électrique, température moyenne dans le réservoir de stockage thermique, puissance électrique totale, total collecté utile chaleur, efficacité totale de conversion de l'énergie solaire et primaire efficacité d'économie d'énergie. Les résultats montrent que les rendements thermique et électrique du PVT étaient de 58,35% et 6,98%, respectivement, tandis que les rendements correspondants de PVT / PCM étaient de 69,84% et 8,16%.

Dubey et Tiwari [9] ont conçu et testé un Collecteur d'eau PVT en extérieur pour composite climat de New Delhi. Ils ont observé qu'un collecteur l'eau de PVT donne une meilleure efficacité thermique et moyenne des cellules ce qui est conforme aux résultats rapportés par les précédents des chercheurs.

Joshi et al [10] ont étudié la performance et les caractéristiques d'un système PV et PVT basé sur l'énergie et l'efficacité exergetique, respectivement. Ils ont observé que l'efficacité énergétique et exergetique d'un système PVT sont supérieur à celui d'un système PV car le première intègre puissance thermique utile en plus de la puissance électrique où comme dans le cas d'un système PV, il est considéré comme une perte de chaleur à l'ambiante.

Celik et al [11] Ont été étudié et analysé numériquement L'amélioration du transfert de chaleur dans un canal vertical partiellement chauffé par l'utilisation des nanoparticules d'Al₂O₃, les résultats montrent que l'utilisation de nanoparticules dans le fluide de base augmente le taux de transfert de chaleur dans les canaux.

Elmir et al [12] Ont simulé numériquement Le refroidissement des cellules solaire par convection forcée en présence d'un nanofluide, Les résultats obtenus montrent que la présence de nanoparticules augmente le taux de transfert de chaleur ce qui nous conduit à avoir une bonne performance du panneau solaire ; ainsi, Ils ont

considéré le panneau solaire comme une cavité inclinée avec une pente de 30°. Application de nano-fluides augmente le nombre de Nusselt moyen et le taux de refroidissement. Ils ont rapporté 27% amélioration du taux de transfert de chaleur pour 10% d'alumine nano-fluide à $Re = 5$.

L'effet d'utilisation de nano-fluide pour améliorer le transfert de chaleur par convection mixte laminaire dans un canal horizontal, qui contient trois ailettes montées sur la paroi inférieure chauffée ont étudié numériquement par **Khentoul et al [13]**, Les résultats obtenus montrent que L'augmentation de la fraction volumique solide provoque une amélioration du transfert de chaleur.

Pishkar et al [14] Ont estimé par l'utilisation des méthodes numérique les performances thermiques de deux ailettes placées sur la surface inférieure d'un canal horizontal et refroidi avec un fluide qu'est l'eau pure ou un nanofluide (Cu-eau). Les résultats obtenus présentent que le taux de transfert de chaleur des ailettes est significativement affecté par la distance et la conductivité thermique des ailettes. Aussi, ils ont noté que l'influence de la fraction volumique solide sur l'augmentation du transfert de chaleur est plus illustrée à des valeurs plus élevées du nombre de Reynolds.

Faizal et al [15] ont montré que le rendement du collecteur solaire avec nano-fluides calculé en fonction de la densité du fluide de travail, de la chaleur spécifique et débits massiques. Que les résultats ont confirmé que la densité plus l'élévée et la chaleur spécifique la plus faible de nano-fluides offre un rendement thermique supérieur à celle de l'eau et peuvent réduire la surface de capteurs solaires environ 25,6%, 21,6%, 22,1% et 21,5% pour CuO, SiO₂, TiO₂ et Al₂O₃ nano-fluides. Par l'utilisation d'un nano-fluide et sa contribution à la diminution de la taille pour estimer la réduction des coûts ont étudié.

Parvin et al [16] Analysé numériquement, les effets de la fraction volumique de nanoparticules ($\Phi = 0\%$, 1%, 3%, 5% et 7%) et le nombre de Reynolds ($Re = 200, 400, 600, 800$ et 1000) sur la distribution de la température, le taux de production d'entropie, et le rendement du collecteur. Le fluide de travail est un nano-fluide incompressible Cu-eau sous un régime laminaire.

Les résultats obtenus indiquent que l'augmentation de la concentration des particules augmente la viscosité du fluide et diminue le nombre de Reynolds, Il est important de trouver la fraction volumique optimale de nanoparticules pour chaque

application, Le rendement du capteur peut être amélioré près de deux fois à l'aide nano-fluide eau- Ag et eau-Cu eau avec une concentration de 3%, La production d'entropie est améliorée jusqu'à $\phi = 3\%$.

Sokhan Sefat et al [17] ont calculé numériquement l'amélioration de transfert de chaleur pour un nano-fluide Al_2O_3 /huile synthétique avec des concentrations tendent jusqu'à 5% dans un tube creux de collecteur parabolique à différentes températures de fonctionnement, ont conclu aussi que le nano-fluide améliore le coefficient transfert thermique par convection.

l'étude numérique de l'influence du nombre de Prandtl sur la circulation, les champs de température, Le taux de transfert par convection et rayonnement, la température moyenne apparente des fluides et le champ de vitesse moyen dans un capteur solaire à base de nano-fluide eau/ Al_2O_3 ont effectué par **Nasrin et al[14]**, Les résultats ont montré qu'avec l'augmentation de nombre de Pr 1.73 à 6.62, le transfert de chaleur par convection augmente d'environ 26% et 18% pour nano-fluide et le fluide de base respectivement, tandis que le rayonnement augmente de 8%.

Colangelo et al [18] Ont montré par voie expérimentale que l'amélioration de la conductivité thermique des nano-fluides avec de l'huile diathermique est supérieure à celle de l'eau dans des applications à haute température telles que des capteurs solaires. Ils ont observé que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la taille des nanoparticules.

Al-Waeli et al [19] effectué une étude expérimentale approfondie utilisant Al_2O_3 / eau, CuO / l'eau et les nano-fluides SiC / eau comme réfrigérants pour modules PVT avec quatre fractions de volume différentes de 0,5, 1, 2, 3, et 4%. Les résultats obtenus indiquent que le carbure de silicium les nanoparticules ont la meilleure stabilité et la plus haute résistance thermique conductivité. De plus, ils ont montré que le nano-fluide réduit la température du système PV / T intérieur et augmente sa puissance générée.

Sardarabadi et al [20] Ont étudié la température de surface, rendements thermiques et électriques pour PVT et PVT / PCM modules utilisant du nano-fluide ZnO / eau comme fluide de refroidissement points de vue énergétiques et exergetiques. Les résultats obtenus indiquent que la température moyenne des cellules est réduite de

10 C et 16 C pour PVT et PVT / PCM, respectivement par rapport à celui du système de référence (PV).

Al-Waeli et al [21], a achevé une étude expérimentale approfondie sur quatre systèmes de Panneau photovoltaïque conventionnel, PVT à base d'eau (PVT.water), avec PCM (PVT.PCM.w) et PVT à base de nano fluides avec PCM / nano-Sic (PVT. n-PCM.nf). Les résultats obtenus indiquent qu'une efficacité électrique maximale de 13,7%, 12,32%, 9,92% et 7,11% pour PVT.n-PCM.nf, PVT.PCM.w, PVT.w et PV, respectivement.

Chapitre II :

MODÉLISATION THERMOPHYSIQUE DES NANOFLUIDES ET L'ÉTATS DE L'ART SUR LES PANNEUX SOLAIRES

II.1 Introduction :

Le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies. Bien qu'il se manifeste sous divers trois modes (rayonnement, conduction et convection), cette dernière est la plus réponde dans certains domaines bien spécifique tels que le refroidissement des processeurs et composants électroniques, les radiateurs et les échangeurs de chaleurs, etc. [20]

L'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermo-physiques des fluides utilisés.

Les fluides de transfert de chaleur communs tels que l'eau, l'éthylène glycol et l'huile de moteur ont des capacités de transfert de chaleur limités en raison de leurs faibles propriétés de transfert de chaleur (une faible conductivité thermique). [21]

Dans ces applications, le besoin d'améliorer le transfert de chaleur par convection est le but principal de plusieurs recherches. Parmi les méthodes utilisées pour améliorer les échanges thermiques, Une technique innovante utilisant un mélange de nanoparticules avec le fluide de base a été introduite par Choi (S.U.S. Choi (1995)). [22]

Les conductivités thermiques des métaux et des oxydes métalliques sont jusqu'à trois plus élevées celles de ces fluides. Donc il est naturellement souhaitable de combiner les deux substances pour produire un milieu de transfert de chaleur qui se comporte comme un liquide, mais qui a la conductivité thermique proche de celle d'un métal. Ces mélanges sont appelés les **nano-fluides**.

Ceux sont des suspensions de particules de taille nanométrique (**nanoparticules**) dans un fluide de base sont utilisés pour améliorer le taux de transfert de chaleur par l'intermédiaire de leur conductivité thermique plus élevée par rapport au fluide de base.[21]

II.2 Généralités sur les nanoparticules et les Nano-fluides :

II.2.1 Les nanoparticules :

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique 1 à 100 nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000000001 \text{ m}$): Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire.[23]

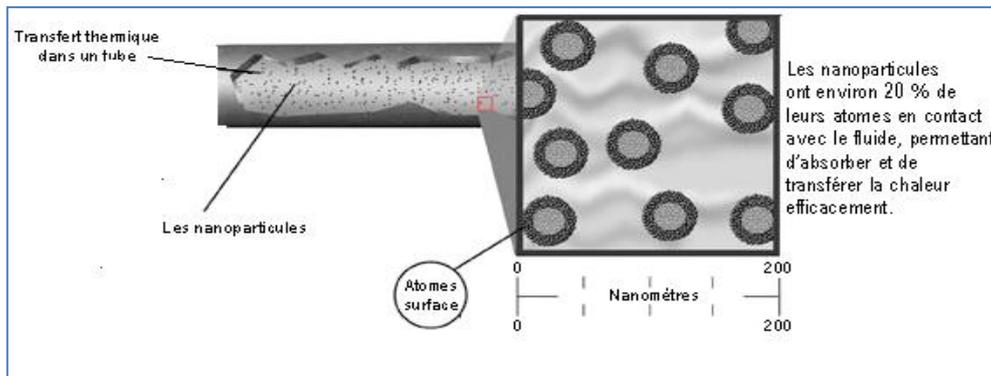


Figure II.1: Présentation d'effet des nanoparticules dans un fluide dans un tube.

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nano fluides sont :

Les nanoparticules des oxydes métalliques :

- ✓ L'oxyde d'aluminium, Al_2O_3 .
- ✓ L'oxyde de cuivre, CuO .
- ✓ L'oxyde de silicium, SiO_2 .
- ✓ L'oxyde de titanium, TiO_2 .

Les nanoparticules non métalliques :

- ✓ Les nanotubes de carbone, CNT.
- ✓ Le diamant, C.

Les nanoparticules métalliques :

- ✓ L'aluminium, Al.
- ✓ Le cuivre, Cu.
- ✓ L'or, Au.
- ✓ L'argent, Ag.
- ✓ La silicone, Si.

Nanotubes de carbone. [24]

II.2.2 Les Nano-Fluides :

Les nano-fluides 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'améliorer certaines propriétés.

Un nano-fluide 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 à l'améliorer certaines de propriétés, notamment thermiques.

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 ne disposent que d'une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins. Avec les nano fluides, l'idée est alors d'insérer, au sein du fluide de base, des nanoparticules afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange.[25]

Le choix des liquides de bases est primordial pour un nano-fluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule.

Les liquides de base les plus utilisés sont :

- L'eau.
- L'éthylène-glycol, EG.
- Les huiles.
- Le Toluène.
- Les fluides de réfrigération (R12.R22.....). [24]

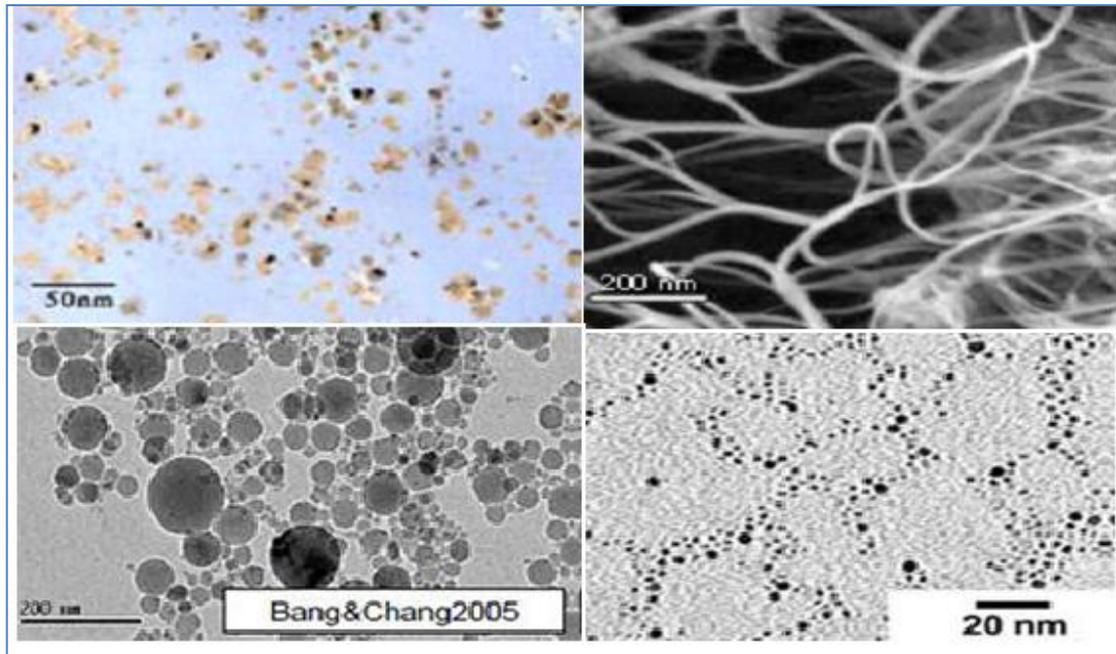


Figure II.2 : illustration microscopique des nano-fluides électronique : a) éthylène glycol + cuivre 0.5% ; b) eau +nanotube ; c) eau + alumine ; d) eau + or à 2nm. [26]

II.2.3 Fabrication et préparation des Nano-Fluides :

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

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

En outre, il existe deux méthodes principales pour produire des nano-fluides :

- **La méthode en une seule étape :** les nanoparticules sont produites dans le fluide de base. Utilisées pour certains nano fluides, évitent l'oxydation et la décantation des particules, est moins industrielle.
- **La méthode en deux étapes :** les nanoparticules sont produites une fois et dispersées dans le fluide de base. Il évite les ajustements en raison des forces attractives entre les molécules et effectue un bon travail mécanique. Pour ajuster le ph, la surface de la particule doit être chargée en utilisant une répulsion électrostatique.

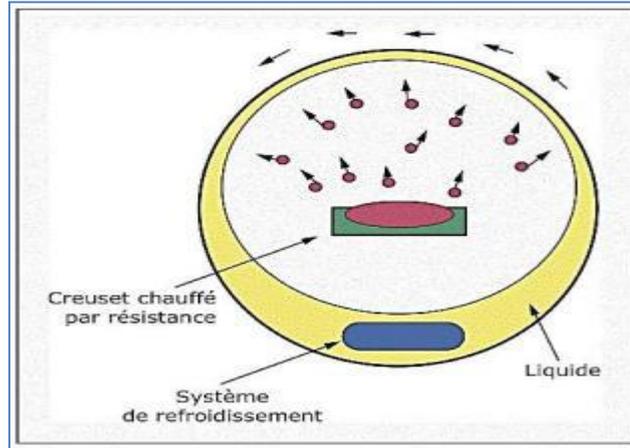


Figure II.3: Procédé de synthèse du nano fluide en une seule étape.

Les procédés de fabrication font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients physique ou chimique et certains ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules pour une production de masse vu les contraintes inhérentes au procédé. Les principaux moyens peuvent être :

- Le mécano synthèse (broyage à haute énergie).
- La précipitation chimique (réduction de sels métalliques par exemple).
- Les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur (CVD ou PVD).
- Les dépôts chimiques en phase vapeur assisté par plasma (PECVD).
- La condensation de vapeurs par détente brutale dans des tuyères supersoniques.
- La pulvérisation cathodique radiofréquence.
- La sublimation par ablation laser (vaporisation d'un échantillon par impulsion laser).
- La pyrolyse laser (interaction entre un faisceau laser continu et un flux de réactifs).
- La désintégration d'électrodes submergées par passage d'étincelles. [27]

II.2.4 Propriétés thermo-physiques des Nano-Fluides :

Les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) sont des solutions profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable cette modification sur les valeurs des paramètres thermo-physiques du nano-fluide obtenus (la nature des nanoparticules, leur taille, leur formes, la fraction volumique Φ , la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu, etc.).

On supposera que les nanoparticules dans le fluide de base peuvent être facilement fluidisées et par conséquent, le modèle à une seule phase, où la phase fluide et les nanoparticules sont en état d'équilibre thermodynamique et se déplacent à la même vitesse locale avec ce dernier.

II.2.4.1 La fraction volumique (Φ) :

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour les nano-fluides, puisque les calculs de toutes les autres propriétés sont basés sur la fraction volumique. On peut la définir comme étant le 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 :

$$\Phi = \frac{\text{volumesolide}}{\text{volumetotaldunanofluide}} = \frac{V_{np}}{V_f + V_{np}} \quad (\text{II.1})$$

Où V_{np} : Volume des nanoparticules solides [m^3].

V_f : Volume du fluide de base [m^3].

II.2.4.2 La Masse volumique (ρ) :

Pour calculer la masse volumique d'un nano-fluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide de base) en fonction de la fraction volumique (ρ) a une température T donnée.

La masse volumique de ce mélange est définie comme suite :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m_{nf}}{V_{nf}} \right) = \frac{m_f + m_{np}}{V_f + V_{np}} = \frac{\rho_f V_f + \rho_{np} V_{np}}{V_f + V_{np}} \quad (\text{II.2})$$

On déduit alors la masse volumique du nano-fluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \Phi)\rho_f + \Phi\rho_{np} \quad (\text{II.3})$$

Où :

$\rho_{nf}, m_{nf}, V_{nf}$ désignent respectivement la masse volumique, la masse et le volume du nano-fluide.

ρ_f, m_f, V_f la masse volumique, la masse et le volume du fluide de base.

$\rho_{np}, m_{np}, V_{np}$ la masse volumique, la masse et le volume du fluide des nanoparticules.

II.2.4.3 La chaleur spécifique (C_p) :

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 nano-fluide, on a retrouvé suivant les auteurs l'une ou l'autre des deux relations suivantes.[28]

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano-fluide, on peut citer les deux modèles suivants :

A. Modèle du Xuan et Roetzel [29] :

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

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \Phi)(\rho C_p)_f + \Phi(\rho C_p)_{np} \quad (\text{II.4})$$

B. Modèle du Pak et Cho [30] :

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

$$(C_p)_{nf} = (1 - \Phi)(C_p)_f + \Phi(C_p)_{np} \quad (\text{II.5})$$

Où $(C_p)_{nf}, (C_p)_f, (C_p)_{np}$ désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nano-fluide, du fluide de base et des nanoparticules.

II.2.4.4 La Conductivité thermique (K) :

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très important 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.

La conductivité thermique est définie comme une variation de température et une conductivité thermique différente due à la fraction volumique et aux nano fluides, en fonction des nanoparticules, la conductivité thermique d'un nano-fluide est calculée selon les deux modèles suivants :

A. Modèle de Maxwell :

Maxwell (1873) [31] à présenter son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nano-fluide en fonction de la fraction volumique de nano-fluide, mais ce modèle est acceptable uniquement dans le cas des nano-fluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, est donné par la formule suivante :

$$K_{nf} = \frac{K_{np} + 2K_f + 2(K_{np} - K_f)\Phi}{K_{np} + K_f - (K_{np} - K_f)\Phi} K_f \quad (\text{II.6})$$

Où

K_{nf} : La conductivité thermique du nano-fluide.

K_f : La conductivité thermique du fluide de base.

K_{np} : La conductivité thermique des particules solides.

B. Modèle de Hamilton et Crosser :

Le modèle de Hamilton-Crosser (1962) [32], est une extension du modèle de Maxwell, qui tient compte de la forme des particules. En effet, pour prendre en compte la non-sphéricité des particules

La conductivité thermique est donnée dans la relation suivante :

$$K_{nf} = \frac{K_{np} + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_{np})\Phi}{K_{np} + (n-1)K_f + (K_f - K_{np})\Phi} K_f \quad (\text{II.7})$$

Où n : facteur de forme empirique donné par $n = \frac{3}{\Psi}$

$n = 3$ pour les particules sphériques.

$n = 6$ pour les particules cylindriques.

Avec Ψ est la sphéricité définit comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule, 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). Ils ont proposé de modéliser les nano-fluides 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. Le modèle de Yu et Choi est donné par la formule suivante :

$$K_{nf} = \frac{K_{np} + 2K_f + 2(K_{np} - K_f)(1 + \beta)^3 \Phi}{K_{np} + 2K_f - 2(K_{np} + K_f)(1 + \beta)^3 \Phi} K_f \quad (\text{II.8})$$

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

D. Modèle de Bruggemen :

Le modèle propose par Bruggeman (1935) [33] semble mieux approximer certains résultats expérimentaux compare aux autres modelés pour le cas des nanoparticules sphériques avec aucune limitation concernant les concentrations des nanoparticules,

$$K_{nf} = \frac{(3\Phi - 1) \frac{K_{np}}{K_f} + \{3((1 - \Phi) + \sqrt{\Delta})\}}{4} K_f \quad (\text{II.9})$$

Avec : $\Delta = \left[((3\Phi - 1) \left(\frac{K_{np}}{K_f} \right)^2 + (2 - 3\Phi)^2 + 2(2 + 9\Phi - 9\Phi^2) \left(\frac{K_{np}}{K_f} \right)) \right]$

II.2.4.5 Le Coefficient d'expansion volumique (β) :

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nano-fluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nano-fluides et par analogie avec la relation : $\rho_{nf} = (1 - \Phi)\rho_f + \Phi\rho_{np}$

On déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \Phi)\beta_f + \Phi\beta_{np} \quad (\text{II.10})$$

Où β_{nf} : Le coefficient de dilatabilité du nano-fluide.

β_f : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_{np} : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

II.2.4.6 La 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 nano-fluide 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 nano-fluide. Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes :

A. Modèle d'Einstein :

La viscosité dynamique d'un nano-fluide est donnée par Einstein (1906) pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2,5\Phi) \quad (\text{II.11})$$

Où μ_{nf} : La viscosité dynamique du nano-fluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

Φ : La fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable juste pour $\Phi = 0.03$

B. Modèle de Brinkman :

Brinkman (1952) a étudié la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\Phi)^{2,5}} \quad (\text{II.12})$$

Remarque : Pour les faibles fractions volumiques, la relation de Brinkman conduit exactement à celle d'Einstein. Ces relations n'intègrent pas les effets du mouvement Brownien ni ceux de la taille des particules.

II.2.5 Domaines d'applications des nano-fluides :

Les nano-fluides peuvent être employées pour améliorer le transport de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermique. Dans cette section, quelques exemples d'application seront présentés tel que le transport, la micro- électronique, le nucléaire et la biomédicale. [34]

1. Refroidissement des systèmes thermiques :

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides améliore le taux de refroidissement.

2. Refroidissement des systèmes électroniques :

Dans les circuits intégrés, les nano-fluides ont été considérés comme fluide de refroidissement. Un nano-fluide à base d'eau est empli pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur.

3. Refroidissement des systèmes nucléaires :

L'institut de technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour les nouvelles nanotechnologies (nano-fluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nano-fluides sur la sûreté neutronique, et la performance économique des systèmes nucléaires.

4. Refroidissement des systèmes militaires :

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermiques très élevés ($q > 500$ à 1000 W/cm^2), où les nano-fluides ont montré leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires, y compris les véhicules militaires, les sous-marins, et les diodes lasers à haute puissance.

5. La biomédecine :

Les nano-fluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédicale. Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement de cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de région chirurgicale. [34]

6. D'autres applications :

Il y a des situations nombreuses où l'augmentation de l'efficacité du transfert thermique peut être liée à la qualité, la quantité, et au coût d'un produit d'un processus. Par exemple, dans l'industrie de l'énergie renouvelable, les nano-fluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur à partir des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité d'énergie. Les liquides réfrigérants de nano-fluide ont une application potentielle dans la majorité des industries de transformation, telles que les matériaux, la production chimique, la nourriture, la boisson, le pétrole et le gaz. [34]

II.6 Les avantages des nano-fluides :

- ✓ Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- ✓ Haute dispersion et stabilité avec prédominance 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.7 Les inconvénients des nano-fluides

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

II.3 Généralité sur le transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'un gradient de température entre deux corps, ce qui permet le transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en réalité à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique. [35]

On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

Conduction : la chaleur passe d'un corps à un autre, par contact.

Convection : un corps qui se déplace emmène avec lui, la chaleur qu'il contient. La quantité de chaleur ainsi transportée peut être importante, surtout dans le cas d'un changement de phase.

Rayonnement (radiation) : l'ensemble des corps émettent de la lumière, selon leur température, et sont eux-mêmes aient par la lumière qu'ils absorbent.

II.3.1 Transfert de chaleur par conduction :

La conduction est une transmission de chaleur dans la matière sans mouvement qui fait passer la chaleur des zones chaudes vers les zones froides à l'aide de deux mécanismes (vibration moléculaire, diffusion électronique). Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement. [36]

La loi fondamentale de ce mode de transfert (**Loi de Fourier**) exprime le flux de chaleur transmis dans un milieu de conductivité thermique \mathbf{K} ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ou $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$) à travers une surface S , établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822 [37], elle s'écrit :

$$\Phi = -K S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{II.13})$$

Le flux de chaleur par conduction est proportionnel au gradient de température.

Sous forme algébrique et suivant la direction x perpendiculaire à la surface S , le flux s'écrit :

$$\Phi = -K S \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.14})$$

Où :

ϕ : flux de chaleur transmis par conduction (w).

K : Conductivité thermique du milieu ($Wm^{-1}K^{-1}$ Ou $Wm^{-1}C^{-1}$).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en x en ($^{\circ}K.m^{-1}$).

Ainsi que la densité de chaleur ϕ en Wm^{-2} : $\phi = \frac{\phi}{S} = -K \frac{dT}{dx}$

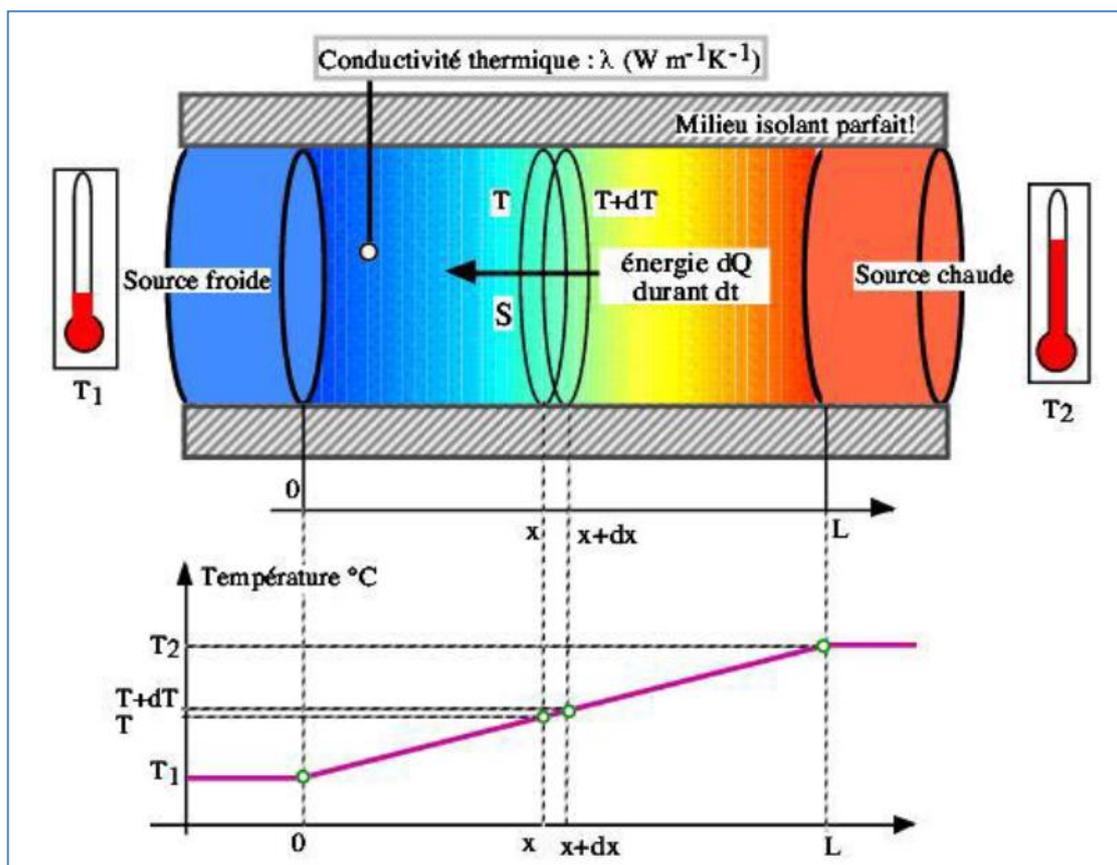


Figure II.4: principe de la conduction thermique. [20]

II.3.2 Transfert de chaleur par rayonnement :

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à autre froid sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes électromagnétiques dans l'espace. C'est donc le seul mode de transfert de chaleur qui peut se propager dans le vide. [36]

Ce mode de transfert de chaleur concerne les longueurs d'ondes comprises entre 100 μm et 0,01 μm et va de l'infrarouge à l'ultraviolet en couvrant le visible.

Le rayonnement est une vibration électromagnétique qui se transmet dans le vide à la vitesse de lumière ($3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$), Dans ce cas nous avons la relation :

$$\Phi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.15})$$

Avec : Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (w).

σ : Constante de Stéphan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

ε_p : Facteur d'émission de la surface (l'émissivité de la surface).

T_p : Température de la surface (k).

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (k).

S : Aire de la surface (m^2).

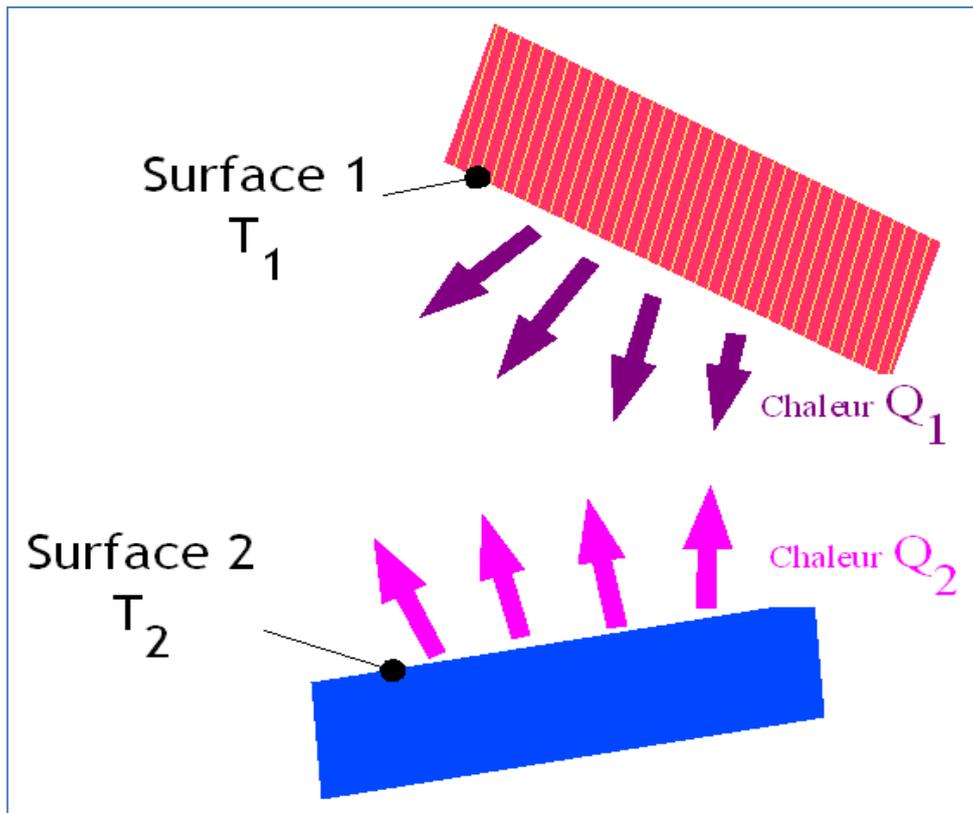


Figure II.5: Principe du rayonnement thermique. [27]

II.3.3 Transfert de chaleur par convection :

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et de mouvement de milieu, elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transport de l'énergie entre une surface solide et un liquide ou gaz.

Le transport d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes.

D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacent. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température est l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte simultanément, le fluide et l'énergie. L'énergie est à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.[38]

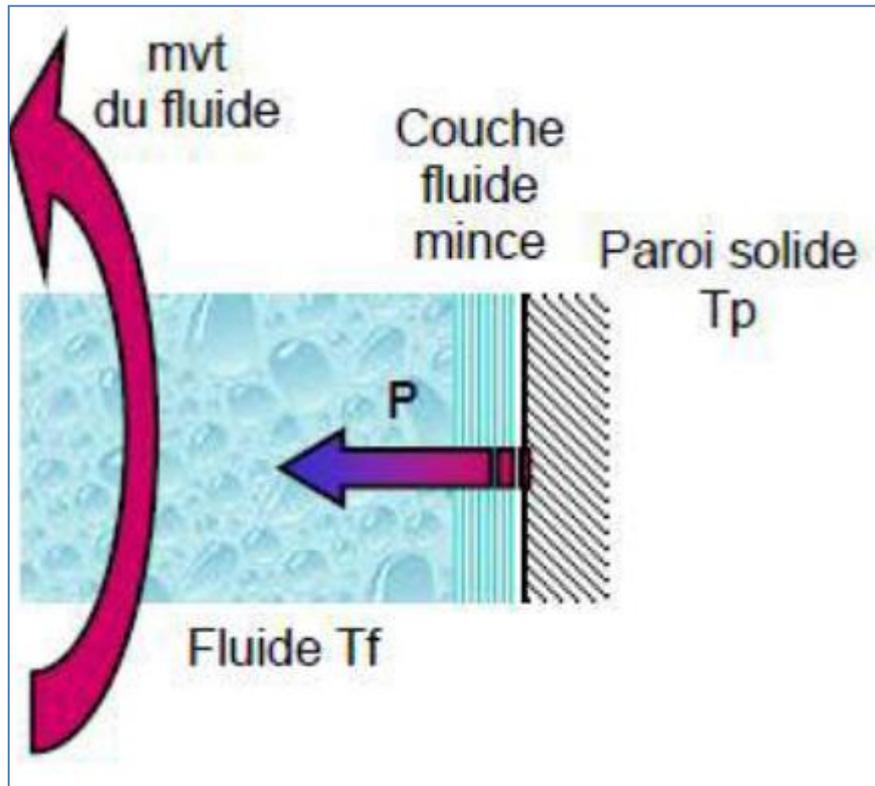


Figure II.6: Action de fluide en mouvement dans la convection. [38]

La puissance transférée par convection est donnée par la relation :

$$\Phi = h S (T_s - T_a) \quad (\text{II.16})$$

Avec Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2).

T_s : Température de surface du solide (°C)

T_a : Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

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

II.3.3.1 Convection libre (naturelle) : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, il en résulte une convection laminaire ou turbulente, suivant la valeur du nombre de Grachof ou de Rayleigh. [37]

II.3.3.2 La convection forcée : Ce type est un résultat quand le mouvement du fluide est créé par une différence de pression. Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement (régime turbulent ou régime laminaire). [36]

La relation générale pour la convection forcée est $\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$. En microélectronique, le transfert de chaleur obéit alors à l'expression suivant :

$$\text{Nu} = c \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^m \quad (\text{II.17})$$

Où c , n et m sont des constantes dépendant des caractéristiques du solide et du fluide. [40]

II.3.3.3 La 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 convections sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. [22]

II.3.4 Les nombres sans dimension :

L'étude des problèmes de transfert de chaleur par convection implique la résolution d'équations différentielles qui décrivent la mécanique des fluides, les échanges d'énergie, les transferts de masse. Ces équations sont généralement liées et difficiles à résoudre théoriquement, ce qui conduit à associer à la théorie l'expérimentation permettant de trouver les valeurs des grandeurs recherchées.

L'expérimentation est souvent menée à une échelle différente de la réalité industrielle. La nécessité de définir des corrélations qui soient applicables à des appareils de tailles différentes opérant dans des situations différentes conduit à l'utilisation de paramètres adimensionnels qui permettent de définir des similitudes.

On peut déterminer les nombres sans dimensions en considérant toutes les forces qui peuvent s'appliquer sur un fluide. Ainsi, on a défini les forces et leurs unités de mesure dans le système international [SI] par rapport aux variables fondamentales :

- ❖ Les forces d'inertie : $F_a = m \cdot a$ $[F_a] = \rho L^2 U^2$
- ❖ Les forces de viscosité : $F_\mu = \tau \cdot s$ $[F_\mu] = \mu L U$
- ❖ Les forces de gravité : $F_g = m \cdot g$ $[F_g] = \rho g L^3$

II.3.4.1 Nombre de Reynolds :

Reynolds c'est un ingénieur anglais spécialiste de l'hydrodynamique qui introduit ce nombre qui est constamment utilisé dans les calculs des régimes d'écoulements.

Pour connaître le régime d'écoulement nous utilisons le nombre de Reynolds, ce nombre est proportionnel au rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité, en fonction de la masse volumique ρ , de sa viscosité dynamique μ , de sa vitesse moyenne, et de diamètre hydraulique [38]. Il s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{F_a}{F_\mu} = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces de viscosité}} \quad (\text{II.18})$$

$$\frac{F_a}{F_\mu} = \frac{\rho L^2 U^2}{\mu L U} = \frac{L U}{\nu} = \text{Re} \quad (\text{II.19})$$

Où V : La vitesse moyenne [$m s^{-1}$].

L : La longueur caractéristique [m].

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

μ : La viscosité dynamique [$Pa \cdot s$]

Pour les écoulements internes la dimension caractéristique du système à utiliser dans le calcul du nombre de Reynolds est le diamètre hydraulique [m] qui est donné par la

relation suivant : $D_h = \frac{4S}{P}$

Où S : est la surface du tuyau [m^2].

P : est son périmètre [m].

II.3.4.2 Nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl est défini comme le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique. Il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux, Il peut être exprimé comme :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} \quad (\text{II.20})$$

Où μ : La viscosité dynamique [$Pa \cdot s$].

C_p : La chaleur spécifique à pression constante [$J / (kg \cdot K)$].

K : La conductivité thermique [$W m^{-1} K^{-1}$].

II.3.4.3 Nombre de Nusselt :

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

$$Nu = \frac{h L}{K} \quad (\text{II.21})$$

Où h : Le coefficient d'échange thermique [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

II.3.4.4 Nombre de Grashof :

Le nombre de Grashof est défini comme le rapport entre les forces de gravité par les forces visqueuse, Il peut être exprimé comme :

$$Gr = \frac{F_g}{F_\mu} = \frac{\text{forces de gravité}}{\text{forces de viscosité}} \quad (\text{II.22})$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \quad (\text{II.23})$$

Où g : L'accélération de la pesanteur [$m \cdot s^{-2}$].

ΔT : La différence de température [$^{\circ}C$].

β : le coefficient d'expansion thermique [$1/K$].

II.3.4.5 Nombre de Rayleigh :

Le nombre de Rayleigh est défini comme le rapport 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 :

$$Ra = \frac{g}{\nu \alpha} (T_s - T_\infty) \cdot L^3 = Gr \cdot Pr \quad (\text{II.24})$$

Où T_s : La température de la paroi [$^{\circ}C$].

T_∞ : La température du fluide loin de la paroi [$^{\circ}C$].

ν : La viscosité cinématique du fluide [$m^2 s^{-1}$].

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

II.3.4.6 Nombre de Richardson :

Le nombre de Richardson est défini comme le rapport entre le nombre de Grashof sur le carré du nombre de Reynolds, Il peut être exprimé comme :

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (\text{II.25})$$

$$Ri = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L}{U^2} \quad (\text{II.26})$$

Si : $Ri < 0.1$ c'est la convection forcée qui domine.

Si : $Ri > 10$ c'est la convection naturelle qui domine.

Si : $0.1 < Ri < 10$ c'est le domaine de la convection mixte (naturelle et forcée).

II.4 État de l'Art sur les Capteur Hybrides PVT :

La nécessité d'énergie solaire donne la chance de naissance de plusieurs technologies des capteurs solaires. Il existe principalement trois types qui utilisent directement l'énergie solaire : les capteurs thermiques, photovoltaïques et les capteurs hybrides.

II.4.1 Energie solaire thermique :

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

II.4.1.1 Capteurs solaire thermiques :

Le capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la transférer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur. Cette énergie thermique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels.

Cette technologie est différente de celle des panneaux photovoltaïques, qui transforment la lumière (les photons) en électricité, et est intégrée dans les panneaux photovoltaïques et thermiques, qui combinent les deux technologies.

II.4.1.2 Composition des capteurs solaires :

Un capteur solaire thermique est constitué généralement d'un coffre rigide et vitré, à l'intérieur duquel une plaque et des tubes métalliques noirs (absorbeurs), qui reçoivent le rayonnement solaire, chauffent un liquide caloporteur (antigel) voir Figure II.7.

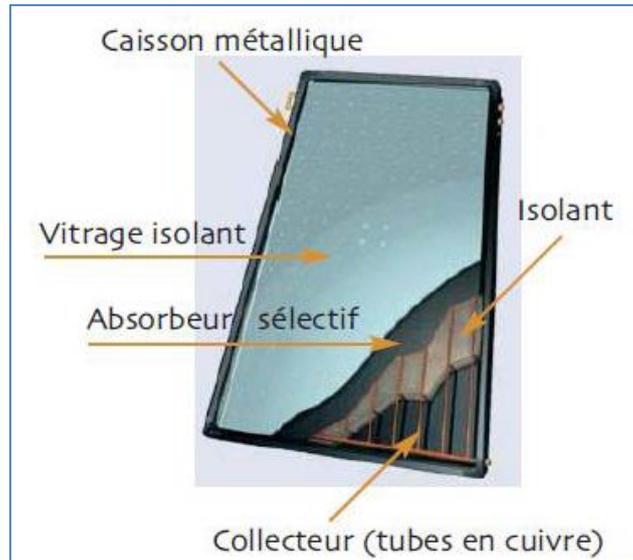


Figure II.7: les constituants d'un capteur solaire thermique.

❖ **Couverture transparente :**

Elle accroît sensiblement le rendement du capteur, par effet de serre. La couverture a une fonction de protection de l'absorbteur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Généralement, on utilise le verre comme couverture transparente.

La propriété physique intéressante du verre utilisé est qu'il laisse passer le rayonnement solaire de faible longueur d'onde (UV et visible) et qu'il réfléchit les rayons infrarouges d'une surface émettrice telle que l'absorbteur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbteur et la couverture : c'est l'effet de serre.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission τ qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage.

❖ **La surface Absorbante :**

Le rôle de l'absorbteur est de capter au maximum le rayonnement solaire et d'en réémettre le moins possible.

En effet, l'absorbteur, en chauffant, réémet des rayons infrarouges. Le revêtement de la surface est donc très important : il définit les caractéristiques de l'absorbteur qui sont l'absorption α du rayonnement solaire et l'émission ε des rayons IR. Une surface absorbante aura des performances optimums lorsque $\alpha = 1$ et $\varepsilon = 0$. De telles valeurs peuvent être obtenues grâce à un traitement de surface par des procédés électrochimiques ou électro physiques (traitement sous vide).

A titre d'exemple, une peinture noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption entre 0,9 et 0,95 mais avec un facteur d'émission IR très élevé (0,85) variable selon l'état de surface.

❖ **Système de transfert de chaleur par le fluide :**

Les tuyaux sont soudés sous l'absorbeur. A l'intérieur de ces tuyaux circule un fluide caloporteur (habituellement soit l'air ou l'eau ou un nano-fluide qui est le cas dans notre travail) de manière continue. Le fluide reçoit les calories de l'absorbeur à travers ces tuyaux.

❖ **L'isolant :**

Limiter les pertes thermiques vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur. Ainsi une couche de polystyrène ou de laine de verre réalise l'isolation en face arrière du dispositif.[40]

II.4.1.3 Les types de capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires thermiques diffèrent généralement selon la technique d'interception du rayonnement solaire, le type du fluide caloporteur ou encore la plage indicative de la température d'utilisation. On distingue plusieurs types de capteurs solaires thermiques : les capteurs non-vitrés, les capteurs plans, les capteurs sous vide, les capteurs à concentration.

A- Capteurs solaires non vitré :

par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple (réseau de tubes plastiques noirs, le plus souvent en EPDM) utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été ; ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines.

Ils transfèrent si bien la chaleur de l'air (et provenant de l'air) qu'ils peuvent réellement « saisir » la chaleur au cours de la nuit lorsqu'il fait chaud et qu'il y a du vent à l'extérieur. [42]



Figure II.8: Capteur solaire moquette.

B- Capteurs solaires plans :

Un capteur plan est un système relativement simple composé d'un absorbeur, une surface « noire » absorbant l'énergie solaire et munie de moyens pour transférer l'énergie absorbée vers le fluide caloporteur, ainsi que d'une couverture protégeant l'absorbeur tout en étant transparente au rayonnement solaire. La face arrière de l'absorbeur ainsi que les côtés de la boîte où le tout est inséré sont isolés pour limiter les pertes thermiques par conduction. Dans les capteurs à circulation de liquide le fluide caloporteur circule dans des tubes, remplacés par des conduits dans les capteurs à air.[43]

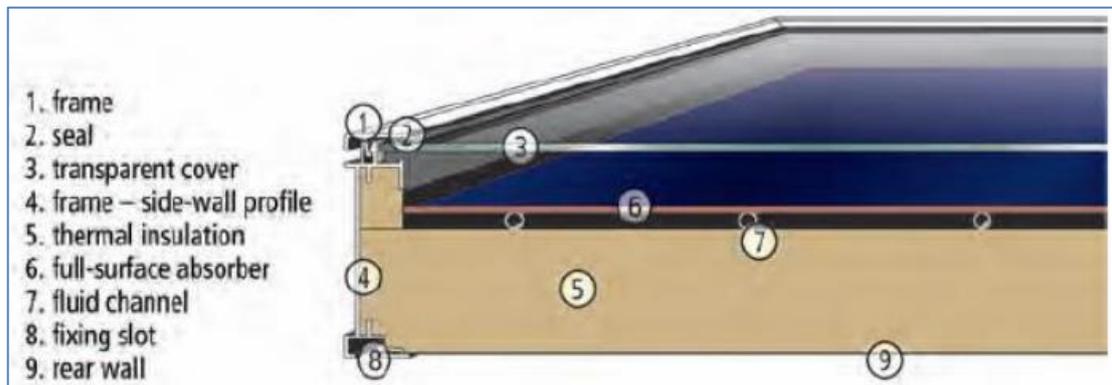


Figure II.9 : éléments d'un capteur solaire plan.

C- Capteurs sous vide :

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un tube sous vide simple ou double. Le vide améliore l'isolation contre les pertes en convection, par rapport au capteur précédent. Deux principes sont rencontrés : le premier principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, le fluide caloporteur parcourt le tube en aller et retour pour recueillir la chaleur ; le second est plus poussé technologiquement, il fait appel à un caloduc, utilisant un second fluide caloporteur restant dans le tube (voir article détaillé, à faire dans tube sous vide).[43]



Figure II.10 : Capteurs sous vide.

Un capteur solaire thermique sous vide est composé :

- ❖ D'une série de tubes de verre sous vide (il n'y a pas d'air).
- ❖ D'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre.
- ❖ D'un tube en cuivre à l'intérieur des tubes de verre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.[42]

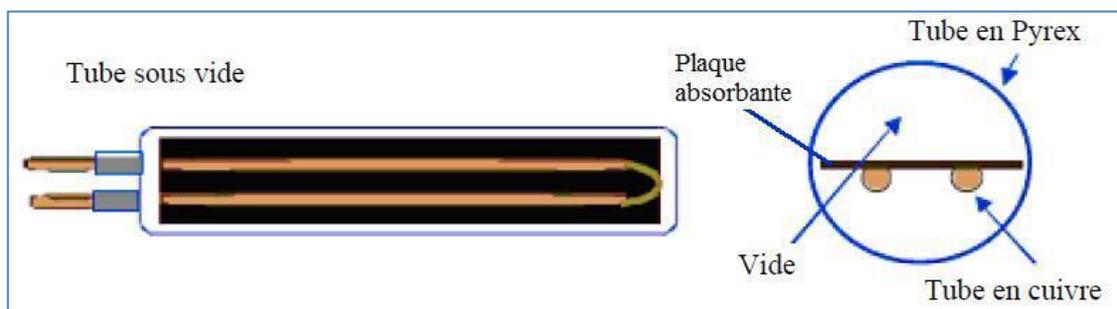


Figure II.11: Tube sous vide.



Figure II.12: Capteur sous vide.

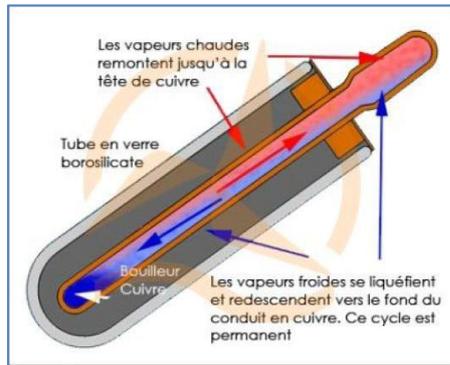


Figure II.13: Capteur sous vide a caloduc.

D- Capteurs à concentration :

Un capteur solaire thermique à concentration est composé :

- ❖ D'un châssis, d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords.
- ❖ D'un système de réflexion de la lumière.
- ❖ D'un absorbeur.
- ❖ D'un réseau de tubes en cuivre.[42]

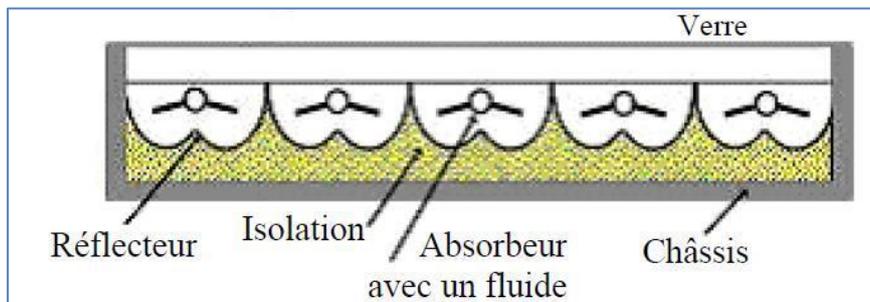


Figure II.14: Capteur à concentration.

II.4.2 Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. Elle fait partie des énergies renouvelables. Pour exploiter cette énergie, on doit concevoir des cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire.

II.4.2.1 Capteurs solaire photovoltaïques :

Un capteur solaire photovoltaïque est défini comme un dispositif conçu pour convertir le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par l'utilisation d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

II.4.2.2 Principe de conversion :

Un panneau photovoltaïque produit de l'électricité à partir de la lumière du soleil, grâce à des cellules assemblées en modules. La lumière du soleil est composée de particules d'énergie appelées photons. Lorsque la cellule semi-conductrice absorbe suffisamment de lumière solaire, des électrons sont arrachés aux atomes de la cellule par les photons et créent un courant électrique.[41]

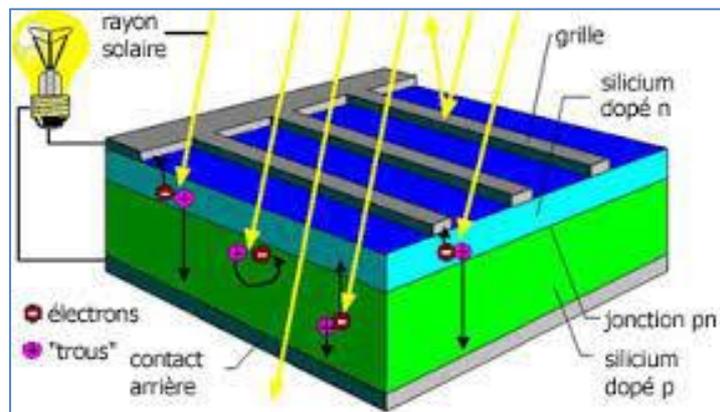


Figure II.15: Principe de Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque.[41]

II.4.2.3 La Technologie de cellule photovoltaïque :

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz.

La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée.

Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.[44]

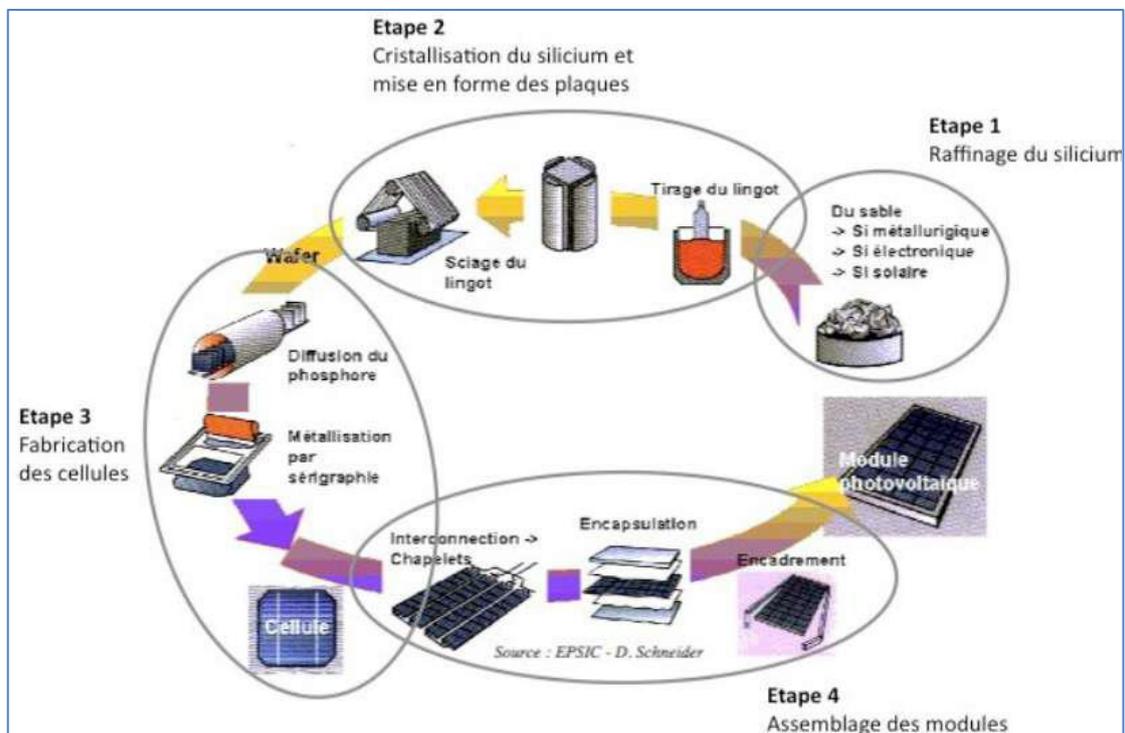


Figure II.16: Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin. [44]

II.4.2.4 Types de cellules photovoltaïques :

Pratiquement toutes les cellules photovoltaïques disponibles aujourd'hui sont réalisées à base de silicium.

Ce semi-conducteur est principalement employé dans la fabrication de puces informatiques.

Les cellules solaires sont construites avec la même matière première et les mêmes procédés de base.

Elles existent en différentes formes et technologies :

A- Les cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin.

Le silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal.

Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme.

Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse.

Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans). [44]



Figure II.17: Cellule monocristalline.

B- Les cellules poly cristallines :

Les cellules poly cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Les cellules poly cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20% en labo.

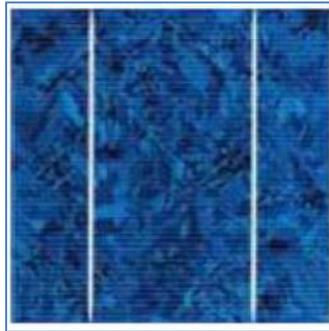


Figure II.18: Cellule poly cristalline.

C- Couche mince (Amorphe) :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.[44]



Figure II.19: Modules photovoltaïques fabriquées en Silicium amorphe.

II.4.2.5 L'Assemblage des panneaux photovoltaïques :

Les modules (ou panneaux) photovoltaïques sont constitués d'une plaque de verre transparent, d'une résine en EVA (Ethylène-Vinyl Acétate) enrobant les cellules, d'une couche anti-reflet, et d'un film de Tedlar, le tout placé dans un encadrement en aluminium. Le but de cette association est d'obtenir une tension suffisante grâce à la connexion en série de plusieurs cellules (souvent 2 groupes de 18 mis en parallèles), ainsi que de protéger les cellules et leurs contacts métalliques contre les conditions climatiques.

Les tensions classiques des modules vont de 12V à 18V, pour des puissances allant de quelques watts à 150W. Le sandwich ainsi réalisé pour un module est présenté sur le schéma ci-dessous.

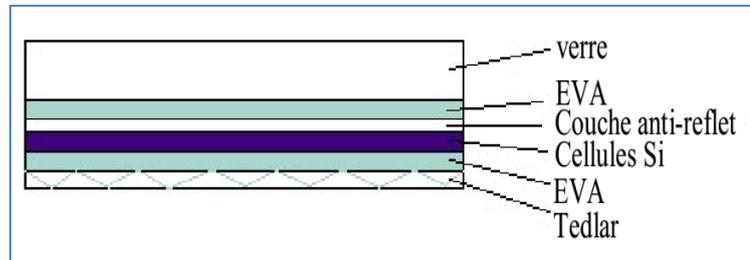


Figure II.20: Coupe d'un module photovoltaïque

Les fonctions et caractéristiques physiques de ces divers matériaux sont données dans le tableau ci-dessous (λ = conductivité thermique ; e = épaisseur du matériau considéré).

Matériaux	Fonction	Caractéristique
Plaque de verre	Transparente, résistante aux chocs (notamment la grêle), de faible teneur en fer (le verre ordinaire absorbe une partie importante des rayonnements de $\lambda > 600\text{nm}$ à cause de sa teneur en fer), ce verre présente l'avantage d'une étanchéité excellente et d'une haute transmission du rayonnement solaire.	$K_{\text{verre}} = 1\text{w/ (m.k)}$ $e_{\text{verre}} = 3\text{mm}$
EVA	Matériau d'enrobage : bonne résistance aux UV, stable en température.	$K_{\text{EVA}} = 0,23\text{w/ (m.k)}$ $e_{\text{EVA}} = 0,5\text{mm}$

Couche antireflet	Empêche la réflexion de la lumière solaire incidente	$K_{car} = 1,38 \text{ w/(m.k)}$ $e_{car} = 100 \mu\text{m}$
Cellules PV	Fine tranches planes fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs. La majorité des cellules solaires sont en silicium. Film en PVF (poly vinyl-fluoride) protégeant l'arrière du PV contre l'humidité.	$K_{si} = 148 \text{ w/(m.k)}$ $e_{si} = 0,4 \text{ mm}$
Tedlar	Le Tedlar blanc a le pouvoir de réfléchir une partie de la lumière qui est parvenue à traverser les cellules.	$K_{ted} = 0,033 \text{ w/(m.k)}$ $e_{ted} = 1 \text{ mm}$

Tableau II.1: Les fonctions et caractéristiques physiques de ces divers matériaux.[41]

II.4.2.6 Influence de la température :

Le rendement d'un PV est défini comme le taux de transformation de la puissance solaire en puissance électrique. En moyenne, Cependant, les modules PV conventionnels ont un faible rendement de 9%, 15% et 20% pour le silicium amorphe (a-Si), poly cristallin silicium (poly-Si) et silicium monocristallin (mono-Si) types de modules, respectivement. Ainsi, la plupart des panneaux solaires l'énergie est soit réfléchi, soit convertie en chaleur Cette chaleur entraîne une augmentation de la température PV, qui à son tour, conduit à une diminution de son efficacité électrique. Il est trouvé que l'augmentation de la température de surface du poly-Si et Le module PV a-Si de 1°C réduit leur efficacité électrique respectivement de 0,45% et 0,25%. De plus, le la chaleur générée peut altérer la structure interne de la cellule photovoltaïque et provoquer une dégradation thermique.[45]

Le graphique suivant, représentant l'évolution de la puissance délivrée par un ensemble de modules PV en fonction de la température, met en évidence ce phénomène :

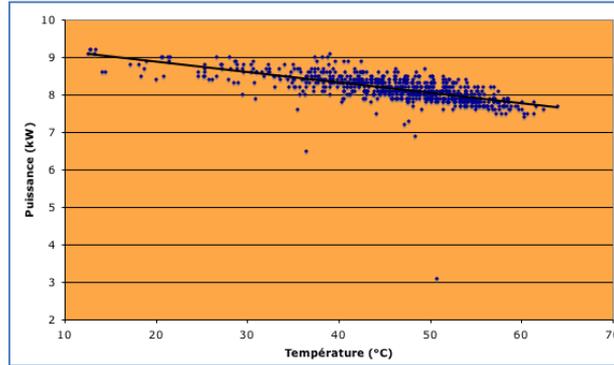


Figure II.21: L'Évolution de la Puissance Délivrée par un Ensemble de Modules PV en Fonction de la Température. [41]

II.4.3 Le Capteur Solaire Hybride PV/T :

Un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique est un dispositif qui associe un capteur solaire plan et un module photovoltaïque permettant de convertir l'énergie solaire en chaleur et en électricité. Les avantages de combiner un collecteur thermique (un capteur solaire plan) et un module PV dans un seul capteur sont l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit, ainsi augmenter le rendement électrique du module et exploiter deux types d'énergies : électrique et thermique. Les coûts aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïque et thermique) séparément installés.

Dans ce type de composant hybride le principe consiste à allier un panneau PV à un système de chauffage thermique. L'échangeur de chaleur est placé sous le module PV pour évacuer la chaleur accumulée à l'arrière du module qui réduit la performance électrique de 0,4 à 0,5 % pour chaque degré Celsius au-dessus de sa température nominale qui est 25 °C. Donc pour maintenir le rendement nominal du module PV il nous faut donc le refroidir

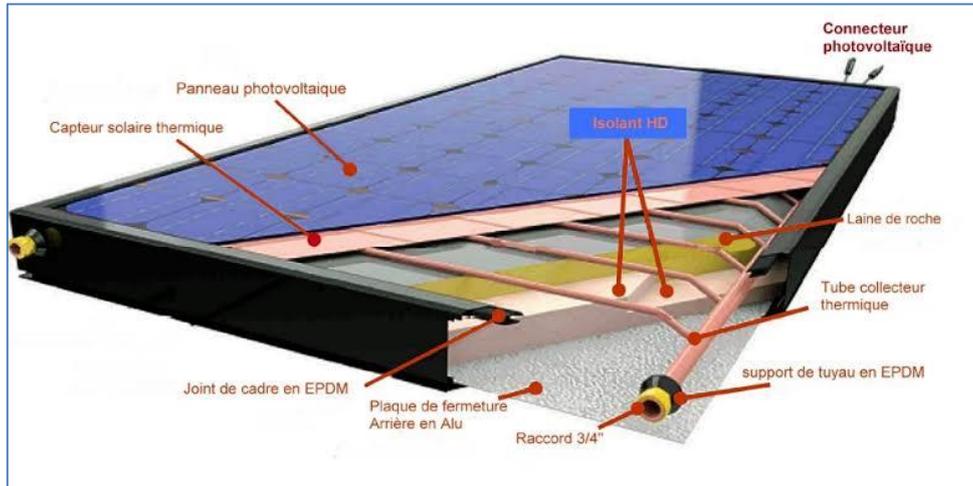


Figure II.22: Schéma d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique.

❖ Importance des panneaux PVT :

Les panneaux solaires présentent plusieurs avantages :

- D'un point de vue écologique, les panneaux solaires sont une énergie propre non polluante pour l'environnement. Aucun gaz à effet de serre n'est rejeté et il n'y a aucun déchet radioactif produit. (Exemple en France 85.7 % de l'énergie provient du nucléaire, en Algérie 99.9% provient du pétrole)
- L'énergie solaire est inépuisable, contrairement aux énergies fossiles comme le carbone ou le pétrole qui sont pourtant encore plus utilisés que le solaire.
- Pour les endroits isolés ou les petites installations, rien de tel que les panneaux solaires pour les rendre autonomes
- Les panneaux solaires, une fois installés, demandent très peu d'entretien et l'énergie est produite sans action de l'homme
- De plus, les panneaux solaires ne sont encore que très peu utilisés et ont une forte marge d'évolution et un avenir prometteur
- Les panneaux solaires peuvent représenter un très bon investissement pour des particuliers
- Gain de l'espace inutile des toitures pour générer à la fois de l'électricité et avoir de l'eau chaude.[2]

Chapitre III :

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

III.1. Introduction

Le transfert de chaleur par convection est une forme d'énergie, transférer de l'énergie entre une surface solide et un fluide, soit un liquide ou un gaz.

Ce transfert thermique revête une grande importance dans beaucoup de domaines tels que : la mécanique des fluides, l'énergie solaire, les systèmes d'isolation, ainsi que dans la conception des échangeurs de chaleur.

Le comportement du fluide est complètement décrit par le champ d'écoulement (composantes de la vitesse), le champ thermique, la distribution de pression et les propriétés locales du fluide. Ces variables sont gouvernées par les lois fondamentales de conservation de la masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

Dans ce chapitre, nous introduisons la géométrie étudiée suivie par les équations gouvernantes des cas étudié dans ce mémoire.

III.2. La géométrie du problème étudié :

La géométrie du problème considérée est représentée par la figure III.1

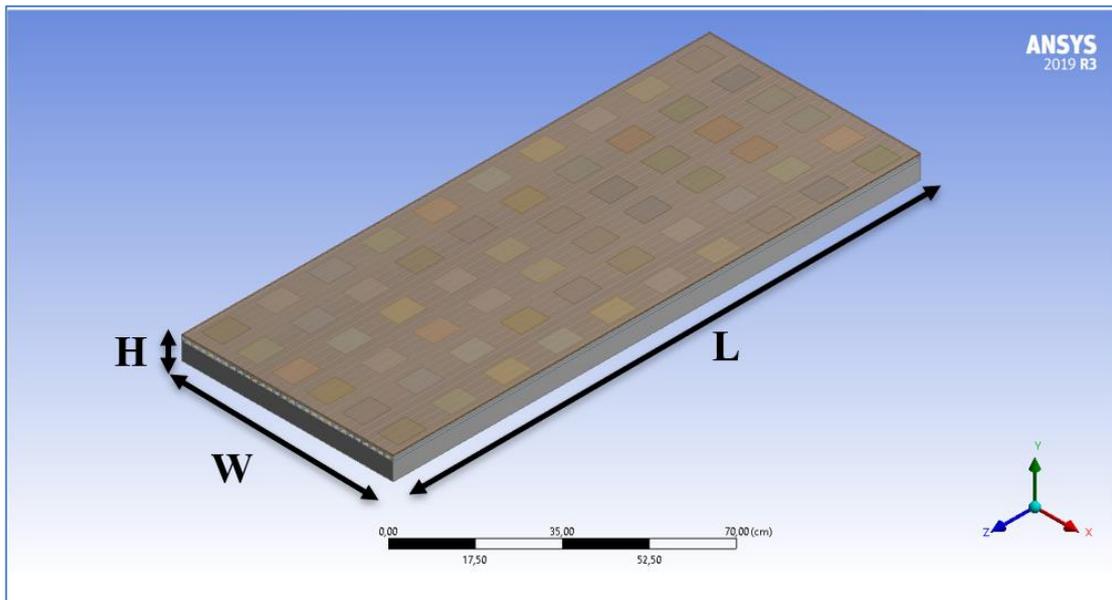


Figure III.1 : Présentation de la géométrie étudiée.

Il s'agit d'un capteur solaire hybride (PV/TH), les capteur solaires hybrides sont les éléments fondamentaux de transformation de l'énergie solaire en énergie thermique et électrique, ceci permet de l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire captée et la production simultanée d'énergie thermique et électrique.

La production de ces énergies dépend des plusieurs paramètres d'entrée et sortie comme : le rayonnement solaire, la vitesse de vent, la température ambiante et la type de fluide caloporteur et leurs propriétés.

Le capteur hybride photovoltaïque thermique (PV-TH) que nous étudions ce compose des éléments principaux suivante : d'un vitrage transparent situé au sommet d'un panneau solaire photovoltaïque ce dernier se compose d'une plaque en silicium poly-cristallin collée sur une couche mince en tedlar, le panneau solaire photovoltaïque est collé sur une plaque absorbent en cuivre muni d'ailettes, fluide caloporteur s'écoule dans un canal de refroidissement entre les ailettes, et d'une couche d'isolation et de protection à l'arrière du capteur. Afin de minimiser les pertes de chaleur à l'arrière du PVT avec le milieu ambiant.

Le capteur solaire à étudier est orienté vers le sud selon un angle d'inclinaison (i) qui correspond à L'altitude du lieu, soit environ 34.85° Nord pour la région de Biskra (Algérie).[47]

- ✓ **Vitrage** : comme une plaque supérieure pour la protection du panneau solaire photovoltaïque.

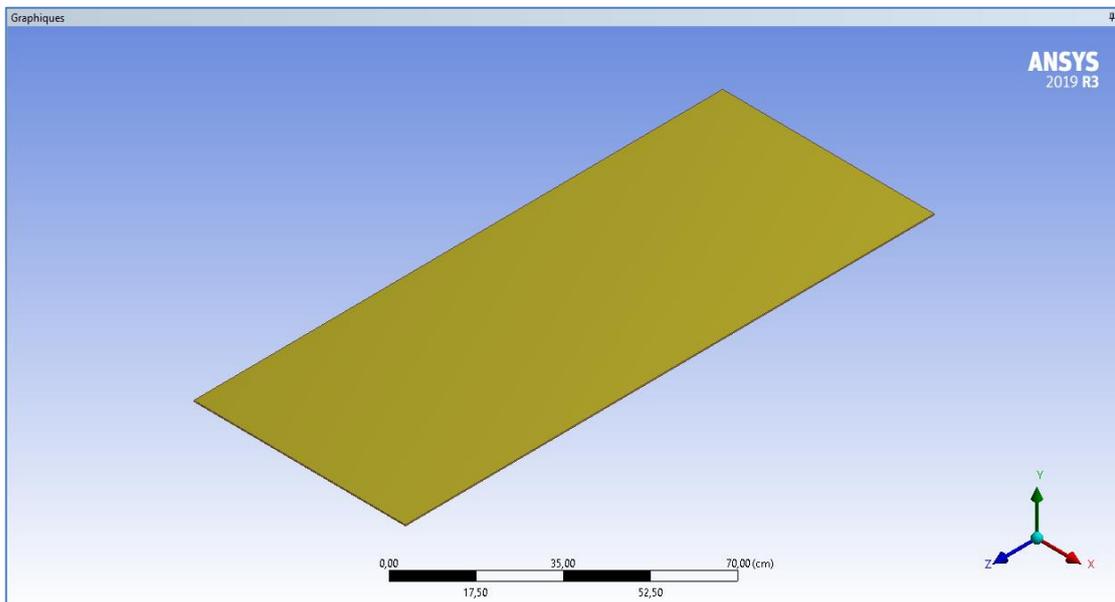


Figure III.2: Présentation de la couche vitre de protection.

- ✓ **Panneau solaire photovoltaïque** : son rôle est de capter et transformer le rayonnement solaire incident à l'électricité.

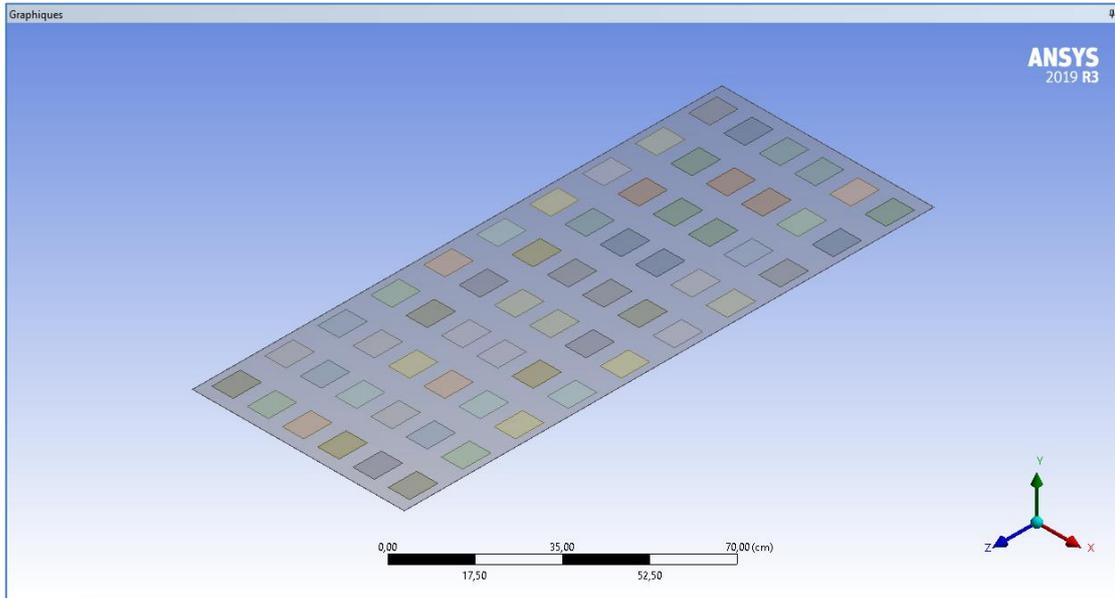


Figure III.3 : Illustration de la géométrie du panneau photovoltaïque

- ✓ **La surface absorbante** : est placée sous le Panneau photovoltaïque pour évacuer la chaleur accumulée à l'arrière du Panneau photovoltaïque.

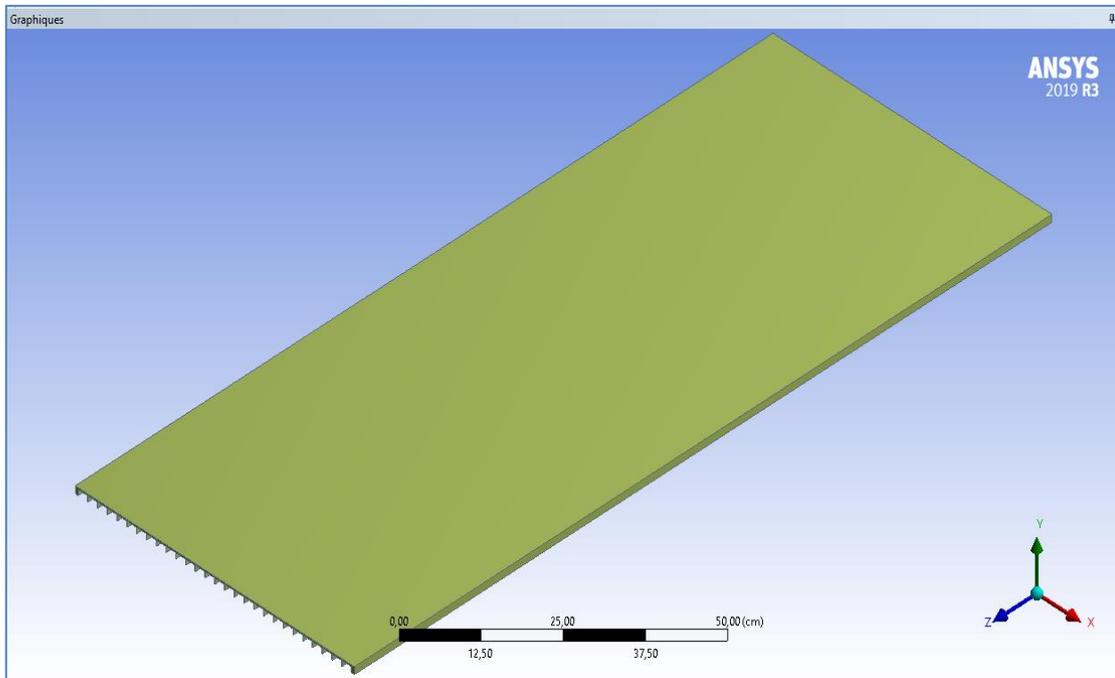


Figure III.4: Présentation de la surface absorbante (Absorbeur).

Fluide caloporteur : (eau ou nano-fluide) son rôle d'évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante.

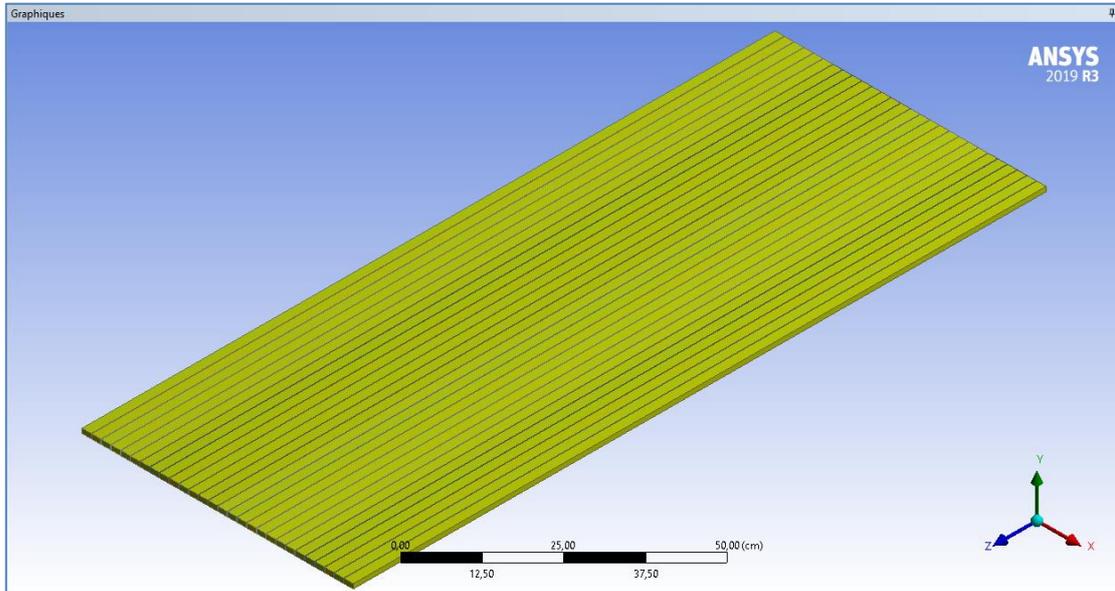


Figure III.5: Illustration de l'écoulement fluide caloporteur (**nano-fluide**).

- ✓ **L'isolant à l'arrière du PVT** : pour minimiser les pertes thermiques, généralement on considère comme adiabatique.

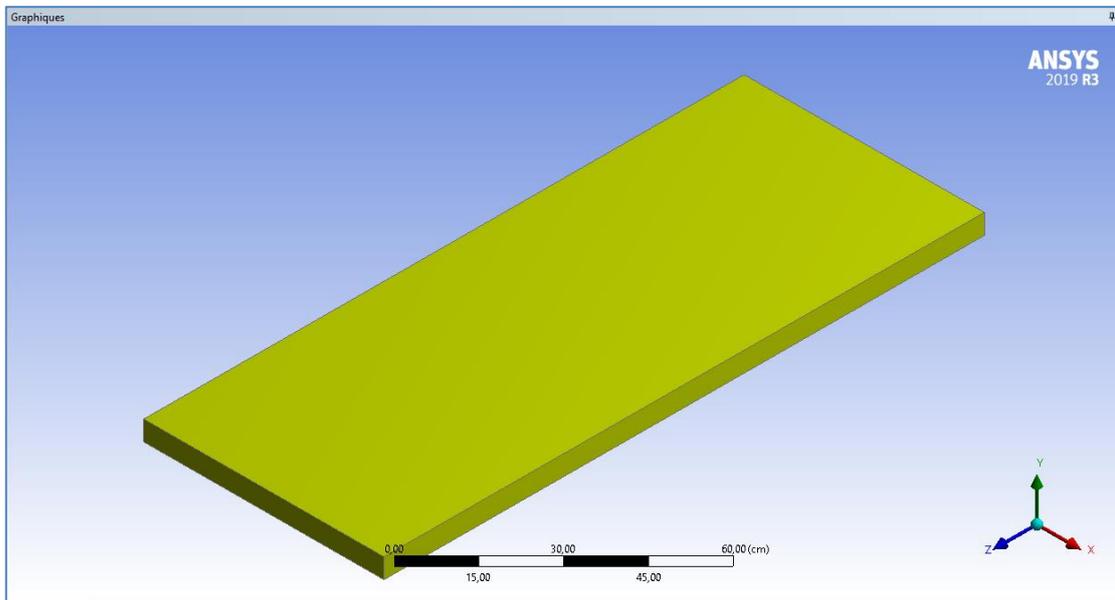


Figure III.6: Présentation de l'isolation thermique (Bois).

W	L	H
La largeur du capteur solaire W= 0.6 m	La longueur du capteur solaire L= 1.5 m	L'épaisseur du capteur solaire H=56.6 mm

Tableau III.1 : Dimensionnement du capteur solaire étudiée

Les propriétés thermo-physiques utilisées dans la simulation numérique sont données dans le tableau III.2 suivante

Matériaux utilisés						
Propriétés	Vitrage	Panneau PV		Absorbeur	Ailettes	Isolation
		Silicium	Tedlar			
Épaisseur (mm)	$e_v = 3$	$e_c = 0.3$	$e_{ted} = 0.3$	$e_p = 3$	$e_{ail} = 1$	$e_{iso} = 50$
Densité (kg.m^{-3})	$\rho_v = 2800$	$\rho_c = 2330$	$\rho_{ted} = 1550$	$\rho_p = 8978$	$\rho_{ail} = 8978$	$\rho_{iso} = 700$
Chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	$Cp_v = 750$	$Cp_c = 712$	$Cp_{ted} = 1760$	$Cp_p = 381$	$Cp_{ail} = 381$	$Cp_{iso} = 2310$
Conductivité Thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	$k_v = 0.7$	$k_c = 148$	$k_{ted} = 0.23$	$k_p = 387.6$	$k_{ail} = 387.6$	$k_{iso} = 0.173$

Tableau III.2: Caractéristiques thermophysiques des différentes composantes du capteur hybride PV/T

La paroi supérieure maintenue à un rayonnement solaire directe totale absorbée par les cellules solaires, Le fluide qui s'écoule dans la conduite est un nano-fluide à base d'eau contenant des nanoparticules de cuivre (Cu), les pertes par rayonnements au fond et aux surfaces latérales de l'isolant sont supposées négligeables.

La configuration géométrique du problème en question est montrée par les figures suivante :

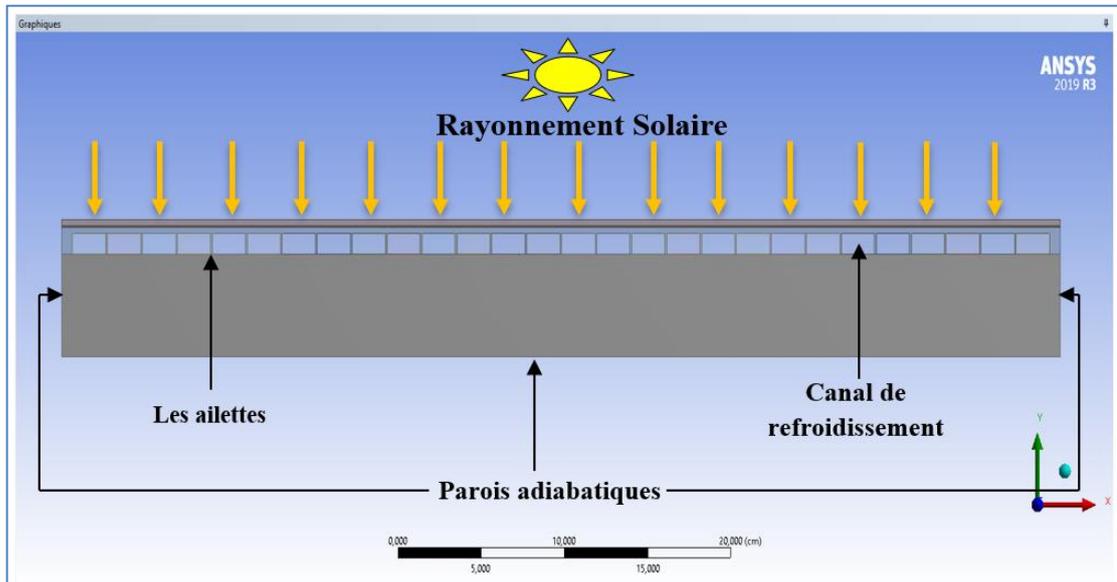


Figure III.7: Présentation du mouvement du nano fluide dans le canal avec les conditions aux limites du phénomène en question.

III.3. Modèle mathématique :

Une modélisation doit obligatoirement exprimer le comportement du phénomène dans l'espace et dans le temps.

En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation à savoir :

- Conservation de masse.
- La quantité de mouvement.
- Conservation d'énergie.

III.3.1. Equation de continuité:

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel.

Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où ρ est la masse volumique et \mathbf{V} est le vecteur de vitesse.

III.3.2. Équation de quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent.

Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées.

Il s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D}{Dt}(\rho \cdot V) = \rho F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3}\mu \text{grad}(\text{div}(V)) \quad (\text{III.2})$$

Où F est une force par unité de volume.

III.3.3. Équation de conservation d'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique.

Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\Delta(K.T) + q + \beta T \frac{Dp}{Dt} + \mu \Phi = \frac{D}{Dt}(\rho C_p T) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$\frac{D}{Dt}(\rho C_p T)$: La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(K.T)$: La variation d'énergie par conduction.

q : Puissance volumique dissipée.

$\beta T \frac{Dp}{Dt}$: La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu \Phi$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

III.4. Hypothèses Simplificatrices Proposées :

Il est maintenant nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses afin d'établir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème, donc on adopte les hypothèses suivantes :

- Le régime est instationnaire et tridimensionnel (3D).
- Le fluide est un nano-fluide Newtonien et incompressible.
- L'écoulement à l'intérieur du canal est laminaire totalement établi thermiquement et hydrodynamique.
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- La température ambiante pré du capteur est uniforme.
- La vitesse du fluide est uniforme.
- Les pertes par rayonnements au fond et aux surfaces latérales de l'isolant sont supposées négligeables.
- Pas de terme source.
- La face en bas du canal est adiabatique.
- La puissance volumique dissipée est négligeable.
- Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- La masse volumique du fluide varie linéairement avec la température. Cette variation est donnée par la relation : $\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)]$

D'où : T : Représente la température du fluide en un point donné du système.

T_0 : La température de référence qui correspond généralement à la valeur moyenne de la température dans le système.

ρ_0 : La masse volumique du fluide à la température de référence.

β : Le coefficient d'expansion volumique thermique du fluide, il est donné par :

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad \text{(III.4)}$$

On utilise une hypothèse simplificatrice connue par l'hypothèse de Boussinesq, qu'elle dit : « la masse volumique du fluide (ρ) est supposée constante dans les équations hydrodynamiques, sauf dans le terme générateur de la convection naturelle ($\rho \cdot g$), ou ses variations induisent directement des forces de poussée d'Archimède. Toutes les autres caractéristiques thermo-physiques du fluide (la viscosité dynamique μ , la conductivité thermique k et la chaleur massique à pression constante C_p) sont considérées comme constantes et définies à la température de référence T_0 ».

III.5. Équations du problème :

On peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans notre étude comme suit :

III.5.1. Équations de continuité :

Après d'application des précédentes hypothèses on obtient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.5})$$

u, v et w étant les composantes du champ de vitesse V (u,v,w) dans la direction x,y et z respectivement.

III.5.2. Équations de quantité de mouvement :

Les équations de quantité de mouvement s'écrivent de la manière suivante :

Suivant x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + g\beta(T - T_0) \sin i \quad (\text{III.6})$$

Suivant y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - g\beta(T - T_0) \cos i \quad (\text{III.7})$$

Suivant z :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (\text{III.8})$$

Avec i étant l'angle d'inclinaison de capteur solaire.

III.5.3. Équations de l'énergie :

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le principe de la conservation de l'énergie dans la direction x,y et z comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.9})$$

III.6. Modèle Mathématique thermique des composants d'un PV/T :

Les modèles théoriques précédente servent à calculer (prédire) la production thermique des capteurs hybrides, ces modèles se basent sur la distribution du flux de la chaleur dans les différentes couches du capteur hybride.

Une vue en coupe transversale d'un capteur photovoltaïque / thermique (PV/TH) proposé est illustrée à la figure III.8, ainsi que la figure III.9 montre le schéma électrique équivalent du capteur hybride où figurent les énergies absorbées ou produites par le capteur :

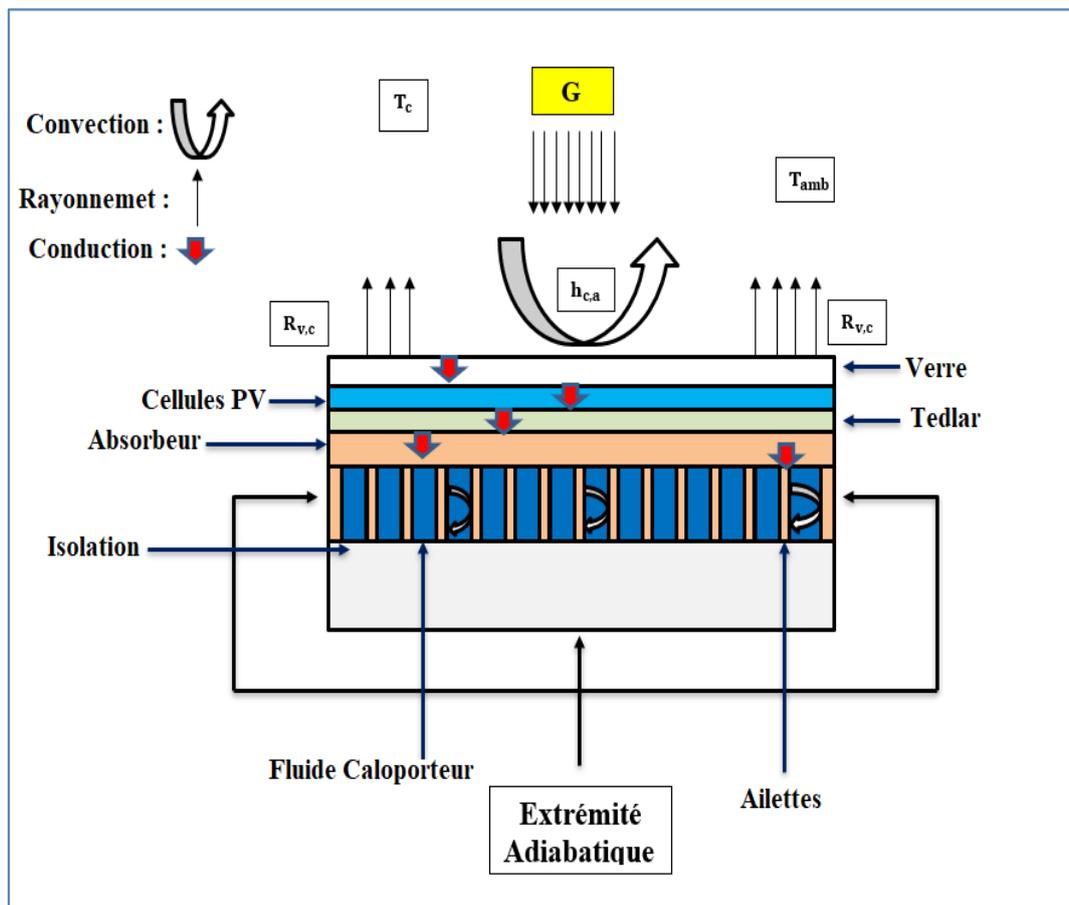


Figure III.8 : Bilan thermique sous une coupe d'un système hybride photovoltaïque /thermique.

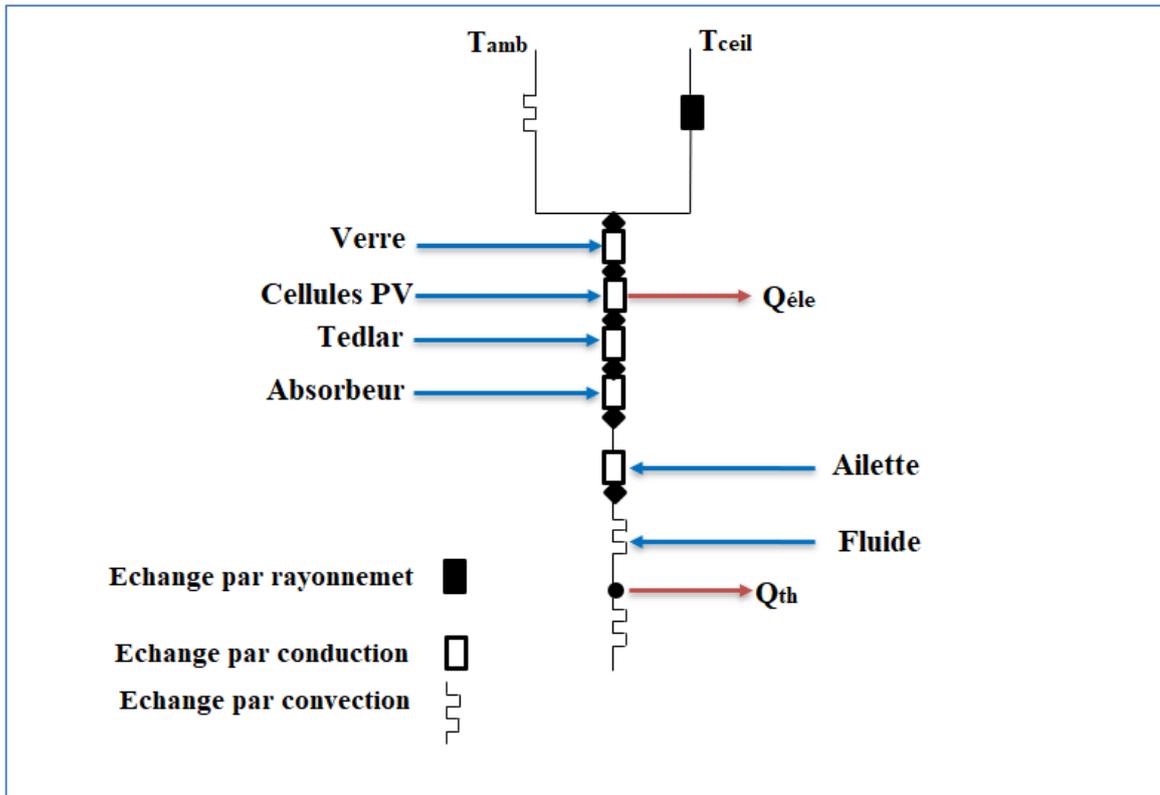


Figure III.9 : Présentation des résistances thermique du système à étudier.

III.6.1. Principe de l'étude thermique d'un PVT :

Le but de l'étude, est de prévoir les températures dans chaque couche du capteur PVT, Pour cela on utilise le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie suivante :

[La variation de l'énergie interne = l'énergie reçue - l'énergie perdue]

Ou encore sous forme mathématique, Considérons une section quelconque du système à l'instant t, Le bilan au nœud *i* donne :

$$M_i C p_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_i Q_i - \sum_s Q_i \tag{III.10}$$

M_i : Masse du noeud *i*.

Cp_i : La chaleur spécifique du noeud *i*.

dt : Pas de temps.

III.6.2. Bilan énergétique du capteur hybride PVT :

Le capteur étudié est un modèle de 7 nœuds. Les différents nœuds du ce capteur solaire sont indiqués sur la figure suivante :

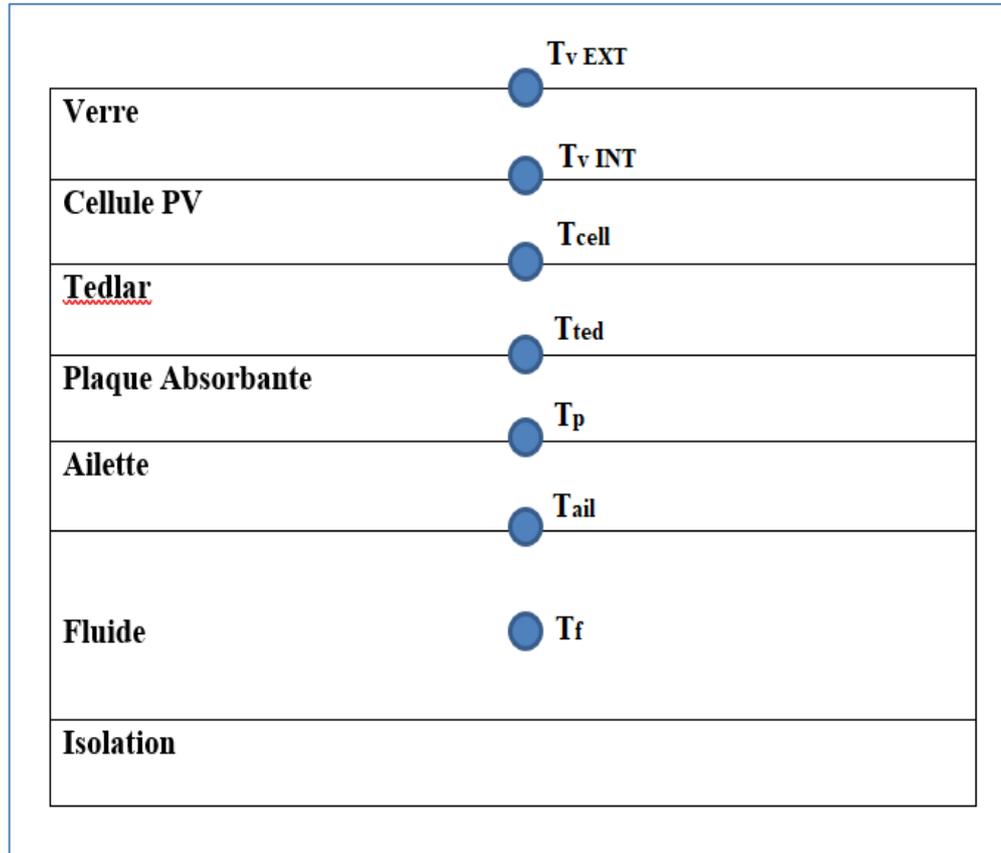


Figure III. 10 : Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds.

L'énergie thermique fournie par le rayonnement solaire est donnée comme suit [48]

$$Q_{sun} = A_v G \tau_v \alpha_{cell} \quad (\text{III.11})$$

A_v : Surface du verre (m^2).

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

τ_v : Transmittivité du verre.

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

Puisque le verre est opaque par rapport aux rayonnements émis par les cellules, la surface du verre devient une surface émettrice, les pertes thermiques par rayonnement sont exprimées comme suit [48] :

$$Q_{radv-a} = \sigma \varepsilon_v A_v (T_v^4 - T_{ciel}^4) \quad (\text{III.12})$$

Avec :

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

ε_v : Émissivité du verre.

A_v : Surface du verre (m^2) .

T_{ciel} : la température du ciel est calculée à partir de la corrélation empirique de Clark [49] :

$$T_{ciel} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad (III.13)$$

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

$$Q_{conv\ v-a} = h_{v,a}A_v(T_v - T_a) \quad (III.14)$$

Avec

T_v : Température du verre du capteur hybride (K).

T_a : Température ambiante (K).

$h_{v,a}$: Coefficient de transfert convectif qui est fonction de la vitesse du vent en (W/m^2K) , était calculé par Sharples et all, il est donné par l'expression suivante :[50]

$$h_{v,a} = 2.8 + 3V_{vent} \quad (III.15)$$

➤ **Pour le verre:**

L'équation de l'énergie au niveau du verre est donnée par en face extérieur à $y=H$; $0 < x < W$ et $0 < z < L$ est comme suit :

$$M_v C p_v \frac{dT_{vext}}{dt} = Q_{sun} - Q_{radv-ciel} - Q_{convv-a} - Q_{condv} \quad (III.16)$$

$$M_v C p_v \frac{dT_{vext}}{dt} = A_v G - \sigma \varepsilon_v A_v (T_{vext}^4 - T_{ciel}^4) - h_{v,a} A_v (T_{vext} - T_a) - h_{cond\ v} A_v (T_{vext} - T_{vint})$$

Avec : $h_{cond\ v} = \frac{k_v}{e_v}$

k_v : La conductivité thermique du verre.

e_v : L'épaisseur de verre.

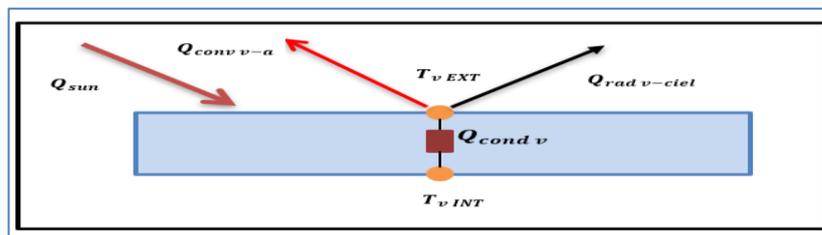


Figure III.11 : Schéma représentant le bilan thermique au niveau de verre.

❖ Les quatre extrémités latérales du verre à $x = 0$; $x=W$; $H-e_v < y < H$ et $z = 0$; $z = L$ est comme suit :

$$M_v C p_v \frac{dT_v}{dt} = 0 \quad \text{(III.17)}$$

❖ L'équation de l'énergie au niveau du verre en face intérieure à $y=H-e_v$; $0 < x < W$ et $0 < z < L$ est comme suit :

$$M_v C p_v \frac{dT_{v\text{int}}}{dt} = Q_{sun} + Q_{condv} - Q_{condv-cell} \quad \text{(III.18)}$$

$$M_v C p_v \frac{dT_{v\text{int}}}{dt} = A_v G \tau_v + h_{condv} A_v (T_{v\text{ext}} - T_{v\text{int}}) - h_{condv-cell} A_v (T_{v\text{int}} - T_{v\text{cell}})$$

Avec : $h_{condv-cell} = \frac{k_{cell}}{e_{cell}}$

k_{cell} : La conductivité thermique de la cellule.

e_{cell} : L'épaisseur de cellule.

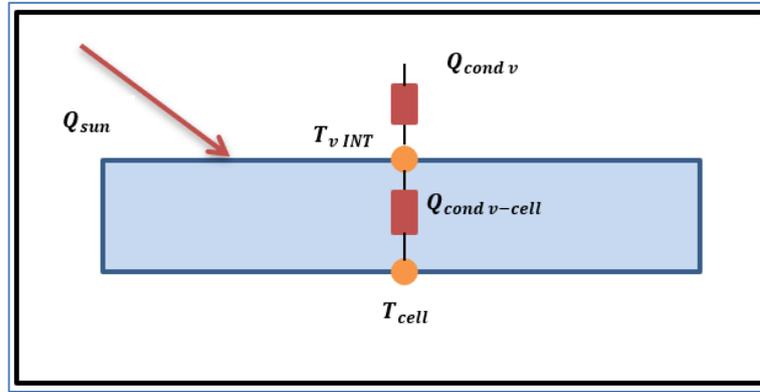


Figure III.12: Schéma représentant l'échange thermique au niveau du verre.

➤ **Pour la cellule solaire:**

L'équation de l'énergie au niveau de la cellule photovoltaïque à

$H-(e_v + e_{cell}) < y < H-e_v$; $0 < x < W$ et $0 < z < L$ est comme suit :

$$M_{cell} C p_{cell} \frac{dT_{cell}}{dt} = Q_{sun} + Q_{condv-cell} - Q_{condcell-ted} - Q_{éle} \quad \text{(III.19)}$$

$$M_{cell} C p_{cell} \frac{dT_{cell}}{dt} = A_v G \tau_v \alpha_{cell} + h_{condv-cell} A_v (T_{v\text{int}} - T_{cell}) - h_{condcell-ted} A_{cell} (T_{cell} - T_{ted}) - Q_{éle}$$

Avec : $h_{condcell-ted} = \frac{k_{ted}}{e_{ted}}$

k_{ted} : La conductivité thermique du tedlar.

e_{ted} : L'épaisseur de tedlar.

$$Q_{éle} = \frac{Q_{sun}}{\alpha_{cell}} \eta_{ref} \exp(\varphi(T_{cell} - T_{ref})) \quad (III.20)$$

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

φ : C'est Le coefficient de température qui représente la relation entre le rendement de la cellule solaire et la température (environ 0.004 pour une cellule solaire au silicium).[48]

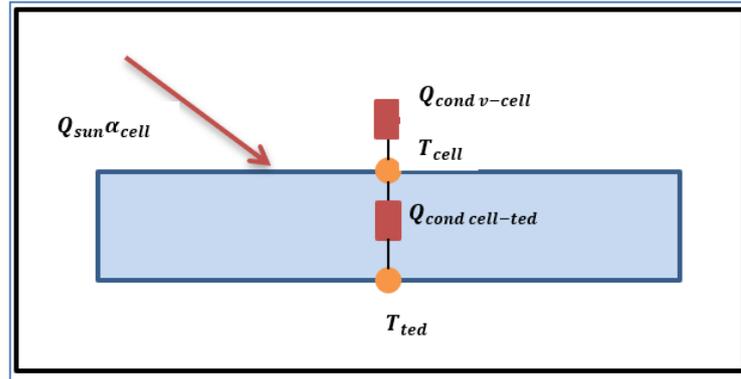


Figure III.13 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la cellule photovoltaïque.

❖ Les quatre extrémités latérales de la cellule photovoltaïque à $x = 0$; $x=W$; $H-(e_v + e_{cell}) < y < H-e_v$ et $z = 0$; $z = L$ est comme suit :

$$M_{cell} C p_{cell} \frac{dT_{cell}}{dt} = 0 \quad (III.21)$$

➤ **Pour la couche de Tedlar :**

L'équation de l'énergie au niveau de la couche de Tedlar à

$H-(e_v + e_{cell} + e_{ted}) < y < H-(e_v + e_{cell})$; $0 < x < W$ et $0 < z < L$ est comme suit :

$$M_{ted} C p_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = Q_{cond cell-ted} - Q_{cond ted-p} \quad (III.22)$$

$$M_{ted} C p_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = h_{cond ted} A_{ted} (T_{cell} - T_{ted}) - h_{cond ted-p} A_{ted} (T_{ted} - T_p)$$

Avec $h_{cond ted-p} = \frac{k_p}{e_p}$

k_p : La conductivité thermique du la plaque absorbante.

e_p : L'épaisseur de la plaque absorbante.

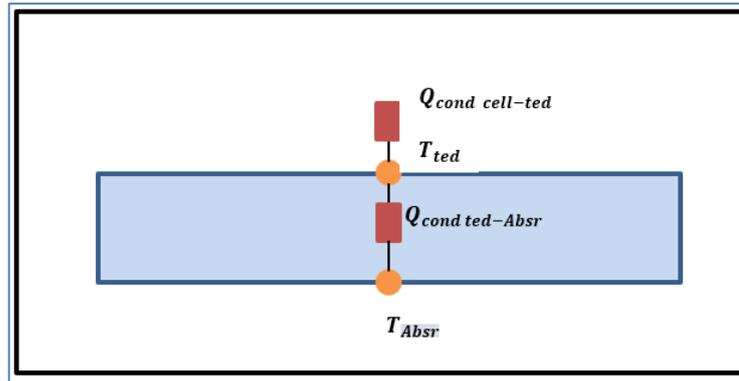


Figure III.12 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar.

❖ Les quatre extrémités latérales de la couche de Tedlar à $H-(e_v + e_{cell} + e_{ted}) < y < H-(e_v + e_{cell})$; $x = 0$, $x = W$ et $z=0, z = L$. l'équation de l'énergie est comme suit :

$$M_{ted} C p_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = 0 \quad \text{(III.23)}$$

➤ **Pour la plaque absorbante:**

Au niveau de la couche de la plaque absorbante à $H-(e_v + e_{cell} + e_{ted} + e_p) < y < H-(e_v + e_{cell} + e_{ted})$; $0 < x < W$ et $0 < z < L$; l'équation de l'énergie est comme suit :

$$M_p C p_p \frac{dT_p}{dt} = Q_{cond ted-p} - Q_{cond p-ail} - Q_{conv ail-f} \quad \text{(III.24)}$$

$$M_p C p_p \frac{dT_p}{dt} = h_{cond ted-p} A_p (T_{ted} - T_p) - h_{cond p-ail} A_{p-ail} (T_p - T_{ail}) - h_{conv ail-f} A_{ail-f} (T_{ail} - T_f)$$

Avec $h_{cond p-ail} = \frac{k_{ail}}{e_{ail}}$

k_{ail} : La conductivité thermique du l'aillette.

e_p : L'épaisseur de du l'aillette.

Nous avons considéré que la surface d'échange des ailettes avec le fluide caloporteur et la surface d'échange du la plaque absorbante avec les ailettes sont respectivement :

$$A_{ail-f} = 2 \times n_{ail} (h \times L) \quad \text{(III.25)}$$

Avec n_{ail} : c'est le nombre des ailettes.

h : c'est la hauteur de l'aillette.

$$A_{p-ail} = 2 \times n_{ail}(e_{ail} \times L) \quad (III.26)$$

Le $h_{conv\ ail-f}$ c'est le coefficient de transfert de chaleur de convection entre le fluide et l'ailette calculé par le nombre de Nusselt défini par :

$$h_{conv\ ail-f} = \frac{Nu k_f}{D_h} \quad (III.27)$$

Avec k_f , D_h , la conductivité thermique du fluide et le diamètre hydraulique qui s'écrit en fonction de la hauteur (h) et de la largeur (w) sous la forme suivante :

$$D_h = \frac{4 A_{passage}}{P_m} = \frac{4 \times (h \times w)}{2 \times (h+w)} \quad (III.28)$$

Avec $A_{passage} = A_{fluide}$: section de passage.

P_m : le périmètre mouillé.

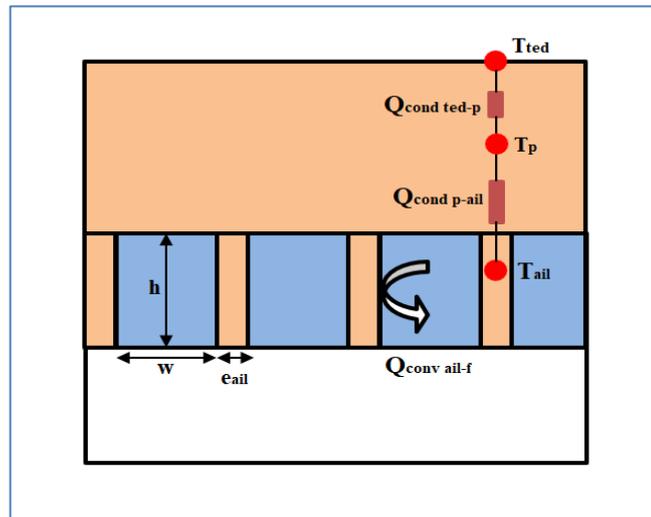


Figure III.12 : Schéma représentant le bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante.

❖ Les quatre extrémités latérales de de la plaque absorbante à

$H-(e_v + e_{cell} + e_{ted} + e_p) < y < H-(e_v + e_{cell} + e_{ted})$; $x = 0, x = W$ et $z = 0 ; w=L$; l'équation de l'énergie est comme suit :

$$M_p C p_p \frac{dT_p}{dt} = 0 \quad (III.29)$$

➤ **Pour le fluide colporteur:**

La distribution de la température dans le sens d'écoulement du fluide, si on considère que le fluide a une température d'entrée T_e et une température de sortie T_s , pour un segment du fluide dans le canal de refroidissement.

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

$$M_f C p_f \frac{dT_f}{dt} = Q_{conv\ ail-fluide} + Q_{th} \quad (\text{III.30})$$

$$M_f C p_f \frac{dT_f}{dt} = h_{conv\ ail-f} A_{ail-f} (T_{ail} - T_f) + \dot{m} C p_f (T_s - T_e)$$

Avec T_e, T_s : représentent respectivement la température de fluide à l'entrée et à la sortie du canal(K).

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

➤ **Pour la Couche d'isolant:**

L'équation de l'énergie au niveau de la couche d'isolant ; à $0 < y < e_{iso}$; $0 < x < W$ et

$0 < z < L$ est donnée par :

$$M_{iso} C p_{iso} \frac{dT_{iso}}{dt} = 0 \quad (\text{III.31})$$

* Pas de changement thermique au niveau de la couche d'isolant.

III.7. Expressions des performances électriques et thermiques des capteurs hybrides :

✓ L'expression de l'efficacité électrique générée par la cellule :

$$\eta_{éle} = \eta_{ref} [1 - \varphi (T_{cell} - T_{ref})] \quad (\text{III.32})$$

Avec :

η_{ref} : c'est l'efficacité de référence, elle représente l'efficacité de la cellule à la température de fonctionnement T_{ref} égale à 25 °C et une irradiance de $1000 W/m^2$.

φ : Est le coefficient de température du silicium, ces deux paramètres sont donnés par le fabricant.

✓ **L'expression de l'efficacité thermique:**

L'efficacité thermique instantanée du collecteur PV / T, peut être exprimée par le rapport de la quantité de chaleur extraite par le fluide utilisé noté $Q_u (W/m^2)$ sur une période de temps spécifiée (entre t_1 et t_2), à la quantité de rayonnement solaire incidente sur le vitrage sur la même période. On calcule le rendement thermique du capteur par la formule suivante [51] :

$$\eta_{th} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{m} C p_f (T_s - T_e) dt}{A \int_{t_1}^{t_2} G dt} \quad (\text{III.33})$$

L'efficacité thermique du capteur hybride est donnée par la formule suivante [47] :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c_p(T_s - T_e)}{AG} \quad (\text{III.34})$$

✓ **L'expression de l'efficacité globale:**

Avant de calculer le rendement global, on calcule le rendement thermique équivalent au rendement électrique par la relation suivante :

$$\eta_{\acute{e}le,th} = \frac{\eta_{\acute{e}le}}{C_f} \quad (\text{III.35})$$

Tel que :

$\eta_{\acute{e}le,th}$: Rendement thermique équivalent, %.

C_f : Facteur de conversion de l'énergie thermique.

Le rendement global est représenté par la somme du rendement thermique et du rendement thermique équivalent [51]

$$\eta_{global} = \eta_{\acute{e}le,th} + \eta_{th} \quad (\text{III.36})$$

$$\eta_{global} = \left(\frac{\eta_{\acute{e}le}}{C_f} \right) + \eta_{th} \quad (\text{III.37})$$

III.8. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation mathématique thermique du capteur hybride ; Nous avons commencé par le modèle physique étudié et les équations régissant le phénomène de refroidissement d'un module photovoltaïque par l'utilisation de la nanotechnologie ; ces équations qui ont permis la détermination de la distribution de température dans les différentes couches du capteur ainsi que les rendements thermique et électrique.

Chapitre IV :

FORMULATION NUMÉRIQUE

IV.1. Introduction :

La résolution des équations d'un phénomène physique de convection thermique se fait par l'utilisation d'une méthode numérique. Ces types des phénomènes sont généralement modélisés par des équations aux dérivées partielles (E.D.P) non-linéaires. Cette dernière consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations. A cette étape, intervient le concept de la discrétisation.

Pour obtenir une solution numérique, le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) ou par un système d'EDP est transformé, à l'aide d'une méthode de discrétisation en système d'équations algébriques. Il existe plusieurs schémas de discrétisations des équations aux dérivées partielles (E.D.P) : les différences finies, les éléments finis et les volumes finis.

Dans ce présent chapitre, on a procédé une simulation numérique à l'aide du logiciel ANSYS Workbench qui est spécialement destiné à la dynamique des fluides numérique (CFD).

CFD « computational fluid dynamics », (soit en français : Dynamique des Fluides Numérique) est un ensemble des méthodes numériques pour obtenir une solution approchée pour des problèmes de la dynamique des fluides et transfert de chaleur. Équations de la mécanique des fluides sur ceux resaluent par des méthodes numériques. Il permet de rendre moins hypothèses et approche analytique permet à des problèmes relativement complexes. En outre, beaucoup moins cher qu'une approche expérimentale. En revanche, est limité par l'ordre des méthodes numériques utilisées, signifie arithmétique et modèle de précision. Les efforts et les progrès accomplis dans les méthodes numériques, en particulier dans les CFD depuis, montrant son intérêt. Le CFD préalable mieux identifier et évaluer le problème.[21]

IV.2. Procédure de la simulation :

IV.2.1 Logiciel ANSYS Workbench :

Définition : Le Workbench est un logiciel permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique

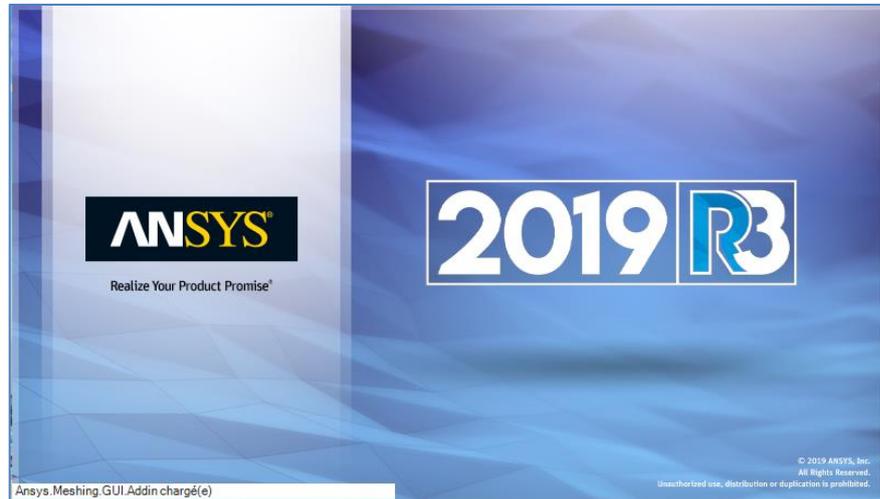


Figure IV.1 : Fenêtre lancement du logiciel.

La structure générale du logiciel est présentée ci-dessous :

IV.2.1.1. Menu principal du logiciel de ANSYS Workbench :

L'ouverture du logiciel fait apparaître le menu principal ci-dessous :

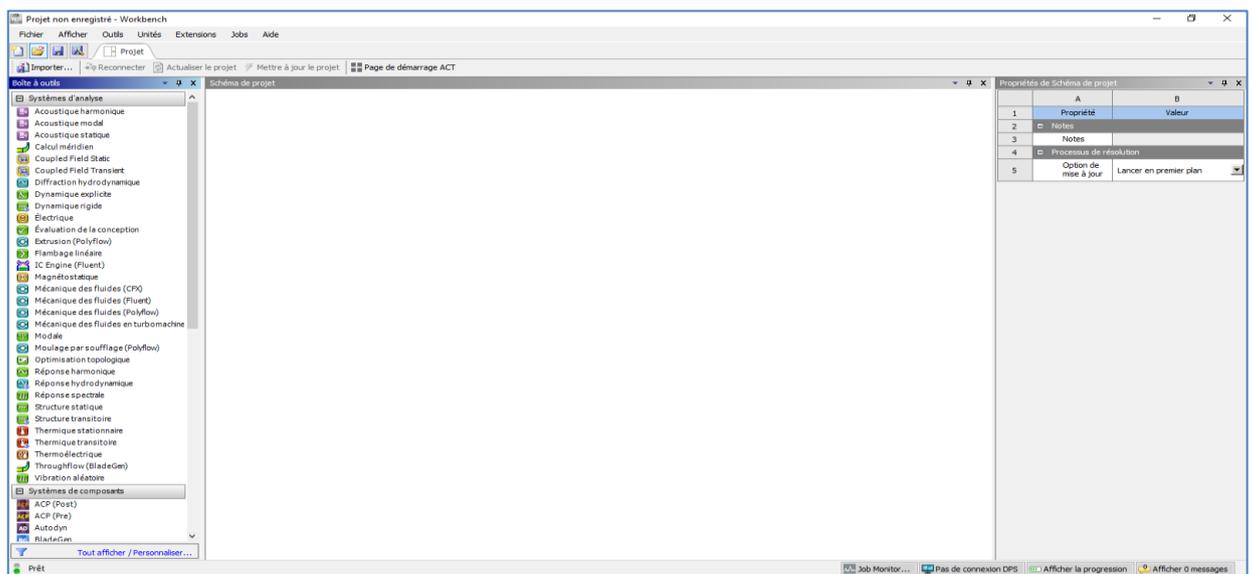


Figure IV.2 : Menu principal de Workbench.

La barre d'outils donne accès à plusieurs systèmes pour l'analyse. Pour commencer à glisser une analyse en mécanique des fluides (fluent) au schéma de projet (FigureIV.2).

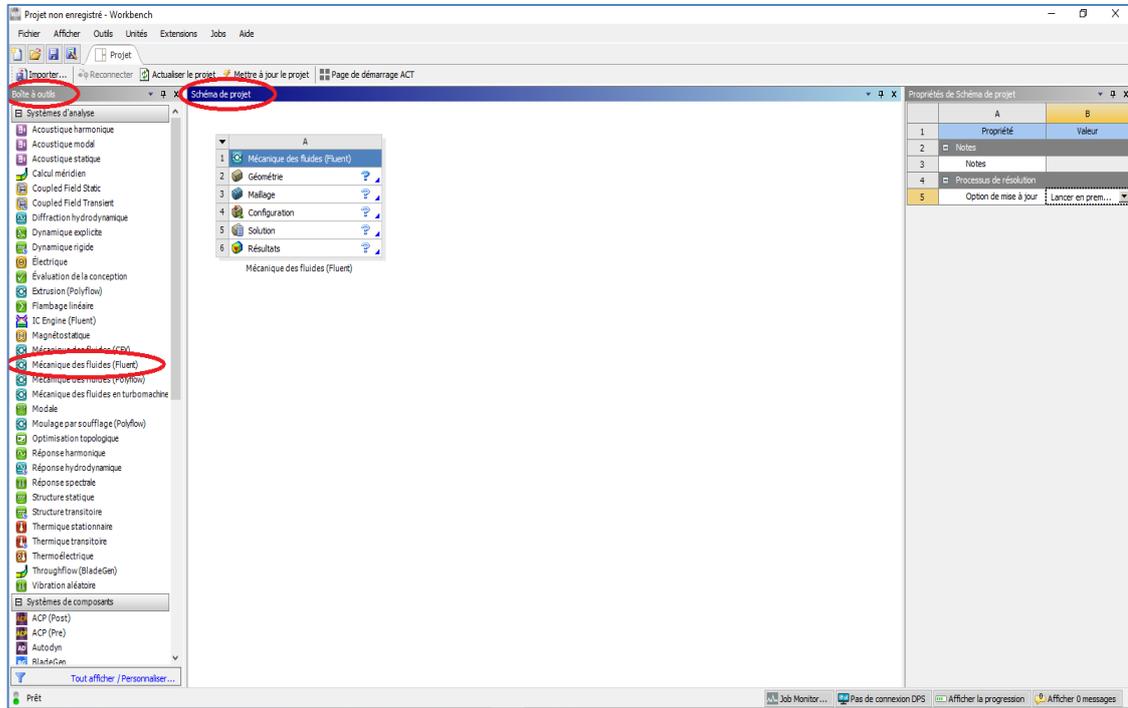


Figure IV.3 : Création d'une analyse (projet) en mécanique de fluide.

Les étapes de calcul se composent de 5 étapes :

1. **Géométrie** : utilisé pour importer ou de créer ou de modifier ou de mettre à jour un modèle qui peut être utilisé pour l'analyse.
2. **Maillage** : cette cellule est liée à la définition de la géométrie, systèmes de coordonnées et réseau de communication et du maillage dans le module de simulation mécanique, En plus de déclarer des certaines propriétés physiques des certains matériaux.
3. **Configuration** : permet de définir les charges et conditions aux limites et une autre configuration pour l'analyse.
4. **Solution** : cette cellule permet d'accéder aux données de résolution.
5. **Résultats** : cette cellule combine les résultats de l'analyse.

IV.2.1.2 Création de la géométrie :

Pour créer une géométrie avec ANSYS Workbench double-clique sur la **géométrie** pour ouvrir le module de création géométrique « **Design Modeler** » figures :(IV.4), (IV.5), (IV.6)

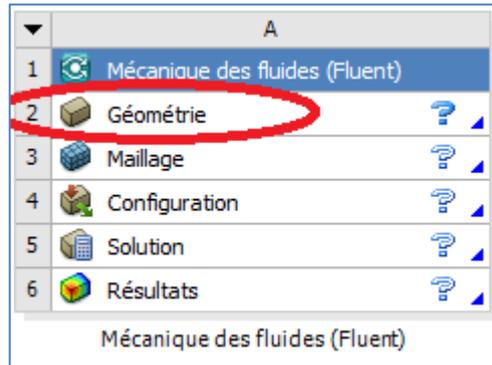


Figure IV.4 : Création d'un projet en mécanique de fluide.

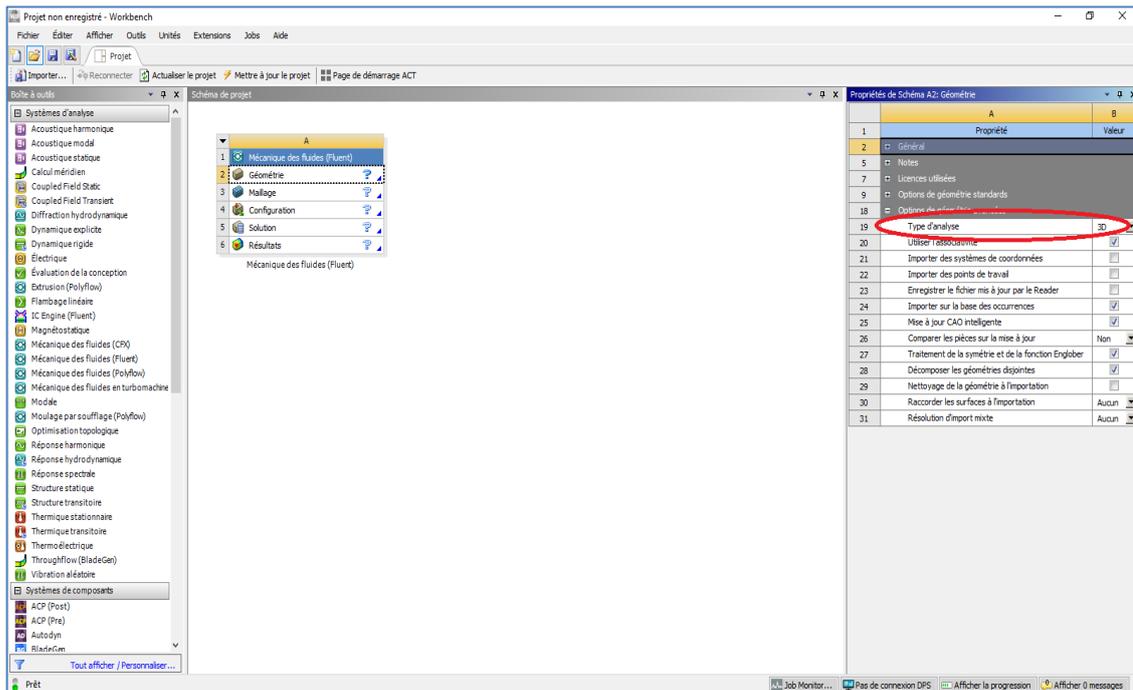


Figure IV.5 : Création d'un modèle géométrique (Design Modeler).

Il faut choisir le type d'analyse 2D OU 3D.

Après l'ouverture du module de création une géométrie, nous sélectionnons à partir la liste du « **Unités** » le centimètre (Cm) comme unité de dimension.

Par la suite, On choisit le plan et la vue sur laquelle on va travailler. En cliquant sur le plan XY, et  sur dans la barre d'outils.

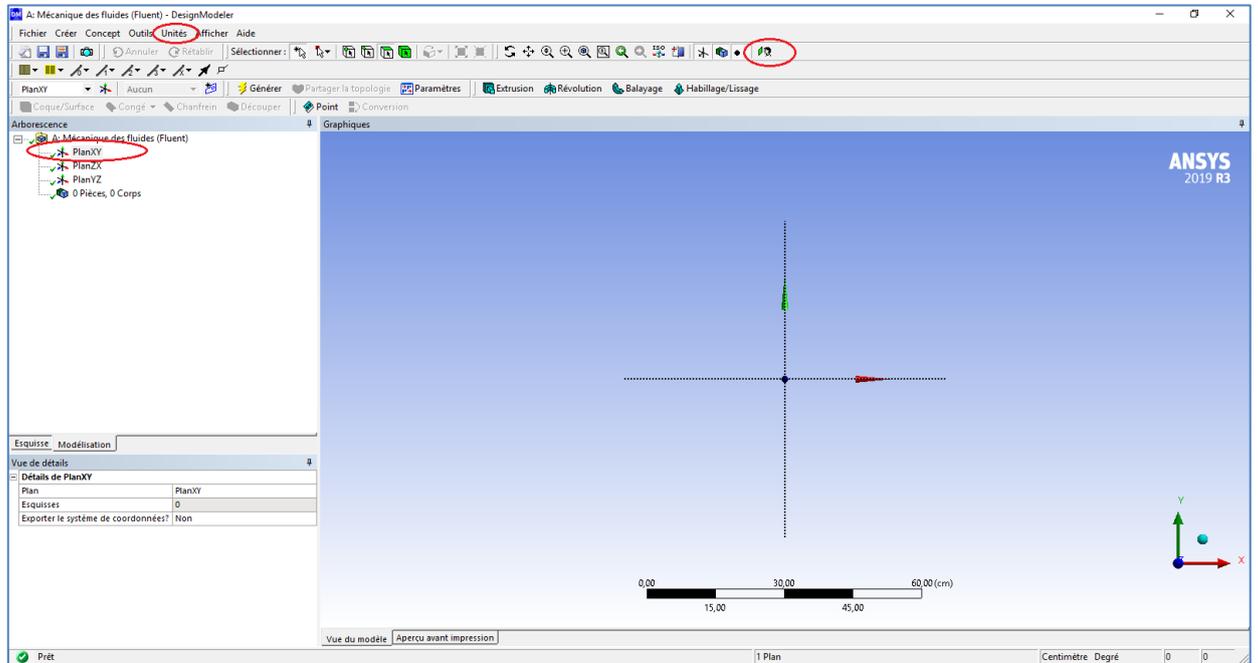


Figure IV.6 : Création d'un modèle (plan de vue).

Pour dessiner la géométrie étudiée on clique sur la boîte à outils esquisse qui va permettre de créer la géométrie d'y ajouter des dimensions et la contraindre :

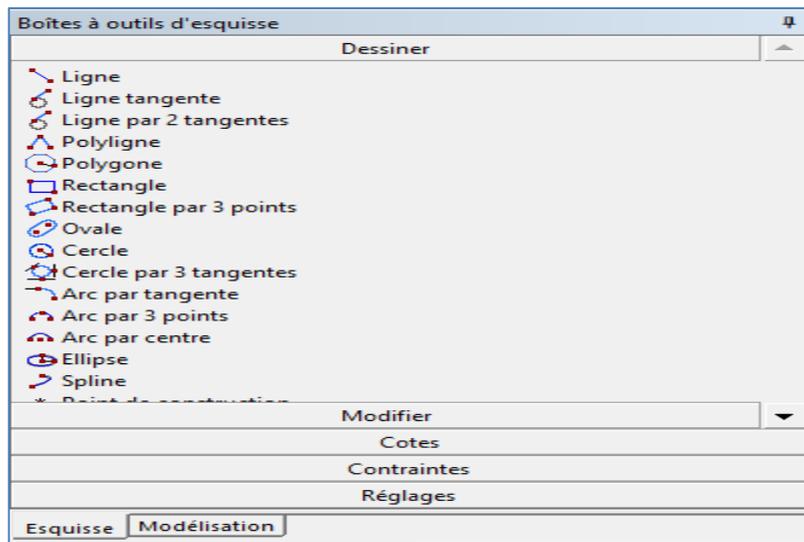


Figure IV.7 : Création d'esquisse.

Dans la boîte à outils esquisse on clique sur la forme du rectangle et fait le dessin dans le plan que nous avons choisi, puis Sélectionnons les cotes à la géométrie comme suit :

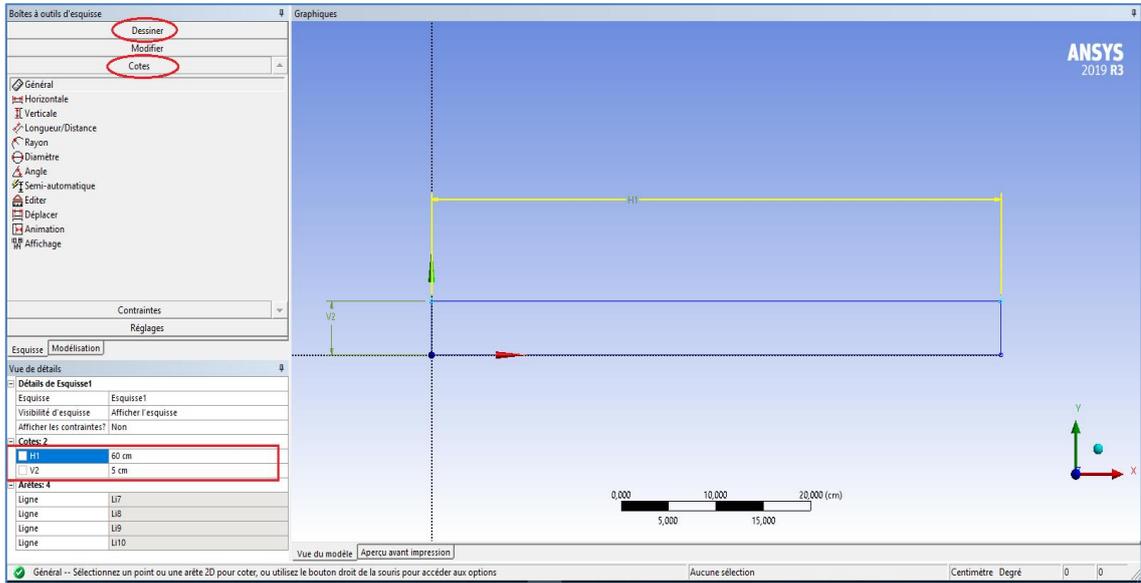
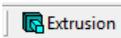


Figure IV.8 : Création d'esquisse et Définition des côtes.

Maintenant pour ajouter la matière dans le troisième dimension (Z), on clique sur



puis Sélectionnons la profondeur de l'ajoutations.

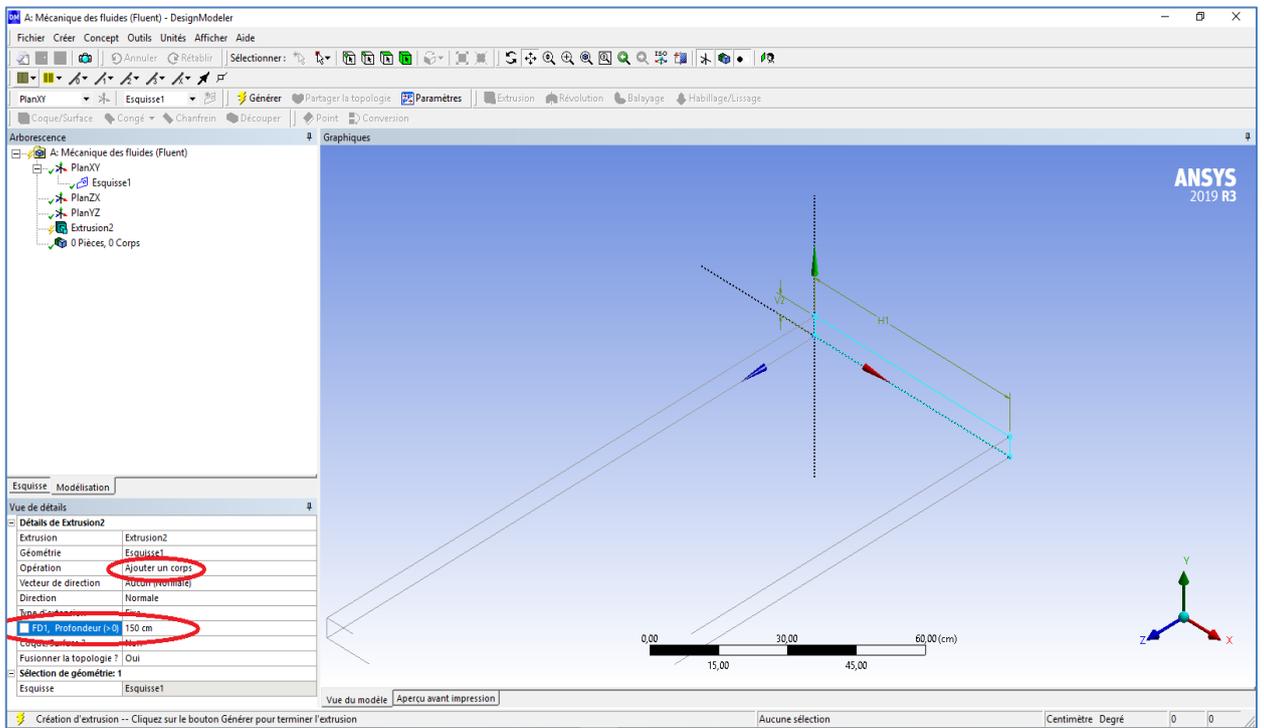


Figure IV.9: l'ajoutations de la matière dans le troisième dimension (Z).

Ensuite on clique sur  On obtient la géométrie d'isolant de capteur solaire hybride PV/T comme la montre dans la figure IV.10:

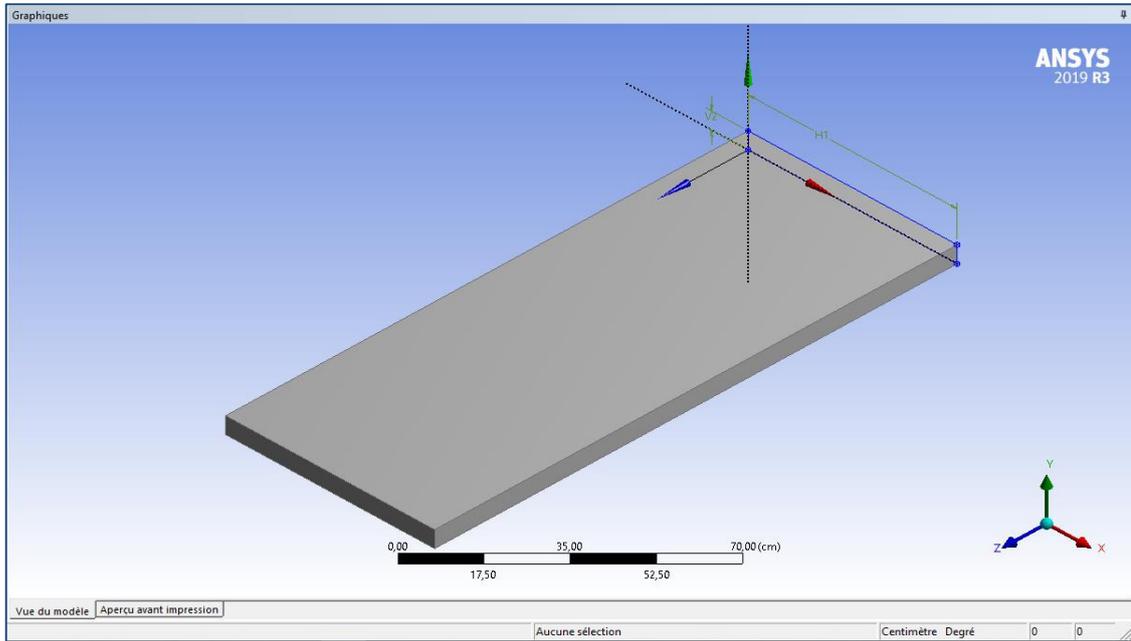


Figure IV.10: isolant de capteur solaire hybride PV/T.

Maintenant pour créer la géométrie de la plaque absorbante muni d'ailettes on va créer un nouveau plan, En cliquant sur  et  à la face supérieure de matière précédemment crée, puis Sélectionnons l'épaisseur de cette plaque mais cette fois dans "Opérations" on va choisi "**ajouter un corps bloqué**" pour ajouter une nouvelle différente matière possède des différentes propriétés de celles la matière précédemment, puis on clique sur « **Générer** » et après nous dessinons une nouvelle esquisse dans le plan XY pour créer les ailettes et le canal de fluide caloporteur comme montré dans la figure IV.11 :

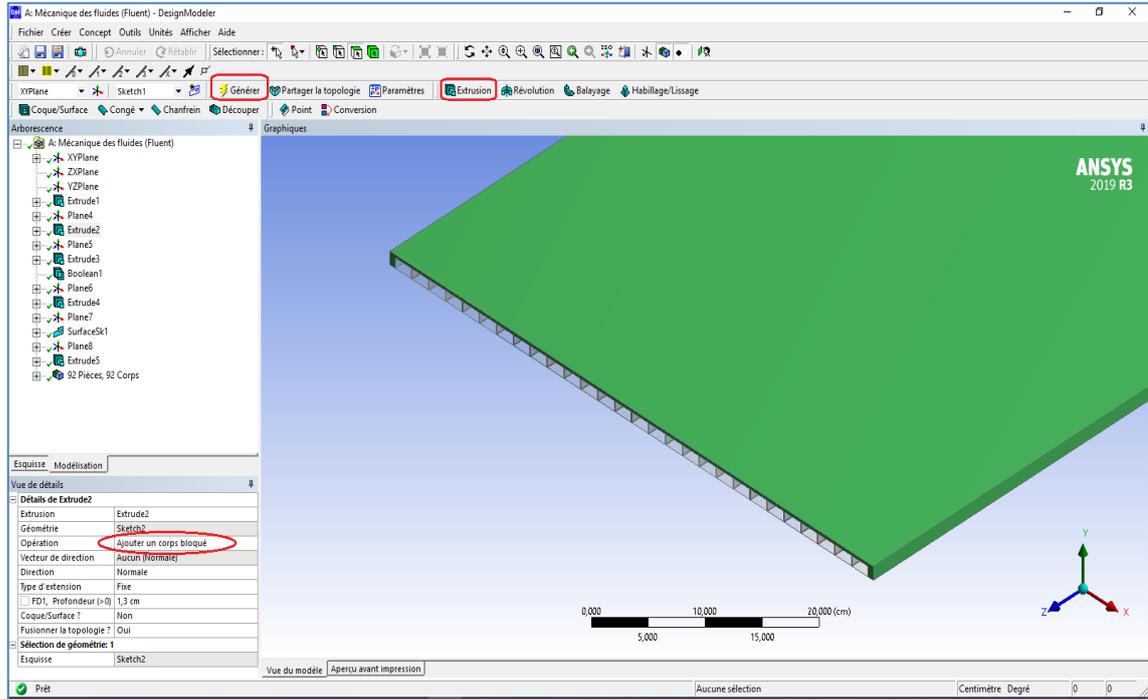


Figure IV.11 : Création la plaque absorbante et crée le canal de fluide caloporteur.

Par la suite il faut déclarer la zone de fluide caloporteur qui circule dans le canal comme suivante :

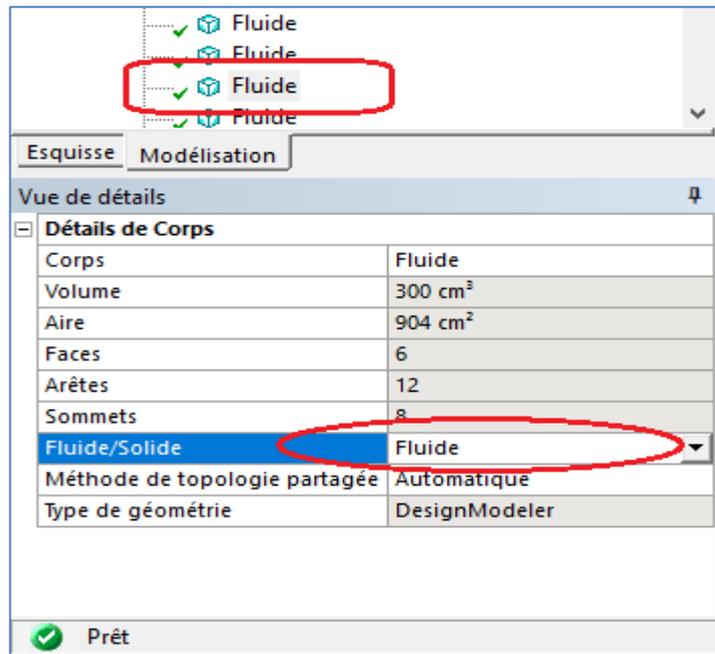


Figure IV.12 : déclaration de la zone de fluide caloporteur.

De même façon on va compléter la création des autres éléments (le vitrage, les cellules photovoltaïques PV et la couche de tedlar...) qui construit la configuration de la géométrie d'étudiée dans notre travail et finalement on obtient la géométrie finale comme le montre dans la figure suivante :

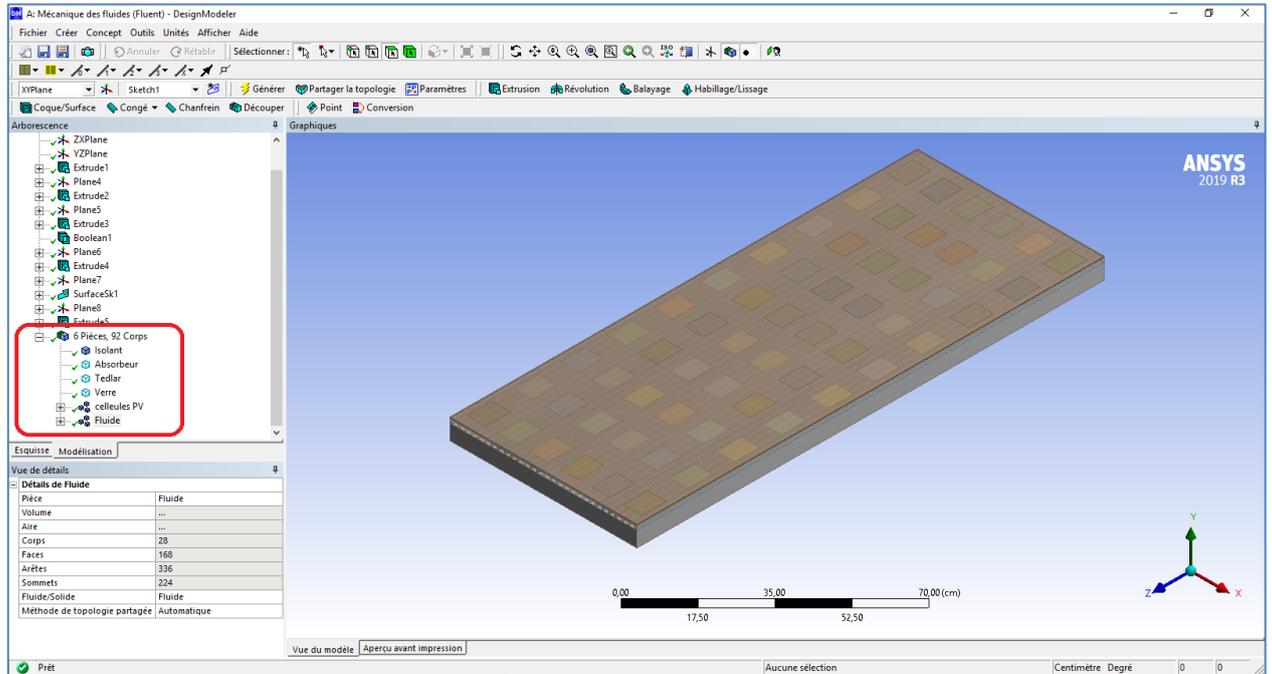


Figure IV.13 : La géométrie de capteur solaire hybride PV/T étudiée.

Comme ça on a terminé notre géométrie, il suffit de la sauvegarder et quitter Design modeler et nous revenons sous Workbench pour passer à l'étape de maillage.

IV.2.1.3 Le maillage :

Le maillage sous Workbench a été réalisé avec double-cliquer sur le maillage dans la boîte Workbench une fois. « Meshing » est lancé.

Dans l'étape de maillage, il y a deux points importants à considérer :

- La surnommations des éléments qui construit la géométrie pour réaliser cette dernière étape ; Sélectionner une partie de la géométrie à l'aide de ces deux icônes :

 : Pour sélectionner les surfaces.

 : Pour sélectionner les arrêtes.

Après on clique droit sur l'élément que nous voulons surnomme et onchoisi Créer "une sélection nommée" ou directement on clique sur "N", puis Lui donner un nom comme le montre la figure suivante :

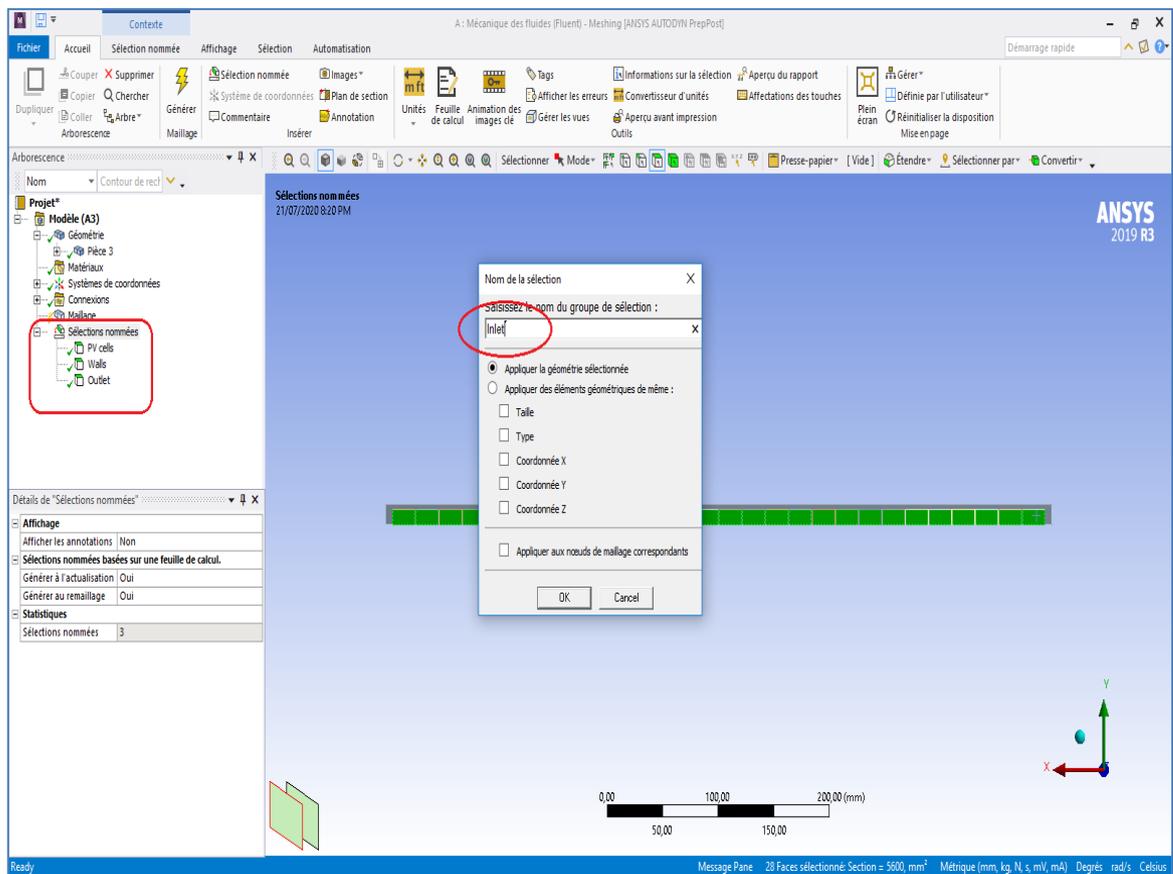


Figure IV.14 : Fenêtre de différentiation des éléments.

* Vous pouvez sélectionner plusieurs éléments en cliquant sur Ctrl.

- Spécification de la méthode de Maillage pour réaliser cette dernière ; il doit sélectionner les éléments ==> Clic droit sur "maillage"==>insertion==>méthode==>puis on choisi la méthode de maillage.

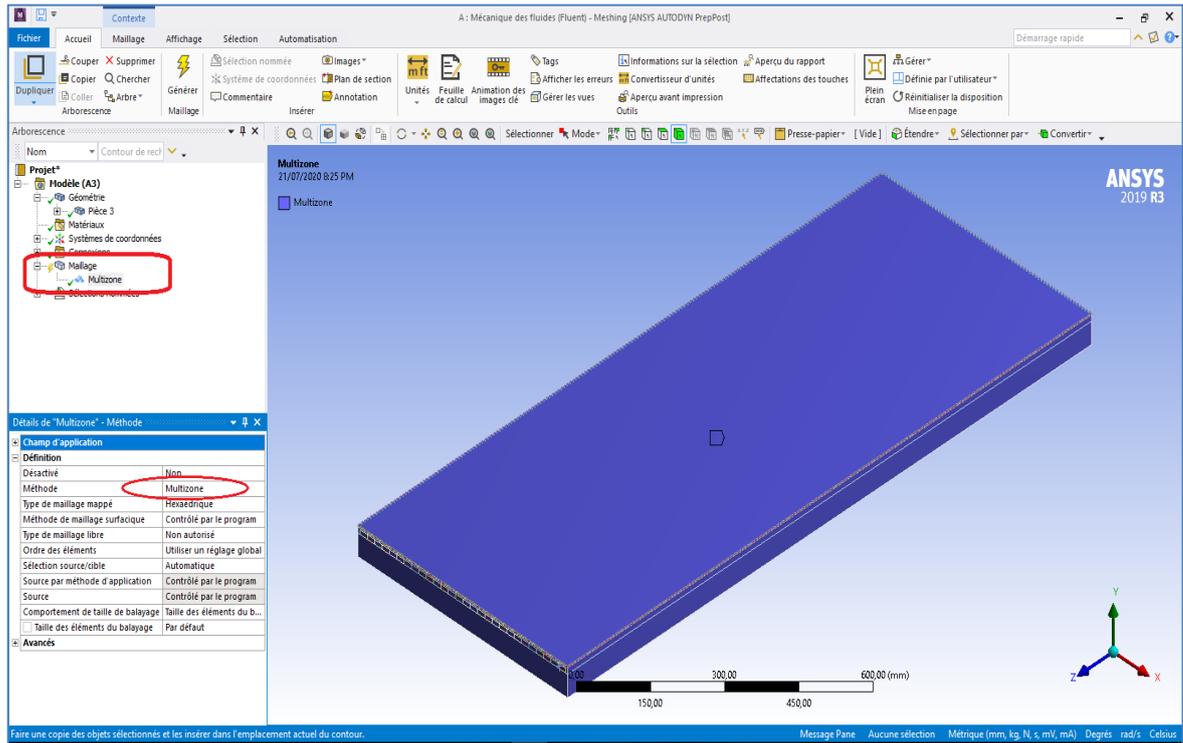


Figure IV.15 : Spécification de la méthode de Maillage.

Le maillage sera comme suit :

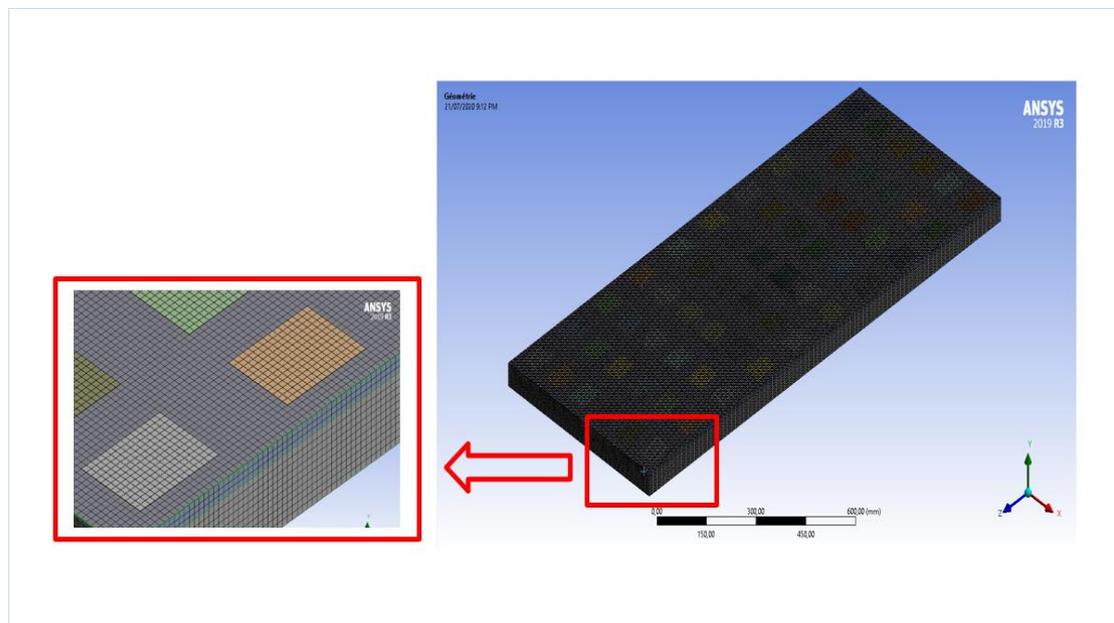


Figure IV.16 : Maillage de la géométrie.

Les processus de maillage dans le logiciel ANSYS Workbench sont basés sur la discrétisation du domaine d'étude en l'utilisation de la méthode des volumes finis, cette dernière consiste à diviser l'ensemble du domaine total à un réseau des points (nœuds). Ainsi un élément de volume (volume de contrôle) est défini autour de chaque nœud.

❖ **Principe de la méthode des volumes finis :**

La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar.

Le principe de méthode des volumes finis baser sur une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement, La technique des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles décrites au chapitre précédent pour obtenir les équations discrétisées, qui conservent toutes les grandeurs physiques sur chaque volume de contrôle [52].

Chacun de ces derniers (volume de contrôle) contenant un nœud appelé le nœud principale. Un exemple de volume de contrôle est montré dans la figure ci-dessous. Pour un nœud principal (P'), les points E et W (E : Est, W : West) sont des voisins dans la direction X, tandis que N et S (N : Nord, S : Sud) sont ceux dans la direction Y. Le volume de contrôle entourant (P') est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux point (e) et (w) dans la direction X, (n) et (s) dans la direction Y. [40]

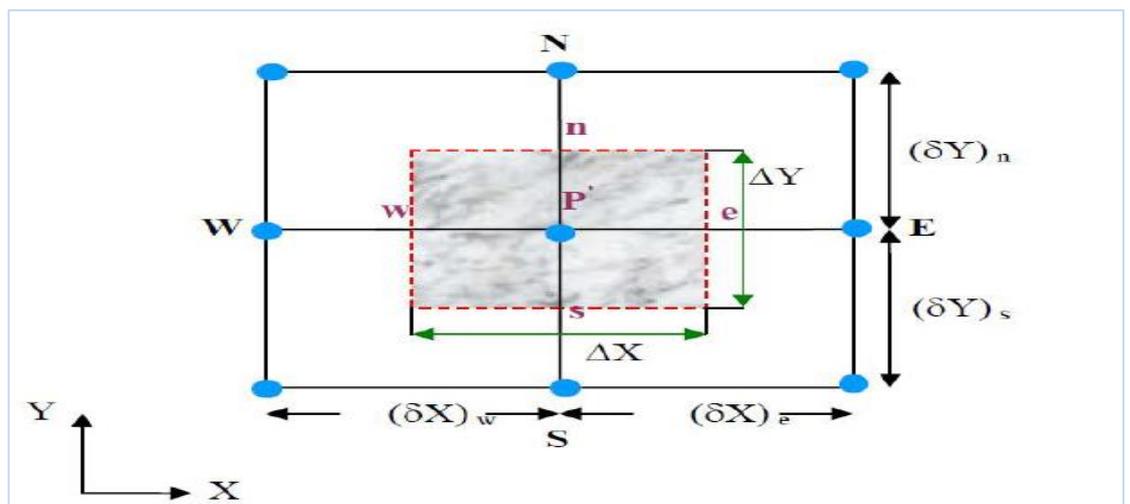


Figure IV.17: Schéma représentant le volume de contrôle bidimensionnel.

Puis nous allons à l'étape de modélisation (Configuration) par le solveur « **Fluent** ».

IV.2.1.4 Configuration :

La configuration sous Workbench on a été réalisé avec double-cliquer sur la configuration dans la boite Workbench dans cette étapes les sélections nommées seront affichées automatiquement, on va pose nos conditions aux limites et on va pose les données comme montre les figures suivantes :

- a) **Model** : laminaire, équation de l'énergie, radiation.
- b) **Matériels** : On ajoute les matériels utilisé dans notre étude et changeons les propriétés thermiques et physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique) pour chaque type de nano fluide. On change aussi les propriétés du solide par celles de silicium, vitre, cuivre...
- c) **Cell zone condition**: Nous avons identifié le nano fluide sur la zone de fluide, le silicium sur la zone de module photovoltaïque, le cuivre sur la zone de l'absorbeur, le vitre sur la zone de vitrage et le bois sur la zone d'isolation.
- d) **Boundary Conditions (Conditions aux limites)** : Nous avons identifié les conditions aux limites suivantes :
 - Entrée (inlet) : la vitesse et la température d'entrée de nano-fluide.
 - Les parois inférieures et latérales : adiabatique.
 - Sortie (outlet) : la pression de sortie.
 - Paroi supérieur (Top glass) : radiation.

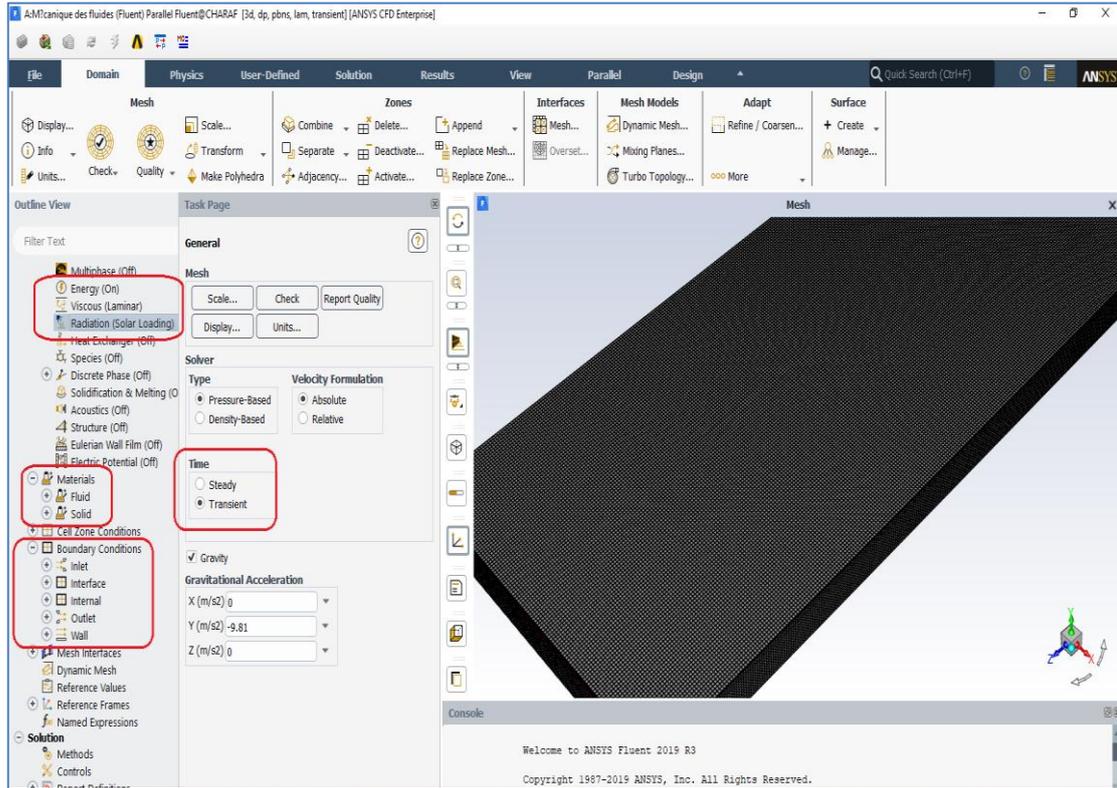


Figure IV.18 : Configuration du modèle par le solveur « **Fluent** ».

VI.2.2 Application Web [53] :

C'est une application disponible sur le web, publié par le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER)-Bouzareah, pour calculer le rayonnement solaire en Algérie.

La présente application permet de calculer divers types de rayonnements solaires, pour 79 sites en Algérie (ONM). Cette application permet de modéliser l'ensemble du rayonnement solaire incident à des fins d'optimisation des systèmes utilisant l'énergie solaire, que ce soit leur dimensionnement ou l'évaluation de leurs performances.

La connaissance du gisement solaire est nécessaire dans le dimensionnement et le bon fonctionnement de tout système fonctionnant à l'énergie solaire (voir Annexe A). On a utilisé les données du rayonnement solaire dans la conception, le développement ainsi que dans l'évaluation des performances des systèmes d'énergie solaire pour le capteur solaire hybride PV/T étudiée.

La structure générale de l'application est présentée ci-dessous :

IV.2.2.1 Menu principal du L'Application Web :

L'ouverture de l'application fait apparaître le menu principal ci-dessous :

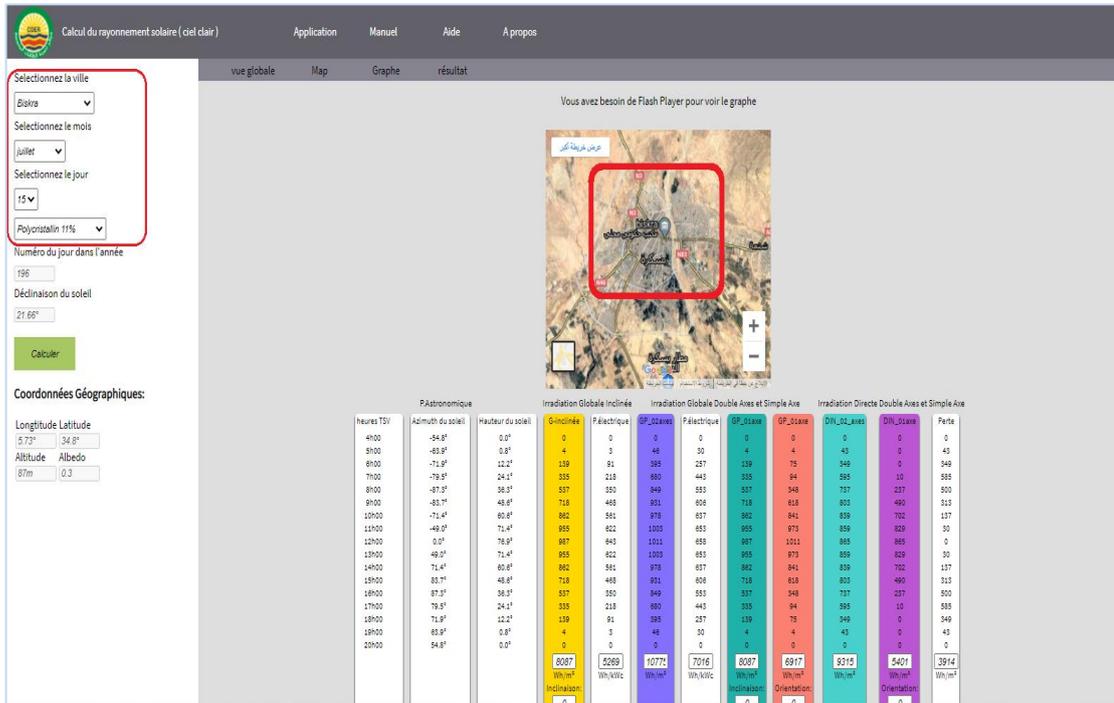


Figure IV.19 : Menu principal de L'Application Web.

La barre d'outils donne accès à des plusieurs données pour l'analyse du rayonnement solaire incident comme suivante :

VI.2.2.2 Input du l'application Web :

- **La Ville** : pour localiser la ville dans laquelle l'étude est menée et l'utilisation des Coordonnées Géographiques pour les calculs du rayonnement solaire ; pour notre étude on a choisi la ville de BISKRA.
- **La Date** : pour sélectionner le mois et le jour de l'étude afin de calculer la déclinaison du soleil.
- **Le Type de la cellule photovoltaïque.**

VI.2.2.3 Output du l'application Web :

Les résultats sont présentés sous forme un tableau contient des plusieurs paramètres calculés comme : paramètres Astronomique (TSV, Azimuth du soleil, Hauteur du soleil), Type de l'irradiation globale et Puissance électrique...ect.

IV.3 Propriétés thermo-physiques :

Dans nos calculs nous avons utilisés le nanofluide eau-cuivre (Eau-Cu), les propriétés thermo-physiques sont déterminées à partir des modèles suivants :

- ✚ La masse volumique, voir chapitre II, eq (II.3).
- ✚ La chaleur spécifique : Modèle de Xuan et Roetzel, voir chapitre II, éq (II.4).
- ✚ La conductivité thermique : Modèle de Maxwell, voir chapitre II, éq (II.6).
- ✚ Le coefficient d'expansion volumique, voir chapitre II, éq (II.10).
- ✚ La viscosité thermique : Modèle d'Einstein, voir chapitre II, éq (II.11).

Les propriétés sont calculées à partir un code Matlab (voir Annexe B), ils sont reportées sur les tableaux (VI.1, VI.2, VI.3, VI.4)

	ρ [Kg/m ³]	C_p [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	K [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	μ [Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	β [1/K]
Eau	998.2	4182	0.6	0.001003	21. 10 ⁻⁵
Cu	8978	381	387.6	/	16,7. 10 ⁻⁵

Tableau VI.1: les propriétés de l'eau et le cuivre.

	ρ [Kg/m ³]	C_p [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	K [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	μ [Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	β [1/K]
Eau-Cu	1796.2	2282.1	0.799	0.0013	1,9067. 10 ⁻⁵

Tableau VI.2: 1^{er} Cas les propriétés du nanofluide $\Phi=0,1$.

	ρ [Kg/m ³]	C_p [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	K [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	μ [Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	β [1/K]
Eau-Cu	2594.2	1551.1	1.0474	0.0015	1,7134. 10 ⁻⁵

Tableau VI.3: 2^{em} Cas les propriétés du nanofluide $\Phi=0,2$.

	ρ [Kg/m ³]	C_p [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	K [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	μ [Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	β [1/K]
Eau-Cu	4988.1	761.321	2.3834	0.0023	1,1335. 10 ⁻⁵

Tableau VI.4: 1^{eme} Cas les propriétés du nanofluide $\Phi= 0,5$.

IV.4. Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons présenté en détails les étapes de la simulation numérique du modèle mathématique à l'aide du logiciel ANSYS Workbench, ainsi le rayonnement solaire à l'aide de l'Application Web.

Nous avons intéressé dans nos résultats par la distribution et le champ de température, vitesse et le nombre de Nusselt ; qui sera affiché, interprétées dans le chapitre suivant.

Chapitre V :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction :

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation numérique obtenus et leurs interprétations, pour analyser l'évolution du transfert de chaleur en convection mixte dans un capteur solaire hybride (PV/TH) contenant un module photovoltaïque muni en bas par une plaque absorbant avec des ailettes, en utilisons comme un fluide de refroidissement le nano-fluide (Eau-Cuivre).

Nous avons utilisé particulièrement, au niveau de cette simulation numérique, Le logiciel ANSYS Workbench pour résoudre les trois équations conservation (continuité, quantité de mouvement et d'énergie), avec les conditions aux limites du phénomène a physique en question, voir le **tableau (V.1)**.

Les résultats obtenus seront discutés en présentant pour chaque cas les champs de température, contours des vitesses et le nombre de Nusselt pour différentes fractions volumiques du nanofluide utilisé.

Nous proposons d'exposer dans ce chapitre, l'effet du la fraction volumique et du nombre de Reynolds sur le refroidissement du module photovoltaïque pour des différentes valeurs de fraction volumique et nombre de Reynolds.

Le nombre de Nusselt est défini par le rapport entre le flux de chaleur convectif et du flux de chaleur conductif. Ce nombre caractérise le taux de transfert de chaleur au niveau de l'interface (fluide – solide).

V.2. La Convergence :

Depuis le lancement du calcul, nous avons choisi un maillage structuré avec des éléments de type quadra, le maillage choisit englobé 2100547 nœuds.

On remarque que la convergence est atteinte après 100 itérations figure (V.1)

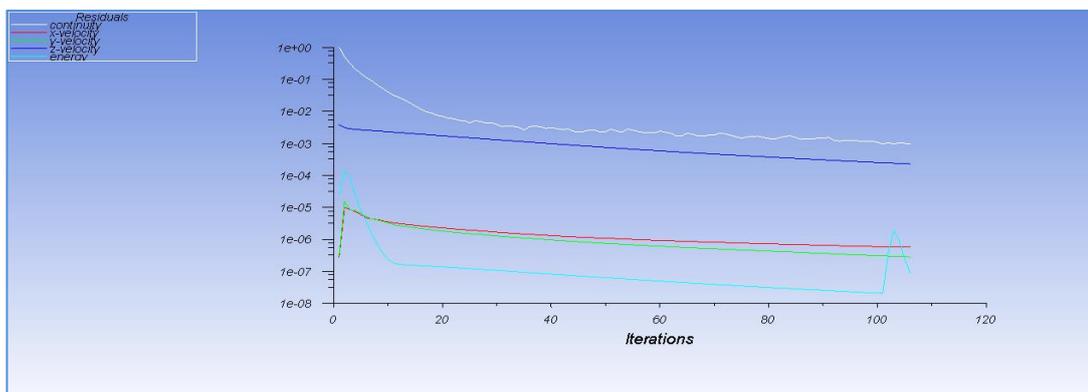


Figure V.1 : Présentation de l'évolution des résidus de calcul (Convergence de la solution).

V.3. Résultats et Interprétation :

Les simulations numériques sont effectuées pour différentes valeurs de la fraction volumique des nanoparticules du cuivre contenant dans l'eau, qui le fluide ($\Phi=0.1, 0.2$ et 0.5) et pour différents nombres de Reynolds (différentes valeurs des vitesses) ($Re=50, 100, 300, 500$).

Les conditions aux limites utilisées dans le présent travail sont présentées au tableau (V.1).

Type de condition initial	$\Phi=0.1$	$\Phi=0.2$	$\Phi=0.5$
Vitesse d'entrée	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 50$ $V=0.0028$ m/s ▪ $Re= 100$ $V= 0.0056$ m/s ▪ $Re = 300$ $V= 0.0167$m/s ▪ $Re = 500$ $V =0.0278$ m/s 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 50$ $V=0.0022$ m/s ▪ $Re= 100$ $V= 0.0044$ m/s ▪ $Re = 300$ $V= 0.0133$m/s ▪ $Re = 500$ $V =0.0222$ m/s 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 50$ $V=0.0018$m/s ▪ $Re= 100$ $V= 0.0035$ m/s ▪ $Re = 300$ $V= 0.0106$ m/s ▪ $Re = 500$ $V =0.0177$ m/s
Température d'entrée	$293^{\circ}K$	$293^{\circ}K$	$293^{\circ}K$
Ryonnement Solaire	$1000 W/m^2$	$1000 W/m^2$	$1000 W/m^2$

Tableau V.1 : Condition aux limites hydrodynamique et thermique.

Dans notre travail nous avons mené de nombreuses simulations numériques en utilisant la méthode des volumes fini du logiciel ANSYS Workbench pour illustrer bien l'évacuation des flux de chaleur à partir du nanofluide Eau-Cuivre utilisé.

La présentation des résultats concernant le champ de la température, contours des vitesses et le nombre de Nusselt pour différentes fractions volumiques.

V.3.1. Interprétation des résultats de la température :

La température joue un rôle très important lors de la procédure du calcul, Il est donc nécessaire d'effectuer une idée claire de la température, les figures (V.2 jusqu'au V.26) illustre bien l'évolution du champ de la température totale dans la surface des modules photovoltaïque ainsi que, dans les sections des canaux utilisés pour le refroidissement.

Sur les résultats des figures (V.2 jusqu'au V.26), on observe clairement une évolution remarquable de la température pour les nanofluides à des fractions volumiques supérieures, même observation que pour l'augmentation du nombre de Reynolds.

Les résultats montrent que l'augmentation du transfert de chaleurs de nanofluides est plus notable aux fractions volumiques et nombres de Reynolds les plus élevées à cause de l'addition de nanoparticules (Cu) dans le fluide de base (l'eau) qui en résulte l'augmentation de sa conductivité thermique et donc améliore le transfert de chaleur par conduction et l'augmentation du nombre de Reynolds provoque le transfert de chaleur par convection.

V.3.2. Interprétation des champs de la vitesse :

Les figures V.27 jusqu'au V.38 montrent les résultats de la distribution des champs de vitesses, on constate que les valeurs de la vitesse sont diminuées près de la paroi et augmentent lorsqu'on dirige vers le centre et on peut expliquer ça par la présence des forces de frottements entre les particules de nano-fluide et les parois du canal, ceux qui sont élevés au cas de la fraction volumique élevé.

V.3.3. Interprétation Nombre de Nusselt :

L'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds pour le nanofluide Eau-Cuivre a des différentes fractions volumiques ($\Phi=0.1, 0.2$ et 0.5) est présentée sur la figure (V.39).

On constate que dans les trois cas, le nombre du Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds, ainsi que la valeur du Nusselt pour la fraction volumique $\Phi=0.5$ est plus élevée par rapport $\Phi=0.1$ et 0.2 .

➤ **Champ de température de la surface du module photovoltaïque :**

a) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.1$

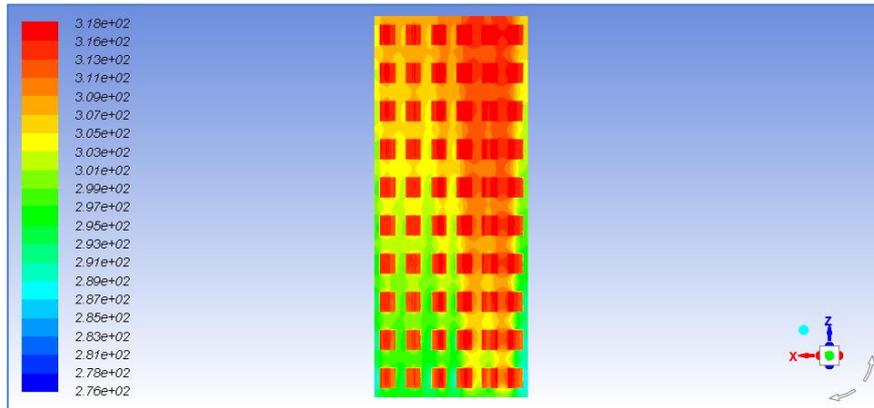


Figure V.2 : Représentation de la distribution de la température de la surface de module photovoltaïque à $Re=50, \Phi=0.1$

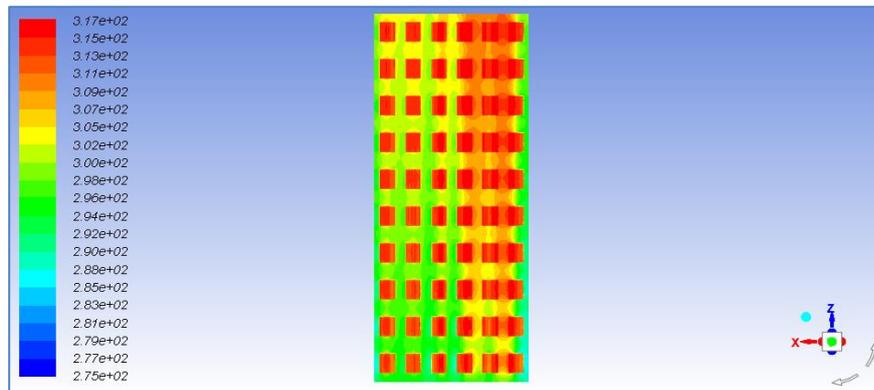


Figure V.3 : Représentation de la distribution de la température de la surface de module photovoltaïque à $Re=100, \Phi=0.1$

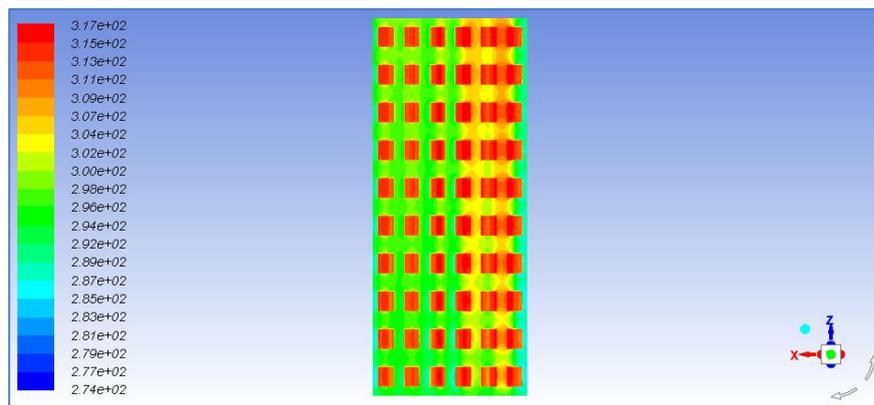


Figure V.4.: Représentation de la distribution de la température de la surface de module photovoltaïque à $Re=300, \Phi=0.1$

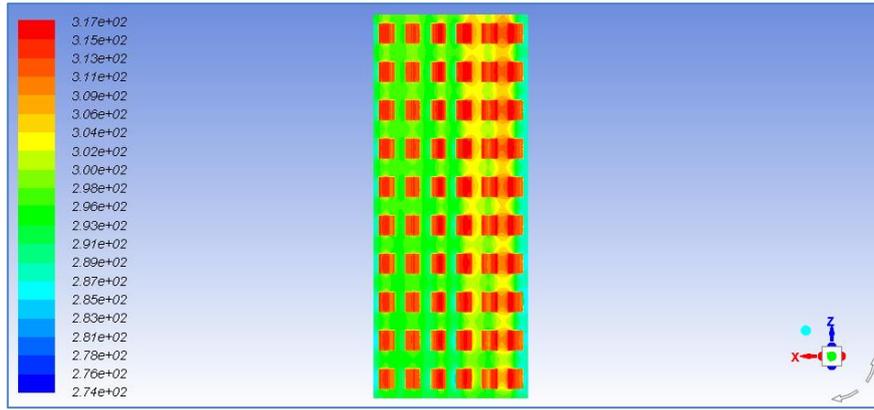


Figure V.5 : Représentation de la distribution de la température de la surface de module à $Re=500$, $\Phi=0.1$

b) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.2$

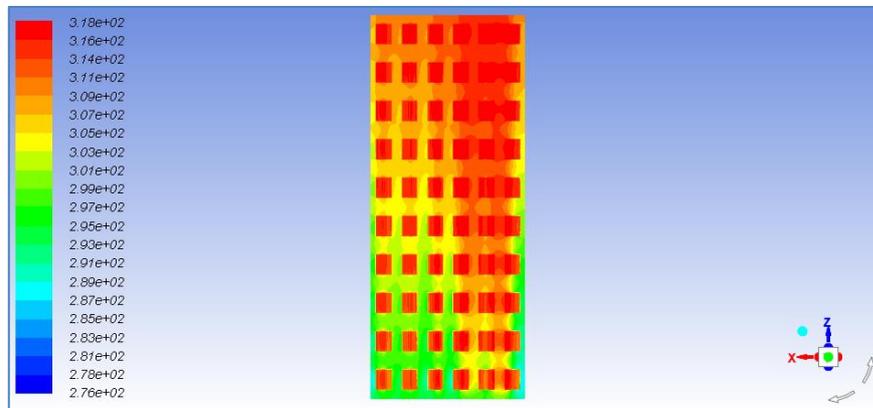


Figure V.6 : Représentation de la distribution de la température de la surface de module photovoltaïque à $Re=50$, $\Phi=0.2$

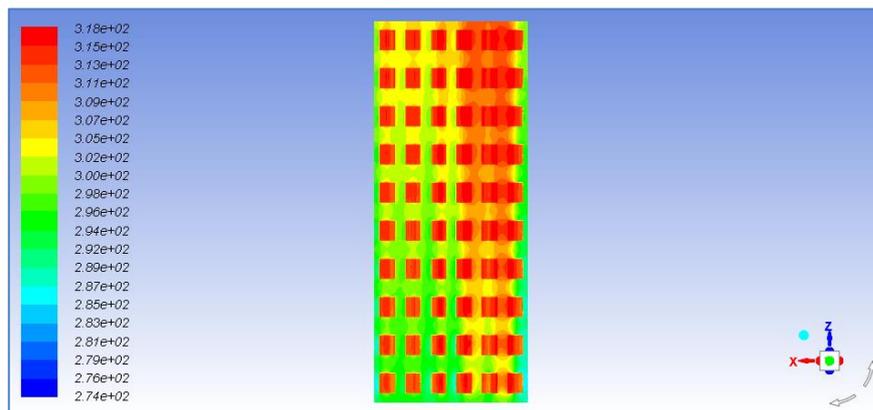


Figure V.7: Représentation de la distribution de la température de la surface de module à $Re=100$, $\Phi=0.2$

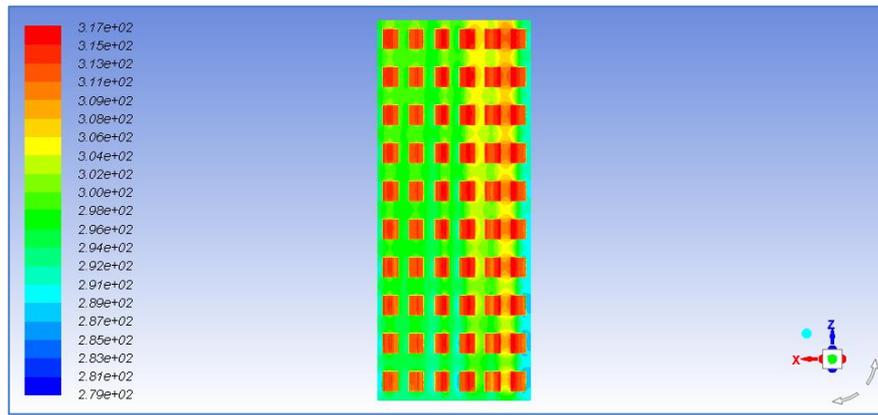


Figure V.8: Représentation de la distribution de la température de la surface de module à $Re=300$, $\Phi=0.2$

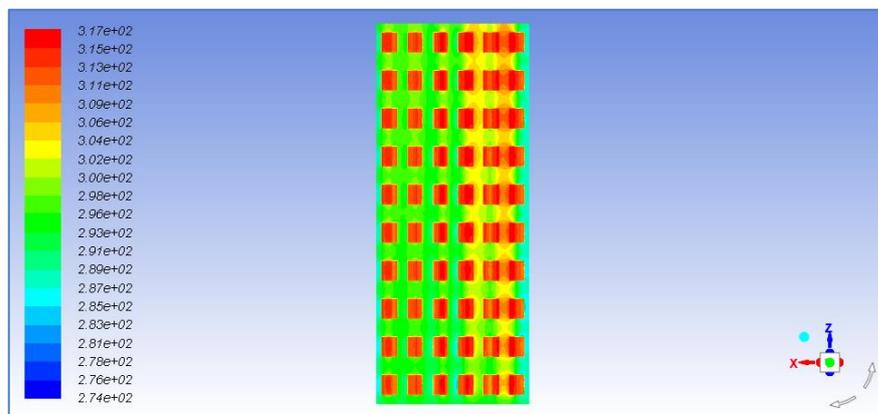


Figure V.9: Représentation de la distribution de la température de la surface de module à $Re=500$, $\Phi=0.2$

c) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.5$

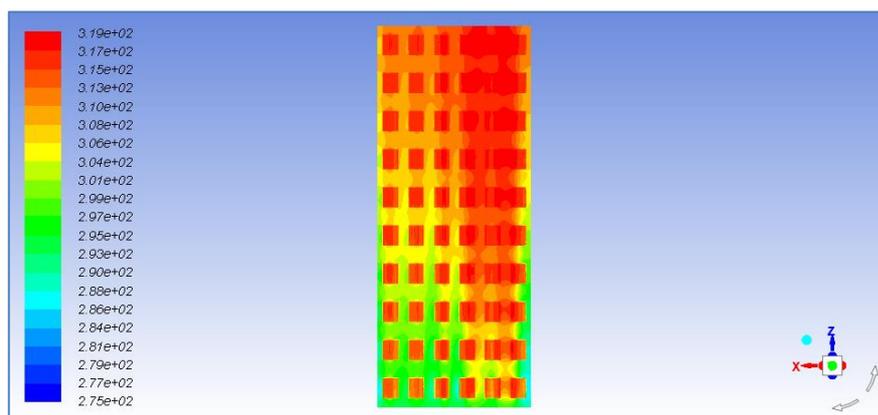


Figure V.10: Représentation de la distribution de la température de la surface de module à $Re=50$, $\Phi=0.5$

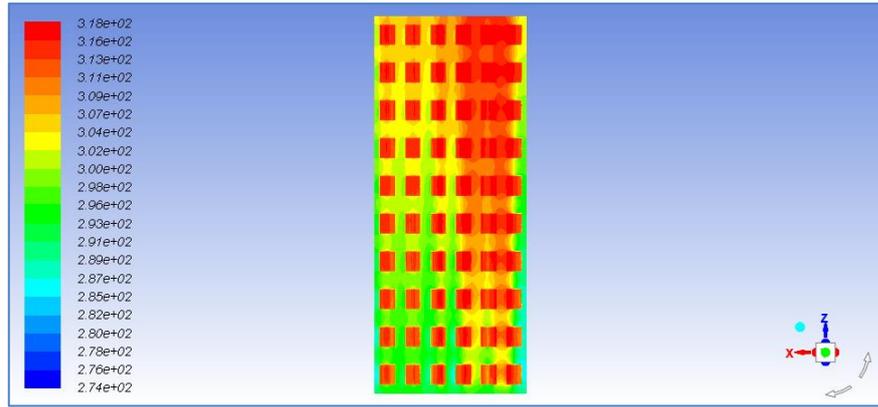


Figure V.11: Représentation de la distribution de la température de la surface de module photovoltaïque à $Re=100$, $\Phi=0.5$

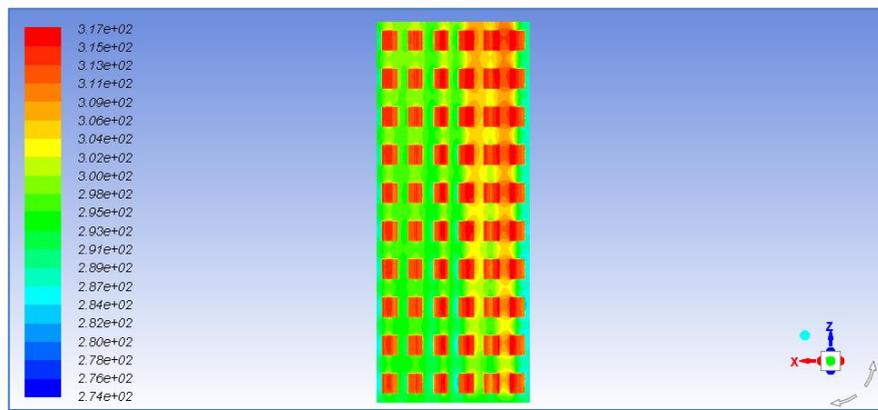


Figure V.12: Représentation de la distribution de la température de la surface de module photovoltaïque à $Re=300$, $\Phi=0.5$

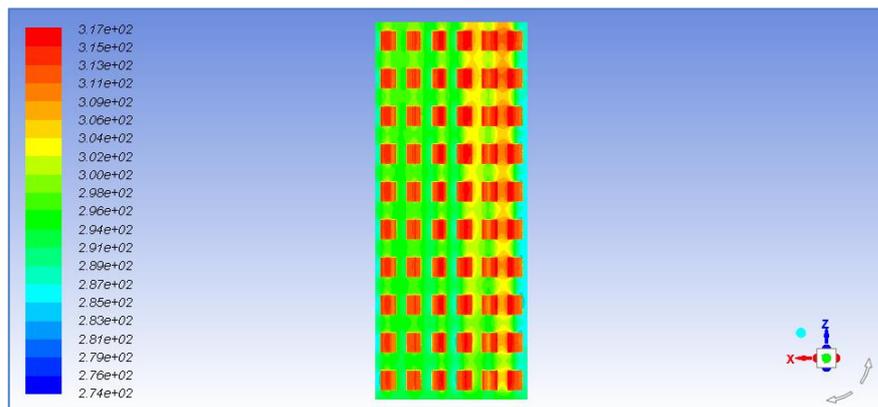


Figure V.13: Représentation de la distribution de la température de la surface de module photovoltaïque à $Re=500$, $\Phi=0.5$

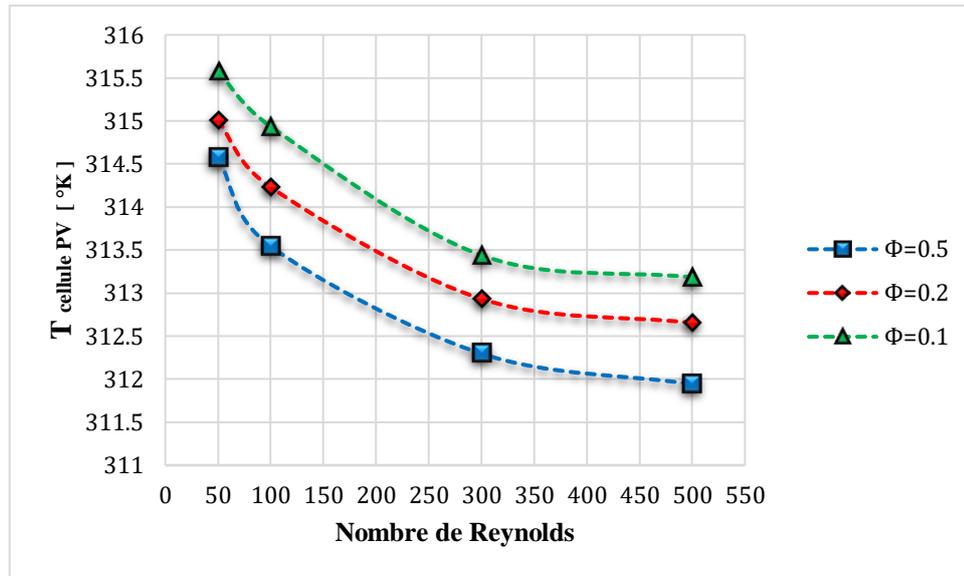


Figure V.14: Représentation de l'évolution de la température de la surface de module photovoltaïque à des différentes fractions volumiques.

➤ **Champ de température des sections des Canales de refroidissement**

a) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.1$

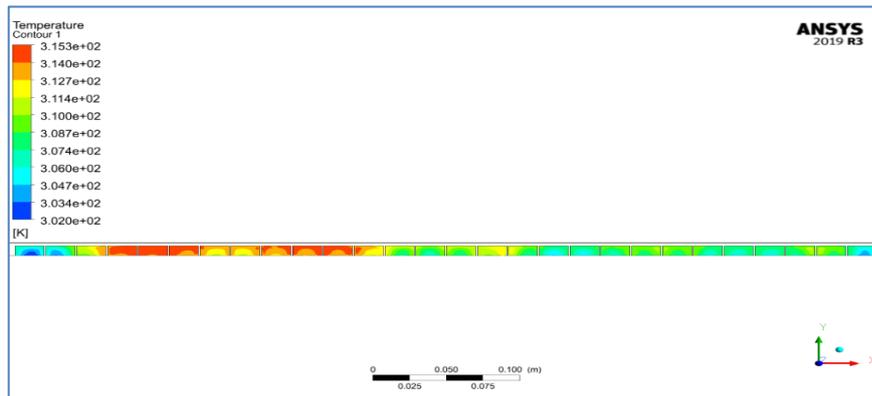


Figure V.15: Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=50$, $\Phi=0.1$

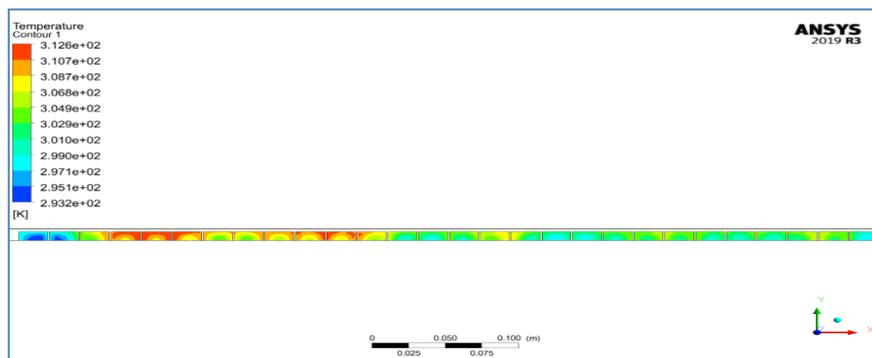


Figure V.16: Représentation la distribution de la température de section de canal de refroidissement à $Re=100$, $\Phi=0.1$

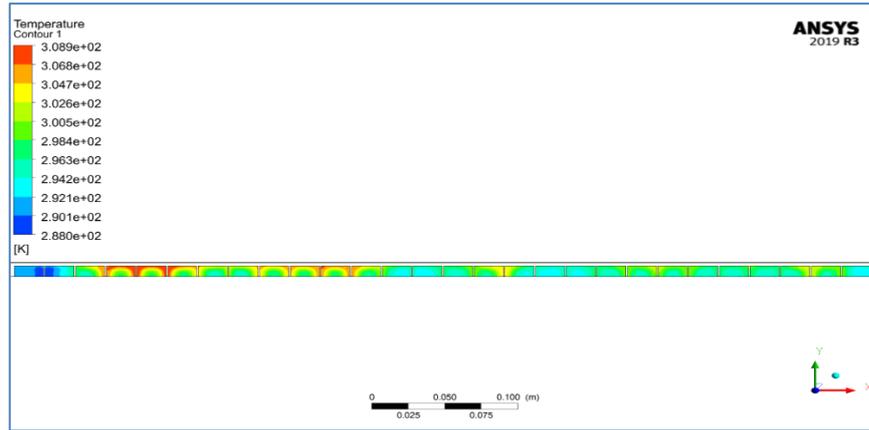


Figure V.17 : Représentation de la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=300$, $\Phi=0.1$

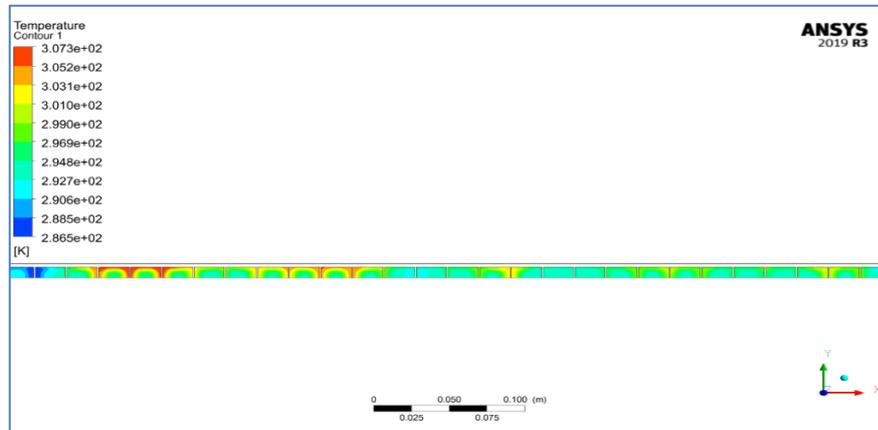


Figure V.18 : Représentation la distribution de la température de section de canal de refroidissement à $Re=500$, $\Phi=0.1$

b) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.2$

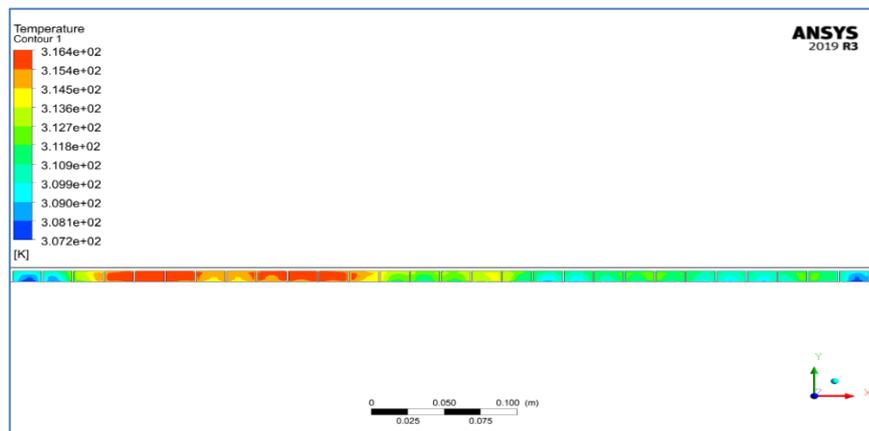


Figure V.19 : Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=50$, $\Phi=0.2$

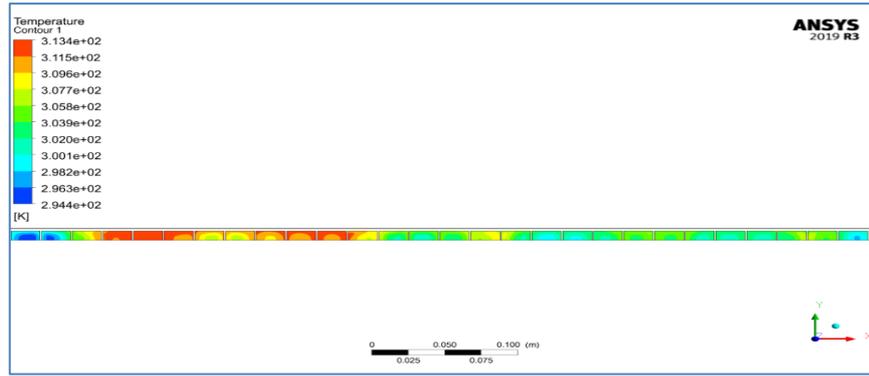


Figure V.20: Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=100$, $\Phi=0.2$

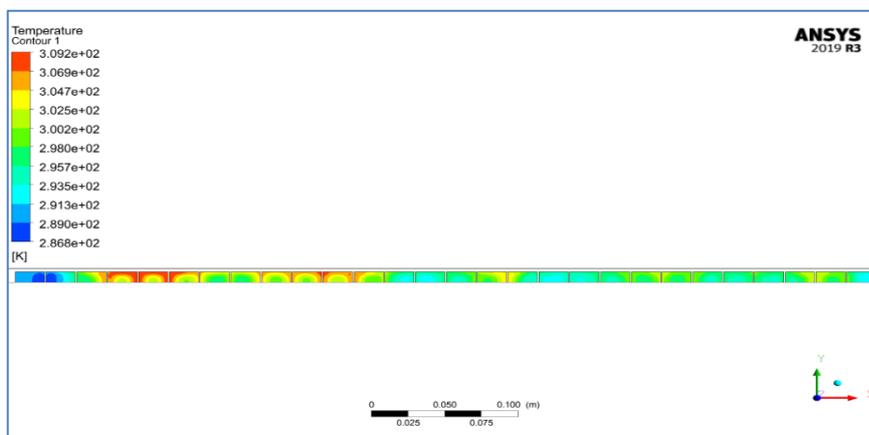


Figure V.21 : Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=300$, $\Phi=0.2$

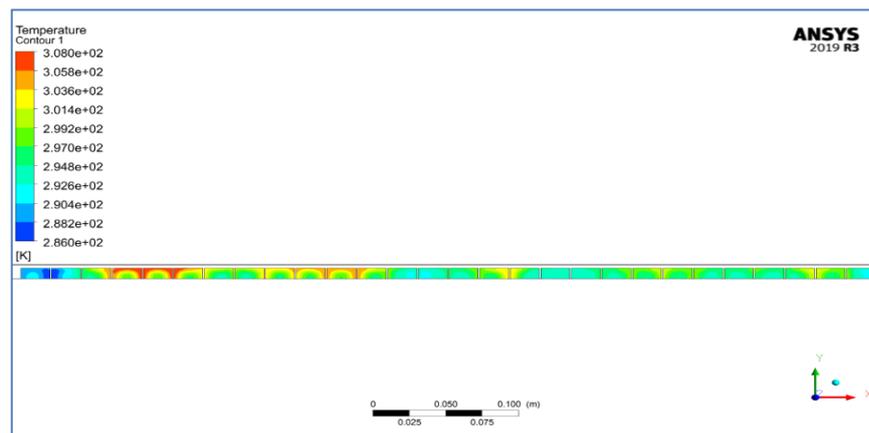


Figure V.22: Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=500$, $\Phi=0.2$

c) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.5$

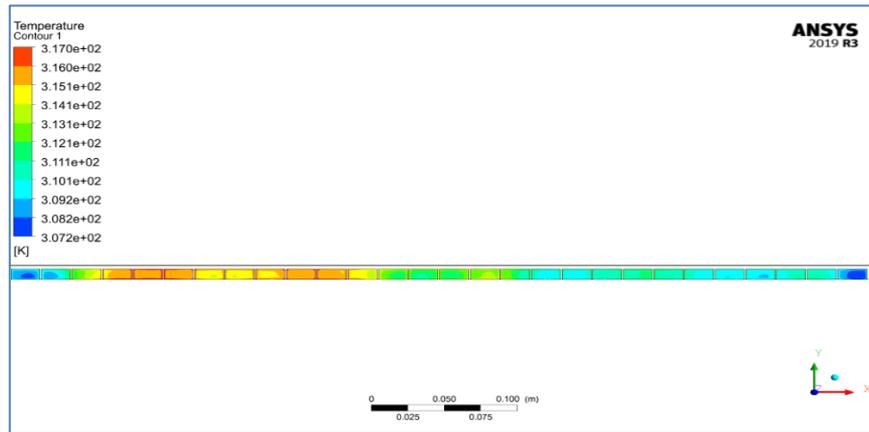


Figure V.23: Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=50$, $\Phi=0.5$

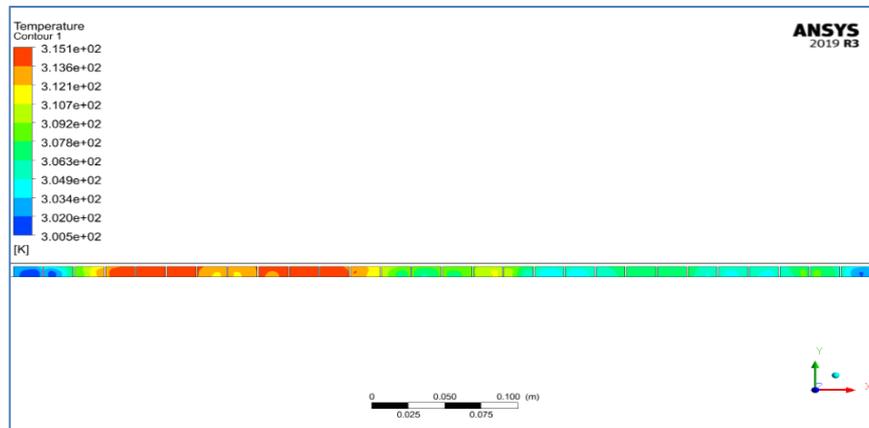


Figure V.24 : Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=100$, $\Phi=0.5$

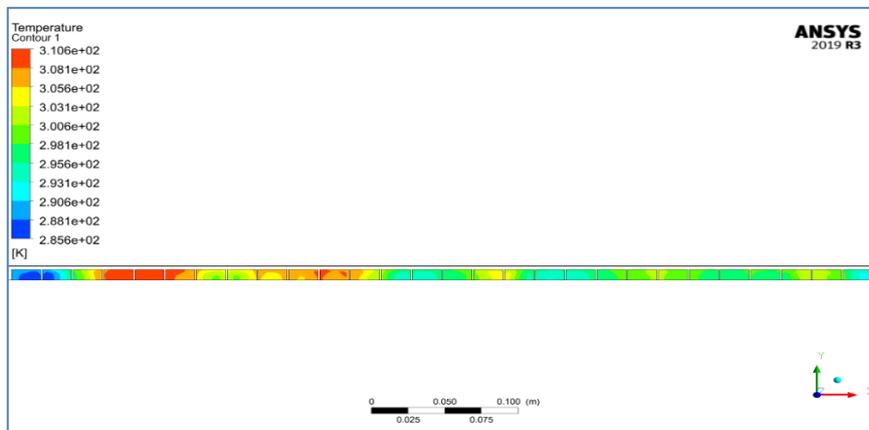


Figure V.25 : Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=300$, $\Phi=0.5$

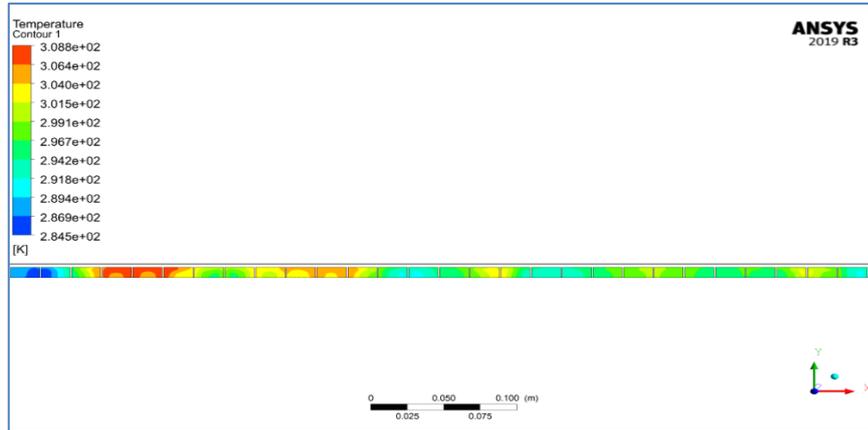


Figure V.26 : Représentation la distribution de la température de la section de canal de refroidissement à $Re=500$, $\Phi=0.5$

➤ **Champ de la vitesse**

a) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.1$

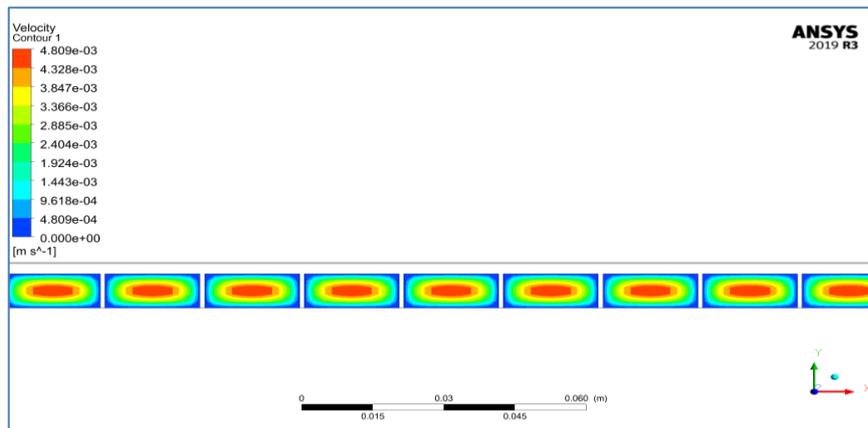


Figure V.27: Représentation du contour de la vitesse à $Re=50$, $\Phi=0.1$

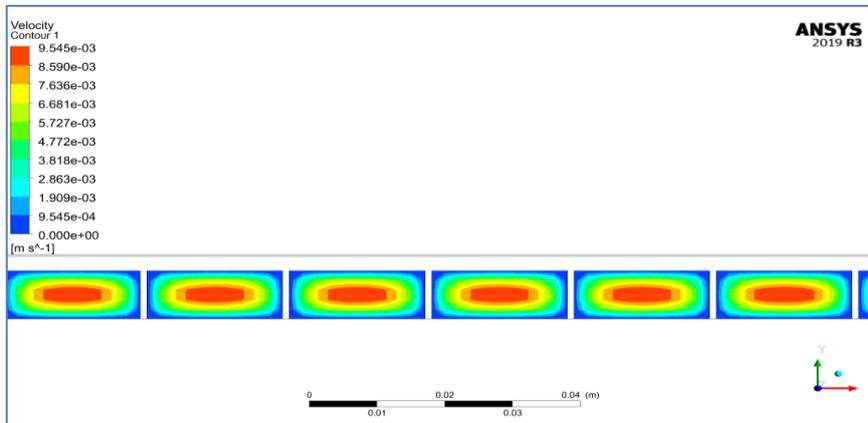


Figure V.28 : Représentation du contour de la vitesse à $Re=100$, $\Phi=0.1$

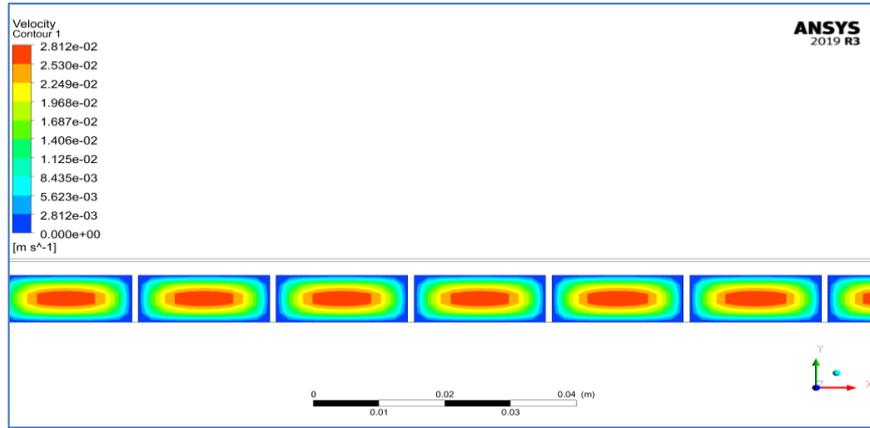


Figure V.29 : Représentation du contour de la vitesse à $Re=300$, $\Phi=0.1$

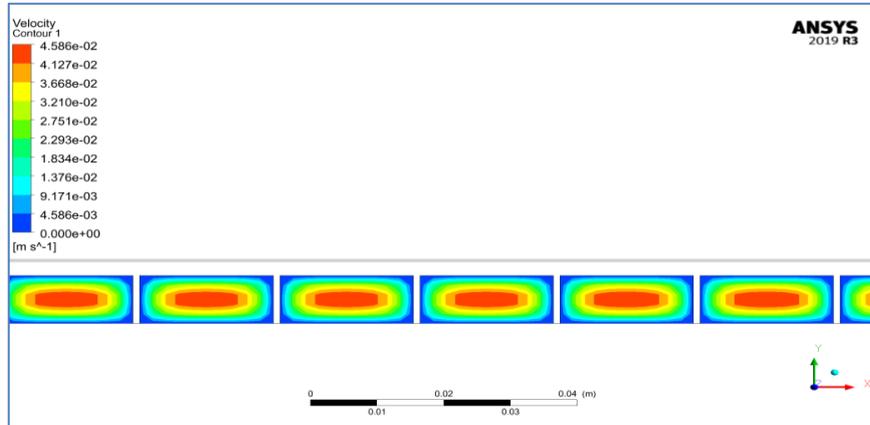


Figure V.30 : Représentation du contour de la vitesse à $Re=500$, $\Phi=0.1$

b) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.2$

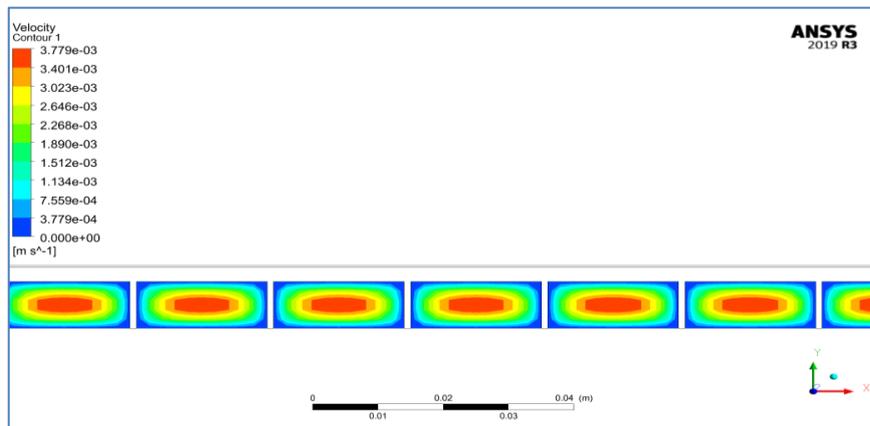


Figure V.31: Représentation du contour de la vitesse à $Re=50$, $\Phi=0.2$

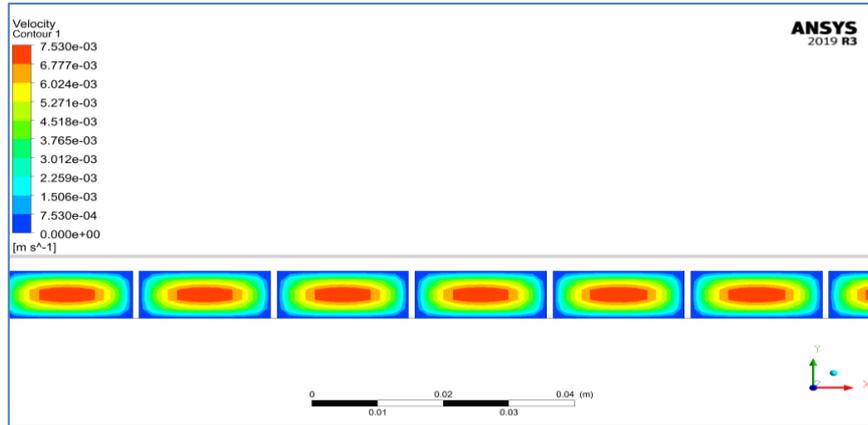


Figure V.32: Représentation du contour de la vitesse à $Re=100$, $\Phi=0.2$

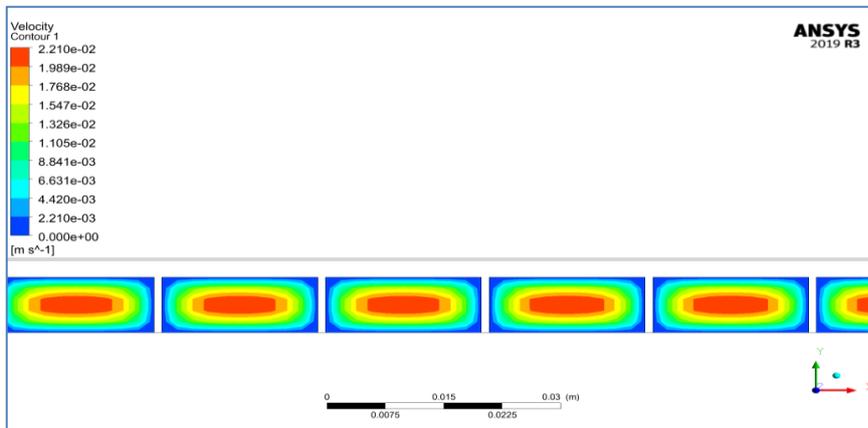


Figure V.33 : Représentation du contour de la vitesse à $Re=300$, $\Phi=0.2$

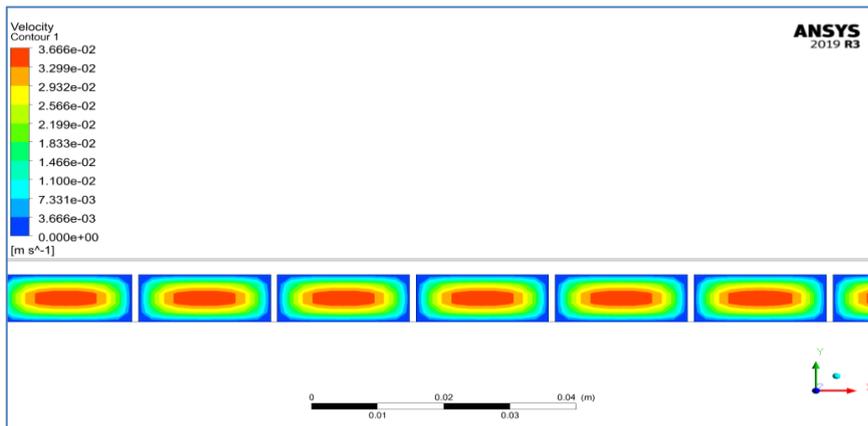


Figure V.34: Représentation du contour de la vitesse à $Re=500$, $\Phi=0.2$

c) Cas de calcul pour une fraction volumique $\Phi=0.5$

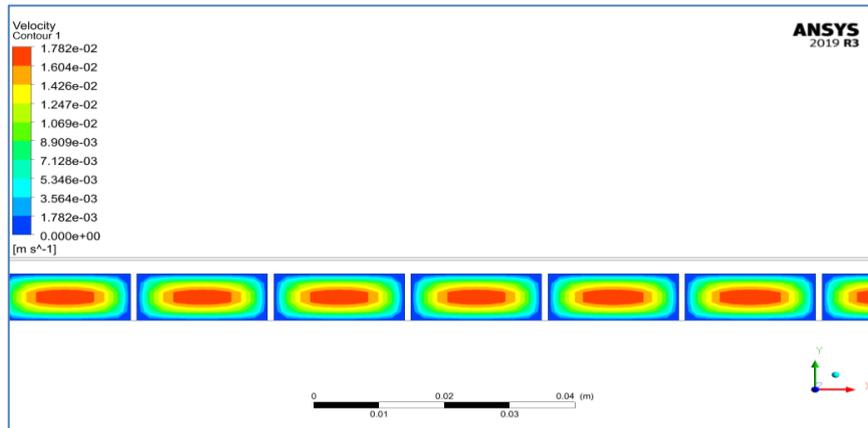


Figure V.35: Représentation du contour de la vitesse à $Re=50$, $\Phi=0.5$

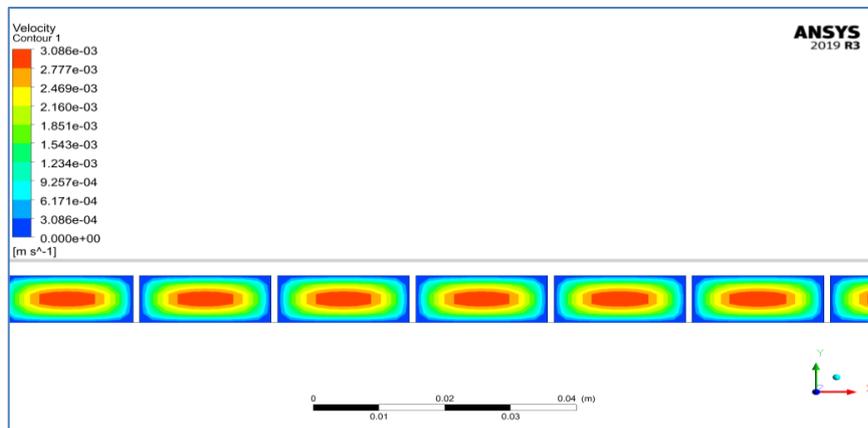


Figure V.36: Représentation du contour de la vitesse à $Re=100$, $\Phi=0.5$

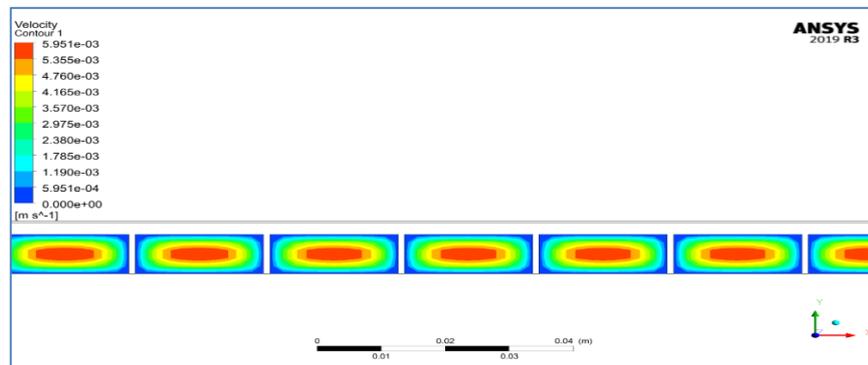


Figure V.37 : Représentation du contour de la vitesse à $Re=300$, $\Phi=0.5$

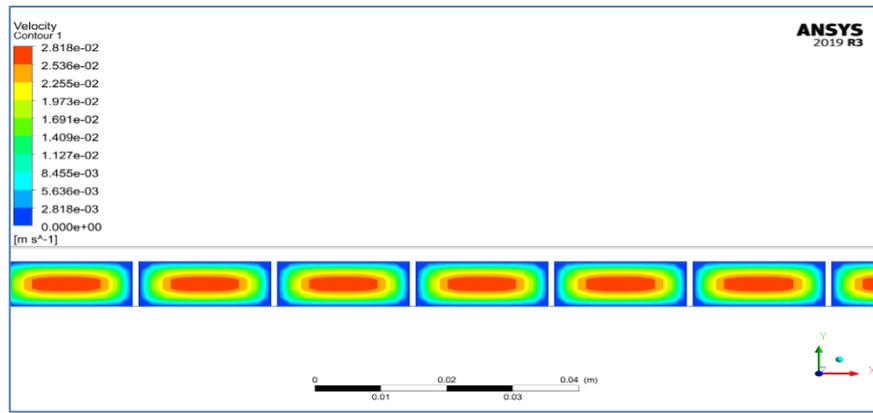


Figure V.38: Représentation du contour de la vitesse à Re=500, $\Phi=0.5$

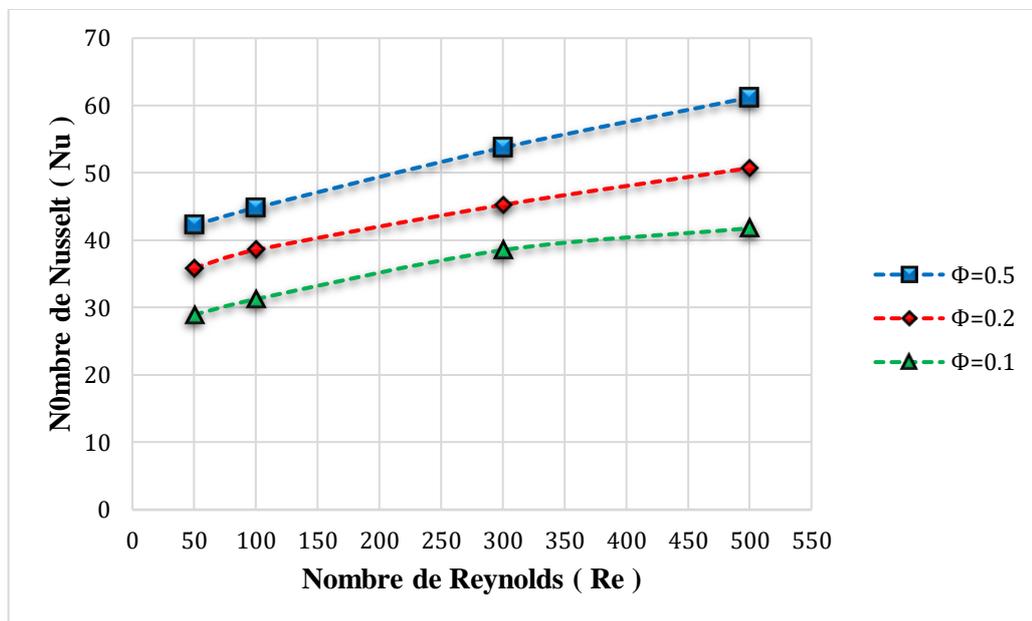


Figure V.39 : Représentation de l'évolution du nombre de Nusselt à des différentes fractions volumiques

V.4 Conclusion

On conclut que le flux de chaleur convectif évacué par un nanofluide augmente avec l'augmentation la fraction volumique et de la vitesse de l'écoulement cela justifié par le nombre de Nusselt qui explique dans notre étude que le flux convectif est dominant par rapport au flux conductif.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une étude de la simulation numérique d'un capteur solaire photovoltaïque hybride (thermique) (PV/TH), pour contribuer numériquement à améliorer le refroidissement des modules photovoltaïques par la nouvelle technique de la nanotechnologie en utilisations des nano-fluides (Eau-Cuivre) en écoulement.

La simulation numérique, abordée en 3D. Cette étude a été structurée par cinq chapitres, dont les fondamentales conclusions sont exposées ci-dessous :

La première partie présente une analyse bibliographique de l'ensemble des recherches et les travaux antérieurs en axe d'approfondir dans ce domaine.

La deuxième partie présente en détail présentation de la nouvelle technique de la nanotechnologie concernant des nanoparticules et nanofluides et sa modélisation thermo physique, ainsi qu'une revue sur les notions des trois modes de transfert de chaleur et une explication sur l'état de l'art sur les capteurs solaire hybrides (PV/TH).

En se reposant dans la partie suivante, sur la modélisation mathématique et thermique décrivant notre problème ainsi les hypothèses de simplification de ce problème.

Après la création de la géométrie, maillage et condition aux limites par le logiciel ANSYS Workbench, on a validé notre procédure de simulation numérique (FLUENT),

Les résultats de simulation sont présentés pour différentes fractions volumiques et pour différents nombres de Reynolds (différentes valeurs des vitesses).

L'étude a consisté à faire varier la fraction volumique, et le nombre de Reynolds dans chaque cas et de voir l'influence de ces deux paramètres sur les champs de température et vitesse sur le nombre de Nusselt, qui caractérise le flux de chaleur transféré entre le nanofluide et le module photovoltaïque.

Cette étude nous a permis d'évaluer numériquement et d'illustrer les effets des différentes paramètres qui peuvent influencer sur les comportement thermique, dynamique par des nanofluides (fraction volumique, vitesse d'écoulement).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats principaux obtenus montrent que :

- Les nanofluides jouent un rôle important dans l'amélioration du transfert de chaleur.
- Le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules à cause de l'augmentation de la conductivité thermique cela permis d'améliorer le transfert de chaleur par conduction.
- Le facteur de frottement augmente légèrement avec l'augmentation de la fraction volumique du nanofluide.
- En général, l'augmentation de la fraction volumique des nanofluides entraîne une augmentation de la viscosité du fluide qui diminue le mouvement des fluides.
- L'augmentation de nombre de Reynolds, entraîne l'augmentation du transfert de chaleur par convection.

Finalement le flux convectif évacué par un nanofluide (Eau-Cuivre) dans la configuration en question augmente avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules et la vitesse de l'écoulement cela justifié par le nombre de Nusselt.

Références bibliographiques

- [1] Énergie Solaire, https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire ,site web consulté le 08/01/2020.
- [2] **RAMDANI Hamza**, Etude d'un Capteur Solaire Photovoltaïque/Thermique à Base de Nano-fluide, mémoire de master université de Université 8 mai 1945 Guelma,2016.
- [3]- **L.Boutina, K.Touafek ,A.Khelifa, M.Lebbi, M.T.Baissi**, Etude numérique sur l'amélioration du refroidissement d'un module photovoltaïque par l'utilisation des nanofluides,URL:https://www.researchgate.net/publication/328730191_Etude_numerique_sur_lamelioration_du_refroidissement_dun_module_photovoltaïque_par_l'utilisation_des_nanofluides consulté le 27/12/2019.
- [4] -**Ahmed Issa Abbood AL-Musawi, Amin Taheri, Amin Farzanehnia ,Mohammad Sardarabadi ,Mohammad Passandideh-Fard** ,Numerical study of the effects of nanofluids and phase-change materials in photovoltaic thermal (PVT) systems,
URL:https://www.researchgate.net/publication/329716253_Numerical_study_of_the_effects_of_nanofluids_and_phasechange_materials_in_photovoltaic_thermal_PVT_systems , consulté le 27/12/2019.
- [5]- **Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A.,**” Exergy efficiency of a solar photovoltaic array based on exergy destructions”.
- [6]-**Evola G, Marletta L.** Exergy and thermoeconomic optimization of a water-cooled glazed hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector. Sol Energy. 2014; 107:12–25. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.041>.
- [7]- **Yu B, Jiang Q, He W, Liu S, Zhou F, Ji J, et al.** Performance study on a novel hybrid solar gradient utilization system for combined photocatalytic oxidation technology and photovoltaic/ thermal technology. Appl Energy. 2018; 215:699–716. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.017> .
- [8]-**Yang X, Sun L, Yuan Y, Zhao X, Cao X.** Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T system. Renew Energy. 2018; 119:152–9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.094>
- [9]-**Dubey, S., Tiwari, G.N., 2008.** Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater. Sol. Energy 82, 602–612.
- [10]-**Joshi, A.S., Dincer, I., Reddy, B.V., 2009.** Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. Sol. Energy 83 (8), 1139–1149.

- [11]-**H. Celik, M. Mobedi, O. Manca and B. Buonomo**, "Enhancement of heat transfer in partially heated vertical channel under mixed convection by using Al₂O₃ nanoparticles", *Heat Transfer Engineering*, vol. 39 (2018), pp. 229-240.
- [12]-**M. Elmir, R. Mehdaoui and A. Mojtabi**, "Numerical simulation of cooling a solar cell by forced convection in the presence of a nanofluid", *Energy Procedia*, vol. 18 (2012), pp- 594-603.
- [13]- **M. Khentoul and R. Bessaïh.**, "Numerical Simulation of Nanofluid- Cooling Enhancement of Three Fins Mounted in a Horizontal Channel", *Journal of Heat Transfer*, vol. 138 (2016), pp- 091002.
- [14]-**I. Pishkar and B. Ghasemi**, "Cooling enhancement of two fins in a horizontal channel by nanofluid mixed convection." *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 59 (2012), pp- 141-151.
- [15]- **Parvin S, Nasrin R, Alim MA.** Heat transfer and Entropy Generation Through Nanofluid Filled Direct Absorption Solar Collector. *International Journal Heat Mass Transfer* 71(2014) PP.386–395.
- [16] **Sokhansefat T, Kasaeian AB, Kowsary F.** Heat Transfer Enhancement in Parabolic Trough Collector Tube using Al₂O₃/Synthetic Oil Nano-Fluid. *Renewable and Sustainable Energy Review* 33(2014) pp. 636–644.
- [17]-**Nasrin R, Parvin S, Alim MA.** Effect of Prandtl Number on Free Convection in a Solar Collector Filled with Nanofluid. *Procedia Engineering* 56 (2013) PP.54–62.
- [18]-**Colangelo G, Favale E, de-Risi A, Laforgia D.** Results of Experimental Investigations on the Heat Conductivity of Nanofluids Based on Diathermic Oil for High Temperature Applications. *Applied Energy* 97 (2012) PP. 828–833.
- [19]-**Al-Waeli AHA, Chaichan MT, Kazem HA, Sopian K.** Comparative study to use nano-(Al₂O₃, CuO, and SiC) with water to enhance photovoltaic thermal PV/T collectors. *Energy Convers Manag.* 2017; 148:963–73. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.072>.
- [20]-**Sardarabadi M, Passandideh-Fard M, Maghrebi M-J, Ghazikhani M.** Experimental study of using both ZnO/water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems. *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2017 ;161 :62–9. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.11.032>.
- [21]-**Al-Waeli AHA, Sopian K, Chaichan MT, Kazem HA, Ibrahim A, Mat S, et al.** Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: an experimental study. *Energy Convers Manag.* 2017 ;151 :693–708. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.032>.
- [20] **Lounes Benkezim**, « Simulation numérique de la convection naturelle d'un nanofluide dans une cavité rectangulaire », Thèse de magistère, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2013.

- [21] **REZAIGUIA Issam**, investigation des échanges convectifs dans diverses configuration, thèse de Doctorat UNIVERSITE CONSTANTIN 1, 2014.
- [22] **S.U.S. Choi**, « Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles », ASME Fluids Eng. Division 231 99–105. 1995.
- [23] **J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu, and L.J. Thompson**. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 78(6) : 718-720, (2001).
- [24] **LAMRI ZEGGAR Asma**, Contribution à l'Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nano fluide. Application aux Modèles Monophasique et Diphasique, mémoire de magister Université de Frères Mentouri, 2014.
- [25] **João-Paulo RIBEIRO, Jean-Antoine GRÜSS** « Nanofluides pour les applications thermiques » 10 juil. 2009.
- [26] **Amrid MAMMARI**, 'Amélioration des performances énergétiques des systèmes de refroidissement industriels : Application aux serveurs informatiques', Doctorat Paris Tech, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2014.
- [27] **ABDEDDAIM Amel**, Gestion des échanges thermiques des éléments électroniques, mémoire de master université de Mohamed Khider Biskra, juillet 2019.
- [28] **GLADÉS Bachir**, Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard, thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE TOULOUSE, Octobre 2010
- [29] **Y. Xuan and W. Roetzel**. Conception for heat transfer correlation of nano-fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701-3707, 2000.
- [30] **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), 151–170, 1998.
- [31] **J.C. Maxwell**. A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., 1891.
- [32] **R.L. Hamilton and O.K. Crosser**. Thermal conductivity of heterogeneous two component.
- [33] **D.A.G. Bruggeman**. *Ann. Physics (Leipzig)* 24 (1935) pp. 636
- [34] **Ould Amer Nassira. Ouadah Sabrina**, Simulation numérique d'un écoulement avec transfert de chaleur d'un nano-fluide dans un dissipateur de chaleur, mémoire de master université Mohamed Boudiaf-Mssila 2018.

- [35] **KHENTOUL Moussa**, Étude Numérique de la Convection Mixte dans un Canal Horizontal Contenant des Ailettes, Thèse de doctorat de l'université de Frères Mentouri- Constantine, 2016
- [36] **Melle Nehal Sara**, Contribution à l'étude des transferts thermiques dans les échangeurs, mémoire de master université de Université A. MIRA-BEJAIA, 2017.
- [37] **diane DUVAL**, Ailettes thermique, Institut National Des Sciences Appliquées De Rouen, Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur.2013.
- [38] **KHIDER fatma Zohra**, Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base, mémoire de master université Mohamed Boudiaf-Mssila 2016.
- [39] **SAADI SOUAD**, EFFET DES PARAMETRES OPERATIONNELS SUR LES PERFORMANCES D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN, mémoire de master université UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 2010.
- [40] **LEBBIHI Saci**, Refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nano fluide. Mémoire master, université Mohamed Khider Biskra 2014
- [41] **KAIDOUCHI Hicham**, Etude Théorique D'un capteur hybride photovoltaïque/ Thermique à eau et à air, mémoire de master université de Université 8 mai 1945 Guelma,2014.
- [42] **CHIBI Zahra**, Effet du refroidissement sur les performances des panneaux PV, mémoire de master université Abo Bekr Belkaid TLEMCEM,15 juin 2016.
- [43] **CHAWKI Mahboub**, Étude des phénomènes de transfert thermique dans les échangeurs de la chaleur destinés aux applications solaires, Thèse de doctorat de l'Université Mohamed Khider – Biskra, 05 avril 2016.
- [44] **ERRAHMANI Aziza, BEN ATHMANE Nora**, Amélioration de l'efficacité des panneaux photovoltaïques par l'installation d'un système de refroidissement par l'eau des modules PV, mémoire de master université de Université Université Ahmed Draïa Adrar, 25 juin2019.
- [45]: **Ahmed Issa Abbood AL-Musawi ,Amin Taheri ,Amin Farzanehnia ,Mohammad Sardarabadi ,Mohammad Passandideh-Fard**, Numerical study of the effects of nanofluids and phase-change materials in photovoltaic thermal (PVT) systems, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Akadémiai Kiadó , Budapest, Hungary 2018, 6 December 2018,3456789(.,-volV).URL: [https://doi.org/10.1007/s10973-018-7972-6\(0123456789](https://doi.org/10.1007/s10973-018-7972-6(0123456789).
- [47] Les coordonnées géographiques de Biskra, Algérie,URL :<https://dateandtime.info> ,consulté le 20 Avril 2020
- [48] **KHELIFA Abdelkrim**, Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT, Thèse de doctorat Université de BATNA, Soutenue le : 22Janvier 2017

Bibliographie

- [49] **Clack G. Passive**, hybrid comfort cooling by thermal radiation. In: Passive/hybrid cooling conference. Miami. 1981.
- [50] **Maifi Lyes**, Étude et modélisation d'un panneau solaire thermique photovoltaïque, Thèse de doctorat Université FRERESMENTOURI CONSTANTINE 1 , Soutenue le : 17 Décembre 2018
- [51] **GHELLAB Amel**, MODELISATION ET OPTIMISATION DES CAPTEURS SOLAIRES HYBRIDES, Thèse de doctorat Université des frères Mentouri Constantine, Soutenue le : 11 Février2018
- [52] **GUESTAL Mabrouk**, 'Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi chauffée partiellement', thèse de magistère université de Mentouri Constantine, 2010.
- [53] : Application Web, URL: <http://data.cder.dz:81/> ,Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER)-Bouzareah, consulté le 10/07/2020.
- [54]:**MOUMMI Nouredine**,Cours projet solaire « 2^{ème} année Master 2019 », université de Mohamed Khider Biskra, 2019.

Généralités sur le rayonnement solaire

1. Mouvement terrestre :

On sait tous que la terre tourne autour du soleil et que sa trajectoire est elliptique, la terre met une année ou 365 jours pour faire une tour autour du soleil et 1 jour ou 24 heures pour faire un tour sur elle même autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles est nommé l'Equateur.

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil, pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le capteur par rapport aux rayons lumineux, la connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

2. Direction du rayonnement solaire :

Pour repérer la position du soleil dans le ciel, il est utile d'utiliser

2.1 Système de coordonnées locales (coordonnées azimutales) : défini en un point de la surface terrestre (nous supposons qu'il est situé dans l'hémisphère nord). Ce trièdre est représenté sur la figure A.1, Ses axes sont définis de la façon suivante :

-OX vers le sud, OY vers l'ouest et OZ vertical du lieu, vers le haut et. La direction (OS) du soleil est repérée grâce à deux angles :

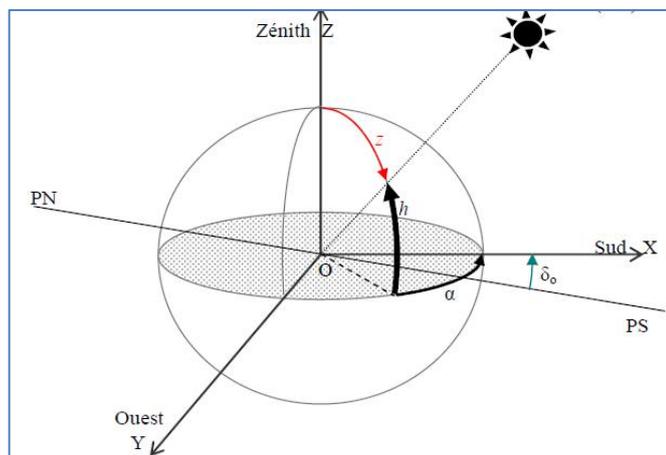


Figure A.1: Système local de coordonnées azimutales.

- a) **Sa hauteur h** : Angle compris entre l'horizon astronomique et l'axe issu du point considéré au soleil. Il est compté de 0° à 90° si le soleil se trouve dans l'hémisphère Nord (Zénith) et de 0 à -90° si le soleil se trouve dans l'hémisphère Sud (Nadir).
- b) **Son azimut α** : Angle entre la projection de la direction du soleil (OS), sur le plan horizontal et le Sud, il est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est. Les angles (h) et (α) varient au cours de la journée à cause de la rotation de la terre sur elle-même.

2.2 Système des coordonnées horaires : Le trièdre de référence de ce système est celui représenté sur la figure A.2 :

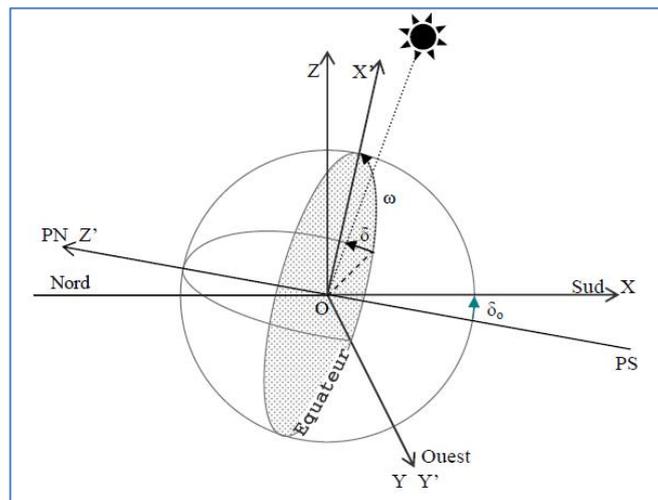


Figure A.2 : Système de coordonnées horaires.

- OX' dans le plan (OX, OZ) est perpendiculaire à OZ' .
- OY' vers l'ouest, OZ' vers le pôle nord.

Les coordonnées angulaires du soleil dans ce repère sont alors :

- a) **La déclinaison (δ)** : Angle entre la direction terre soleil et le plan équatorial de la terre ou bien la latitude du lieu où le soleil est à la verticale à midi solaire. Cet angle varie de $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver à $23^\circ 27'$ au solstice d'été et il est nul aux équinoxes. La déclinaison, qui est fonction du jour de l'année est définie par son quantième (Dj), pour le premier janvier $Dj = 1$ et ainsi de suite.

$$\sin \delta = 0.398 \sin [0.986 (Dj-82)] \quad (\text{A.1})$$

Ou bien

$$\delta = 23.45 \sin [0.986 (284 + Dj)] \quad (\text{A.2})$$

Les angles sont exprimés en degré.

b) **L'angle horaire (ω)** : entre les plans (oz' , os) et (oz' , ox')

L'angle horaire est formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu. Au midi solaire l'angle horaire (ω) est égal à 0° ensuite chaque heure correspond à 15° car la terre effectue un tour complet (360°) sur elle-même en 24 heures. L'angle (ω) est compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir. En pratique on exprime les angles (h) et (α) en fonction de la latitude du lieu, la déclinaison et l'angle horaire du soleil :

$$\sin h = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (\text{A.3})$$

2.3 Angle d'incidence du rayonnement solaire sur un plan quelconque (θ):

Pour calculer l'angle (θ) entre un rayon arrivant directement du soleil et la normale à un plan quelconque (souvent ce plan représente la face avant réceptrice du rayonnement solaire, L'orientation du capteur solaire est définie par :

- a) **L'inclinaison (i)** : Angle que fait le capteur avec le plan horizontal.
- b) **L'azimut (γ)** : Angle que fait la normale à la surface du capteur et le plan méridien. (voir figure A.3)

$$\cos \theta = \cos h \sin i \cos (A - \gamma) + \cos i \sin h \quad (\text{A.4})$$

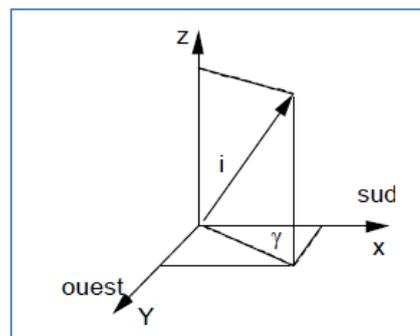


Figure A.3: Azimut (orientation) et inclinaison d'un plan quelconque.

$\gamma > 0$ Vers l'ouest, $\gamma < 0$ Vers l'est, $\gamma = 0$ Vers le sud.

L'angle θ peut être exprimé en fonction de ω , ϕ et δ

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin (\phi - i) + \cos \delta \cdot \cos (\phi - i) \cos \omega \quad (\text{A.5})$$

Au cours d'une journée (θ) est minimale au midi solaire vrai où l'angle (ω) est égal à 0° .

Angle d'inclinaison d'un Capteur Solaire :

Surface horizontale : $i = 0^\circ$; Surface verticale : $i = 90^\circ$

Sous nos latitudes, le montage de capteurs avec un angle d'inclinaison égale à cette latitude. Des inclinaisons moins fortes favorisent le gain solaire en été. Des inclinaisons plus fortes favorisent le gain solaire en hiver.

3. Les paramètres du temps :

➤ Le temps solaire vrai (TSV) :

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil w , il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{A.6})$$

ω : Est en degré.

Si $\omega = 0$, $TSV = 12\text{h.00}$.

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

➤ Le temps solaire moyen (TSM) :

Il est donné par la relation :

$$TSV - TSM = Et \quad (\text{A.7})$$

Ou :

Et : Équation de temps (**min**), elle corrige le TSV par rapport au TSM .

Elle est donnée par la relation :

$$Et = 7.89\sin(2.n) - 7.53 \cos(n) - 1.5 \sin n \quad (\text{A.8})$$

Avec :

$$n = \left(\frac{360}{365} (Dj - 81) \right) \quad (\text{A.9})$$

Dj : Le numéro du jour dans l'année.

➤ Le temps universel :

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich.

$$TU = TSM - \left(\frac{L}{15} \right) \quad (\text{A.10})$$

Ou: L est la longitude.

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

$L < 0$, pour les villes situées à l'ouest de Greenwich.

$TU = TSM$, pour le méridien de Greenwich.

4. Rayonnement solaire :

Les apportes solaire sont constitués par :

➤ Rayonnement direct :

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I . Nous désignerons par

- I l'énergie reçue (irradiation) en $W.m^{-2}.s^{-1}$ ou $KWh.m^{-2}.s^{-1}$

- I^* le flux reçu (éclairage) en $W.m^{-2}$

On peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation :

$$I^* = 1370 \exp \left[\frac{TL}{0.9+9.4 \sin(h)} \right] \quad (\text{A.11})$$

Où TL est le facteur de trouble de Linke :

$$TL = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta) \ln (P_v) \quad (\text{A.12})$$

β est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égale à :

$\beta = 0,05$ en zone rurale

$\beta = 01$ en zone urbaine

$\beta = 0,2$ en zone industrielle ou polluée

p_v est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mmHg.

Autres Modèles pour le calcul du rayonnement Solaire :

a) conditions normales par ciel clair :

$$I = 1230 \exp \left[\frac{-1}{3.8 \times \sin(h+1.6)} \right] \quad (\text{A.13})$$

b) pour un ciel très clair :

$$I = 1210 \exp \left[\frac{-1}{6 \times \sin(h+1)} \right] \quad (\text{A.14})$$

c) Pour un ciel pollué : zone industrielle.

$$I = 1260 \exp \left[\frac{-1}{2.3 \times \sin(h+3)} \right] \quad (\text{A.15})$$

➤ Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu).

Les expressions empiriques permettant d'estimer la composante du rayonnement solaire diffus sont ci- dessous :

a) Part du ciel :

*Part du ciel sur une surface horizontale :

Annexe

-par ciel clair :

$$D_{c,h} = 125. \sin(h)^{0.4} \quad (\text{A.16})$$

-par ciel très clair, on multiplie cette dernière expression par 3/4, si le ciel est couvert, on la multiplie par 4/3 .

* Part du ciel sur une surface d'inclinaison quelconque :

$$D_c(i) = D_{c,h} \frac{1+\cos i}{2} \quad (\text{A.17})$$

b) Part du sol :

$$D_s(i) = alb. \frac{1-\cos i}{2} . G \quad (\text{A.18})$$

Où : $G_h = I_h + D_h = I_{dir} \cdot \sin(h) + D_h$ et (alb) : est l'albédo ou coefficient de réflexion qui dépend de la nature du sol

Le tableau suivant donne quelques valeurs de l'albédo pour divers types de sols :

Nature du sol	Albédo (%)	Nature du sol	albédo (%)
Terre végétale sèche	10 à 25	Neige fraîche	80 à 90
Terre végétale humide	8 à 9	Béton	3 à 55
Sable sec	18 à 40	Aluminium poli	85
Sable humide	9 à 18	Eau	07
Herbe verte	15 à 26	Sol calcaire	14
Herbe sèche	19 à 32	Goudron	13
		Brique sombre	27

Tableau A.1 : Quelques valeurs de l'albédo

Annexe

Annexe B : Programme de calculer les paramètres thermo-physique du nanofluide (Eau-Cuivre) et la vitesse d'entrée du nanofluide à partir les propriétés thermo-physique qui sont calculés.

```
% -----  
% Ce programme pour calculer les propriétés thermo-physique d'un  
nanofluide  
% conductivité thermique, viscosité dynamique, masse volumique,  
chaleur  
% massique et coefficient d'expansion volumique et la vitesse d'entrée  
du  
% nanofluide à partir les propriétés thermo-physique  
%et après enregistre lesresultats dans un fichier  
'propriété_nanofluide.txt.'  
% -----  
clear all;% Effacer les variables présidents  
clc; % Effacer l'écran  
%-----  
% PARTIE (1): LES ENTRES DU PROGRAMME  
%-----  
disp('-----')  
phi=input('ENTREZ LA FRACTION VOLUMIQUE =');  
disp('-----')  
Re=input('ENTREZ REYNOLDS =');  
disp('-----')  
ks=387.6;  
kf=0.6;  
n=6;  
Uf=1.003e-3;  
rhos=8978;  
rhof=998.2;  
B=0.01;  
cps=381;  
cpf=4182;  
Bs=16.7e-6;  
Bf=210e-6;  
Dh=0.013;  
%-----  
% PARTIE (2): CALCULES LES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES DE NANOFLUIDE  
%-----  
% CALCULE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE  
% MODELE DE MAXWELL (1873)  
knf1=((ks+2*kf+2*(ks-kf)*phi)*kf)/(ks+2*kf-(ks-kf)*phi);  
% MODELE DE HAMILTON ET CROSSER (1962)  
knf2=((ks+(n-1)*kf-(n-1)*(kf-ks)*phi)*kf)/(ks+(n-1)*kf+(kf-ks)*phi);  
% MODELE YU ET CHO  
knf3=((ks+2*kf+2*(ks-kf)*((1+B)^3)*phi)*kf)/(ks+2*kf-  
(ks+kf)*((1+B)^3)*phi);  
%-----  
% CALCULE LA VISCOSITE DYNAMIQUE  
% MODELE D'EINSTEIN (1906)  
Unf1=Uf*(1+(2.5*phi));  
% MODELE DE BRINKMAN (1952)  
Unf2=Uf/((1-phi)^2.5);  
%-----  
% CALCULE LA MASSE VOLUMIQUE  
rhonf=(1-phi)*rhof+(phi*rhos);  
%-----
```

Annexe

```
% CALCULE LA CHALEUR MASSIQUE
% MODELE DU PAK ET CHO (1998)
cpnf1=(1-phi)*cpf+(phi*cps);
% MODELE DU XUAN ET ROETZEL
cpnf2=((1-phi)*(rhof*cpf)+phi*(cps*rhos))/rhonf;
%-----
% CALCULE LE COEFFICIENT D'EXPANSION VOLUMIQUE
Bnf=(1-phi)*Bf+(phi*Bb);
%-----
% PARTIE (2): CALCULES LA VITESSE D'ENTREE
V=((Re*Unf1)/(rhonf*Dh));
% -----FIN-----
```

Résumé:

Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire, une chaleur est générée ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque et causera une chute de son rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement.

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude numérique tridimensionnelle sur l'amélioration du refroidissement d'un module photovoltaïque dans un capteur solaire hybride PV/TH par l'utilisation des nanofluides, nous avons utilisé dans cette étude un logiciel de simulation numérique ANSYS Workbench qui a permis de résoudre les équations gouvernant l'écoulement convectif, on a utilisé comme fluide d'amélioration, le nano-fluide Eau-Cuivre avec différentes valeurs de fraction volumique ($\Phi=0.1, 0.2$ et 0.5), et pour différentes valeurs du nombre de Reynolds ($Re= 50, 100, 300$ et 500).

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules provoque une augmentation dans la conductivité thermique de fluide de refroidissement par conséquent l'amélioration de transfert de chaleur par conduction ; d'autre part l'augmentation de nombre de Reynolds provoque une augmentation du transfert de chaleur par convection et par conséquent l'amélioration du taux de transfert de chaleur dans le capteur solaire hybride PV/TH.

Mots clés : *Nanofluide, Capteur solaire Hybride PV/TH, Module Photovoltaïque, Transfert de chaleur, Convection mixte, Fluent.*

ملخص:

أثناء التحويل الكهروضوئي للمجمع الشمسي ، يتم توليد الحرارة التي تزيد من درجة حرارة الخلية الكهروضوئية وتسبب انخفاضاً في كفاءتها. هذه الظاهرة ناتجة عن جزء من الإشعاع الشمسي لا تمتصه الخلايا والذي سيكون سبب تسخينها .

في هذه الرسالة ، أجرينا دراسة رقمية ثلاثية الأبعاد حول تحسين تبريد الوحدة الكهروضوئية في مجمّع شمسي هجين PV / TH باستخدام السوائل النانوية ، واستخدمنا في هذه الدراسة برنامج محاكاة عددية *ANSYS Workbench* مما جعل من الممكن حل المعادلات التي تحكم تدفق الحمل الحراري ، استخدمنا السائل النانوي المائي والنحاسي بقيم مختلفة لكسر الحجم ($\Phi = 0.1$ و 0.2 و 0.5) ، ولقيم مختلفة من رقم رينولدز ($Re = 50$ و 100 و 300 و 500). أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الزيادة في حجم الجسيمات النانوية تؤدي إلى زيادة في التوصيل الحراري لسائل التبريد وبالتالي تحسين نقل الحرارة بالتوصيل ؛ من ناحية أخرى ، تؤدي الزيادة في عدد رينولدز إلى زيادة في نقل الحرارة بالحمل الحراري وبالتالي تحسن في معدل انتقال الحرارة في المجمع الشمسي الهجين PV / TH .

الكلمات المفتاحية: الموائع النانوية ، المجمع الشمسي الهجين PV / TH ، الوحدة الكهروضوئية ، نقل الحرارة ، الحمل الحراري المختلط ، *Fluent* .

Abstract:

During the photovoltaic conversion of the solar collector, heat is generated which will increase the temperature of the photovoltaic cell and cause a drop in its efficiency. This phenomenon is due to the part of the solar radiation not absorbed by the cells and which will be the cause of its heating.

In this thesis, we carried out a three-dimensional numerical study on the improvement of the cooling of a photovoltaic module in a hybrid PV / TH solar collector by the use of nanofluids, we used in this study a numerical simulation software ANSYS Workbench which made it possible to solve the governing equations the convective flow, we used as improvement fluid, the Water-Copper nano-fluid with different values of volume fraction ($\Phi = 0.1, 0.2$ and 0.5), and for different values of Reynolds number ($Re = 50, 100, 300$ and 500).

The results obtained show that the increase in the volume fraction of the nanoparticles causes an increase in the thermal conductivity of the cooling fluid consequently the improvement of heat transfer by conduction; On the other hand, the increase in Reynolds number causes an increase in heat transfer by convection and therefore an improvement in the rate of heat transfer in the PV / TH hybrid solar collector.

Keywords: *Nanofluid, Hybrid PV / TH solar collector, Photovoltaic module, Heat transfer, Mixed convection, Fluent.*