

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

OUADADI Noreddine & MORECHTA
Mohamed Lamine

Thème

ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS UNE CAVITE REMPLIE DE NANOFLUIDE D'UN PANNEAU SOLAIRE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
M ^{elle} IHADDADENE Razika	MCA	Président
M ^{me} BENKHERBACHE Souad	MCA	Encadreur
M ^{me} BECHENE Leila	MAA	Examineur

DEDICACES

Je Dédie ce modeste Travail :

➤ *A mes parents.*

) *A mes frères et mes sœurs.*

) *A toute ma famille et à mes amis.*

Ouadadi Nourdine

REMERCIEMENTS

Louanges à ALLAH, qui nous a guidées sur le droit chemin tout au long de nos études et nous a aspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

Nos plus sincères remerciements et nos remerciements les plus chaleureux à notre encadrant, Mme Ben Kherbache Souad, pour nous avoir soutenu et guidé tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous la remercions également pour sa présence constante, ses conseils efficaces et ses idées originales qui ont contribué à enrichir cette thèse.

Nous tenons également à remercier Melle Ihaddadene Razika et Mme Bechene Leila, pour leur participation à l'évaluation de ce travail.

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

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Nomenclature.....	v
Liste des figures	vii
Liste des Tableaux.....	x
Introduction Générale.....	1

Chapitre I: Etude Bibliographique

I.1 Introduction.....	3
I.2 Le soleil	3
I.3 La constante solaire	3
I.4 Les temps solaires	4
I.4.1 Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)	4
I.4.2 Le Temps Solaire Moyen (TSM)	4
I.5 Rayonnement solaire	4
I.6 Gisement solaire.....	5
I.7 Gisement solaire au sol	6
I.8 Le gisement solaire en Algérie	6
I.9 Différents types d'énergies solaires.....	9
I.9.1 L'énergie solaire photovoltaïque :	9
I.9.1.1 Principe de conversion	9
I.9.1.2 Technologie utilisée	10
I.9.1.3 Les différents types de cellules photovoltaïques :	10
I.9.1.3.1 Siliciummonocristallin :	10
I.9.1.3.2 Silicium poly cristallin :	11
I.9.1.3.3 Silicium amorphe :	11
I.9.1.4 Les Avantage et les inconvénients des cellules photovoltaïques	13
I.9.2 L'énergie solaire thermique	13
I.9.2.1 Principe de fonctionnement	13
I.10 Les capteurs solaires de type plan	14
I.10.1 Les capteurs non-vitres « ou capteur moquette ».....	14
I.10.2 Les capteurs vitres	15
I.10.3 Les capteurs sous vides	16
I.11 Les capteurs solaires concentrateurs	16

Sommaire

I.11.1 Les centrales cylindro-paraboliques.....	16
I.11.2 Les centrales à tour.....	17
I.11.3 Les concentrateurs paraboliques.....	19
I.12 Capteurs solaires hybrides.....	19
I.12.1 Importance des panneaux solaires	20
I.13 Méthode de refroidissement des panneaux solaires	21
I.14 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire	22
I.14.1 La conduction.....	23
I.14.2 La convection.....	24
I.14.3 Le rayonnement	25
I.15 Notions sur la convection	25
I.15.1 Type de convection	26
I.16 Convection naturelle.....	26
I.17 Les nombres adimensionnels	6
I.17 Conclusion	30

Chapitre II :les Nano fluides

II.1 Généralités sur les nanofluides	30
II.2 Types de nanoparticules	30
II.3 Fabrication et préparation des nanofluides	31
II.4 Les applications des nanofluides (Soufi, 2013)	33
II.5 Les avantages et les inconvénients.....	34
II.5.1 Les avantages des nanofluides	33
II.5.2 Les inconvénients des nanofluides	34
II.6 Caractéristiques thermophysiques des nanofluides.....	34
II.6.1 La Masse volumique	34
II.6.2 Viscosité dynamique des nanofluides	36
II.6.2.1 Les différents modèles de viscosités	36
II.6.2.1.1 Modèles d'Einstein et Modèles Brinkman	37
II.6.2.1.2 Modèle de Batchelor	38
II.6.3 Conductivité thermique des nanofluides.....	38
II.6.3.1 Modèles des conductivités thermiques	39
II.6.3.2 Modèles de type Maxwell	39
II.6.3.2.1 Modèle de Maxwell.....	39

Sommaire

II.6.3.2.2 Modèle de Hamilton-Crosser	40
II.6.3.2.3 Modèle de Yu et Choi	41
II.6.3.2.4 Modèle de Bruggeman.....	41
II.6.4 La chaleur spécifique	42
II.6.5 Le coefficient d'expansion thermique	43
II.7 L'utilisation des nanofluides dans l'amélioration du transfert thermique	44
II.7.1 Synthèse bibliographique sur la convection dans les nanofluides	44
II.8 Revue bibliographique sur l'application des nanofluides dans les collecteurs solaires	48
II.9 Conclusion	50

Chapitre III : Formulation Mathématique et Procédures de Simulation

III.1 Introduction	51
III.2 Géométrie du problème	51
III.3 Hypothèses	52
III.4 Equations générales de conservation	53
III.5 Equation représentatives pour le nanofluide	54
III.6 Modèle de transfert radiatif de Rosseland.....	56
III.6.1 Equation de modèle Rosseland.....	56
III. 7 Bilan thermique du capteur hybride PV/T à base	56
III. 8. Les coefficients des échanges thermiques :	59
III.9 Procédures de Simulations	61
III.10 Présentation des logiciels Gambit et Fluent	61
III.10.1 Préprocesseur Gambit.....	61
III.10.2 Code Fluent	62
III.10.2.1 Les avantages de fluent(CFD)	62
III.11 Etapes principales de simulation	63
III.12Démarrage de Gambit	63
III.12.1 Construction de la géométrie	64
III.12.2 Conditions aux limites et définition de domaines	67
III.12.3 Exportation du maillage de Gambit	68
III.12.4 Types des fichiers qui sont créés par gambit.....	69
III.13 Simulation sous FLUENT	69

Sommaire

III.13.1 Démarrage de Fluent	69
III.13.2 Importation de la géométrie (*.msh)	70
III.13.3 Vérification du maillage importé	71
III.13.4 Lissage du maillage (Smooth and swap the grid)	71
III.13.5 Vérification de l'échelle	72
III.13.6 Présentation de la géométrie.....	72
III.13.7 Choix du solveur	73
III.13.8 Autorisation du transfert de chaleur	73
III.13.9 Choix du type d'écoulement	74
III.13.10 Choix du modèle de rayonnement.....	74
III.13.11 Définir la position pour le calcul solaire	75
III.13.12 Définir les propriétés des matériaux	75
III.13.13 Définir les conditions aux limites.....	75
III.13.14 Les facteurs de sous- relaxation	76
III.13.15 Initialisation du calcul.....	77
III.13.16 Choix du résidu	78
III.13.17 Calcul	78
III.13.18 Visualisation des résultants	79
III.13.19 Sauvegarde de fichier.....	79
III.14 Conclusion	79

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction	80
IV.2. Propriétés physiques	80
IV.3 Choix du maillage	82
IV.4 Variation des Champs de température.....	83
IV.5 Variation des champs de vitesse	85
IV.6 Le nombre de Nusselt Nu	87
Conclusion Générale.....	88
Références.....	89

Nomenclature

C_p : la chaleur massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$).

g : Accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$).

Gr : Nombre de Grashof.

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

k : La conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

L : Longueur de cavité (m).

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

m : La masse (Kg).

Q : flux de chaleur exprimée en (W).

A : Aire de la section perpendiculaire au flux de chaleur, exprimée en (m^2).

Q : la chaleur transmis par rayonnement.

T : Température du corps en kelvin.

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

p : pression du fluide (Pa).

T_s : La température de la paroi.

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

k_n : La conductivité thermique du nanofluide.

M_v : Masse du vitrage, (kg).

C_p : Chaleur spécifique du vitrage, ($J/kg.K$).

A_v : Surface de la vitre, (m^2).

P_v : Quantité d'énergie absorbée pour le vitrage, (W/m^2).

h_v : Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'ambiance, ($W/m^2.K$).

h_r : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel, ($W/m^2.K$).

h_p : Coefficient d'échange thermique par conduction entre la vitre et la Pvc, ($W/m^2.K$).

T_a : Température ambiante (K).

T_{Pvc} : Température de la Pvc, (K).

T_{ciel} : Température du ciel (K).

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

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

Nomenclature

A_{Pvc} : Surface de la Pvc, (m²)

h_c : Coefficient d'échange thermique par conduction, (W/m².K)

C_p eau : Chaleur spécifique du fluide, (J/ kg.K)

A_f : Surface traversée par le fluide,(m²)

m : Débit massique de l'eau, (kg/s).

e :Epaisseur de la paroi,(m)

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

Ra : Nombre de Rayleigh

T : la température (°C) ou (K)

u, v, w :Composantes de la vitesse dans les directions x,y, z (m.s-1)

Symbole Grecque :

α La diffusivité thermique (m².s-1)

β Coefficient d'expansion thermique (K-1)

T La différence de température

φ La fraction volumique

θ Température adimensionnell

μ La viscosité dynamique (N.s.m-2)

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

ϑ La viscosité cinématique (m².s-1)

ρ La densité (Kg.m-3)

ϵ_p : Facteur d'émissivité du corps.

σ : Constante de Stephan- Boltzman. = 5.66 10-8en J/s m²k⁴.

α_v Représente le coefficient d'absorption du vitrage

Indice :

c : Chaud

f Froid.

f :Fluide de base.

n :Nanofluide.

s :Particules solide.

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I.1 : Le soleil	3
Figure I.2 : Les composants du rayonnement solaire	5
Figure I.3 : Irradiation globale (W/m ²) au sol	6
Figure I.4 : Carte du monde de l'enselement moyen annuel	7
Figure I.5 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.	8
Figure I.6 : Répartition territoriale des stations météorologiques en ALGERIE	8
Figure I.7 : Différents types d'énergies solaires.	9
Figure I.8 : Principe de Conversion de l'Energie Solaire.	10
Figure I.9 : Composant d'un système thermique	14
Figure I.10 : Capteur solaire non-vitres	14
Figure I.11 :Capteur solaire vitré	15
Figure I.12 : Capteur solaire sous vide	16
Figure I.13 : Exemple de concentrateur cylindro-paraboliques	17
Figure I.14 : Principe de fonctionnement d'une centrale à tour	18
Figure I.15 : La première centrale expérimentale à tour, Thémis (France).	18
Figure I.16 : Principe de fonctionnement de concentrateurs paraboliques	19
Figure I.17 : La Configuration Etudiée par Mohammed Ould Sid Ahmed (Master Juin 2015 Université de Guelma).....	20
Figure I.18 : Illustration du panneau PV refroidi par ruissellement d'eau sur sa face avant.	22
Figure I.19 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.	23
Figure I.20 : Schéma du transfert de chaleur par conduction	23
Figure I.21 : Schéma du transfert de chaleur convectif	24
Figure I.22 : Schéma du transfert de chaleur radiatif [4]	25

Chapitre II : les Nano fluides

Figure II.1 : Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone Bang et Chang, 2005)	31
Figure II.2 : Procédé de synthèse de nano fluide en une seule étape (Ribeiro et Gruss 2009)	33

Chapitre III : Formulation Mathématique et Procédures de Simulation

Figure III.1 : Vue de face de la configuration étudiée	52
Figure III.2 : Lancement du Gambit.	64

Figure III.3 : Les opérations pour construire une géométrie.	65
Figure III.4 :la Forme géométrique.	66
Figure III.5 :Maillage de géométrie.	66
Figure III.6 : Conditions aux limites.	67
Figure III.7 :Conditions aux limites.	68
Figure III.8 : Exportation du maillage.	69
Figure. III.9 :Vue globale de Fluent.	70
Figure. III.10 :Importation de la géométrie.	10
Figure. III.11 : vérifier la qualité de maillage.	72
Figure. III.12 : vérification de l'échelle.....	72
Figure. III.13 :Affichage de la grille et vérification des conditions.	73
Figure. III.14 :Choix de solveur.	73
Figure. III.15 :Autorisation l'équation de l'énergie.	73
Figure. III.16 :Choix du type d'écoulement.	74
Figure. III.17 : Choix du modèle de rayonnement	74
Figure. III.18 : Calculs solaires.....	75
Figure. III.19 : Définir les propriétés physiques des matériaux.	75
Fig. III.20 : Choix de la pression de référence.....	76
Figure. III.21 : Valeurs des conditions aux limites.	76
Figure.III.22 : Choix des facteurs de sous relaxation et les schémas de discrétisation	77
Figure. III.23 : Initialisation de la solution.	77
Figure.III.24 :Choix des résidus.	78
Figure. III. 25 :Choix des nombres des itérations.	78
Figure. III.26 : Allure de l'évolution des résidus de calcul.	78

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1 : Variation du nombre de Nusselt en fonction des nombres de nœuds	83
Figure IV. 2 : Les contours de la température pour l'eau dans un panneau PV/T =0	84
Figure IV.3 : Variation des contours de température pour, le nanofluide cuiver Cu(=0.02)	84
Figure IV.4 : Variation des contours de température pour, le nanofluide cuiver Tio2(=0.02)	85
Figure IV.5 : Profils de température des éléments du panneau solaire.....	85
Figure IV.6 :Variation de vitesse pour l'eau	86
Figure IV.7 : champs de vitesse pour l'eau	86

Figure IV.8: Variation de vitesse le nanofluide eau/Tio ₂	86
Figure IV.9 : Variation de vitesse le nanofluide eau/Cu	87
Figure III.10: Variation de nombre de Nusselt (eau/Tio ₂)et (eau/Cu) en fonction de concentrations	87

Liste des tableaux

Chapitre I : Etude bibliographique

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	7
Tableaux I.2 : Comparaison des trois principales technologies de cellule photovoltaïque	12
Tableau I.3 : Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques [9].	13

Chapitre II : les Nano fluides

Tableau II.1 : Rapport des masses volumiques des différentes nano fluides en fonction de la fraction volumique	36
---	----

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableaux IV.1 : propriétés thermo physique des fluides de base et des particules solide.	80
Tableaux IV.2 : propriétés thermo physique du nano fluide (l'eau/Cu).	81
Tableaux IV.3 : propriétés thermo physique du nano fluide (l'eau/TiO ₂).	81
Tableau IV.4 : Paramètres utilisés dans les simulations.	81
Tableau IV.5 Variation du nombre de Nusselt en fonction des nombres de nœuds	82

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

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

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

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

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

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

Etant donné qu'une partie large des études d'optimisation se fondent sur la modélisation du comportement thermique des systèmes solaires dont certains phénomènes de transfert thermique n'ont pas encore été bien examinés, notre premier objectif porte sur l'étude de l'influence de certains paramètres sur le transfert de la chaleur au sein d'un capteur solaire

photovoltaïque hybride fonctionnant avec une cellule photovoltaïque et un absorbeur à tube contenant un fluide qui est l'eau ensuite un nanofluide .

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit :

- Le premier chapitre, présente une recherche bibliographique sur les énergies renouvelables et des différents systèmes solaires à savoir, les panneaux solaires thermiques, photovoltaïques et hybrides.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons des généralités sur les nanofluides, leurs différents types, les méthodes de préparation de ces derniers ainsi que les modèles des propriétés thermo physiques élaborés dans la littérature.
- Le troisième chapitre est réservé à la formulation mathématique des équations mathématiques gouvernant le phénomène puis la présentation des outils de simulation Gambit et Fluent.
- Le quatrième chapitre, regroupe l'ensemble des résultats de simulations.
- Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion qui généralise les résultats obtenus.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

Chapitre I

Etude Bibliographique

I.1 Introduction

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est d'énergie électromagnétique transmise par le soleil et qui est générée par la fusion nucléaire. Elle est à l'origine de toute forme de vie terrestre. L'énergie solaire est plusieurs milliers de fois plus importante que toutes les énergies cumulées utilisées par le monde entier. Le rayonnement lumineux et la chaleur du soleil sont utilisés par les humains depuis l'Antiquité, ce qui a abouti à une série de technologies qui n'ont cessé de se développer [1].

Cette énergie peut être exploitée sous deux formes : énergie solaire thermique et photovoltaïque.

I.2 Le soleil

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

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments, Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à 4×10^{26} W.

Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7 \times 10^{17}$ W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation précipitation de l'atmosphère. [2].



Figure I.1 : Le soleil

I.3 La constante solaire

La valeur du rayonnement solaire "I_C", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne "I₀" appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m⁻². En première approximation, on peut calculer la valeur de "I_C" en fonction du numéro du jour de l'année "n_j" par la relation suivante [3] :

$$I_C = I_0 [1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times n_j)] \quad (\text{I.1})$$

I.4 Les temps solaires

I.4.1 Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

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

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{I.2})$$

I.4.2 Le Temps Solaire Moyen (TSM)

Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, Il est donné par la relation suivante [4]:

$$\text{TSM} = \text{TSV} - E_t \quad (\text{I.3})$$

$$E_t \quad (\text{I.4}) = 9.87 \sin \left[2. \frac{360}{365} (N - 81) \right] - 7.53 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] - 1.5 \sin \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right]$$

E_t : est l'équation du temps exprimée en minutes.

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

I.5 Rayonnement solaire

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m² (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global

au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus, l'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

Rayonnement direct : Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.

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). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

Rayonnement global : Le rayonnement global est la somme des rayonnements diffus et direct.

$$G_{\text{global}} = G_{\text{dir}} + G_{\text{dif}} \quad (\text{I.5})$$

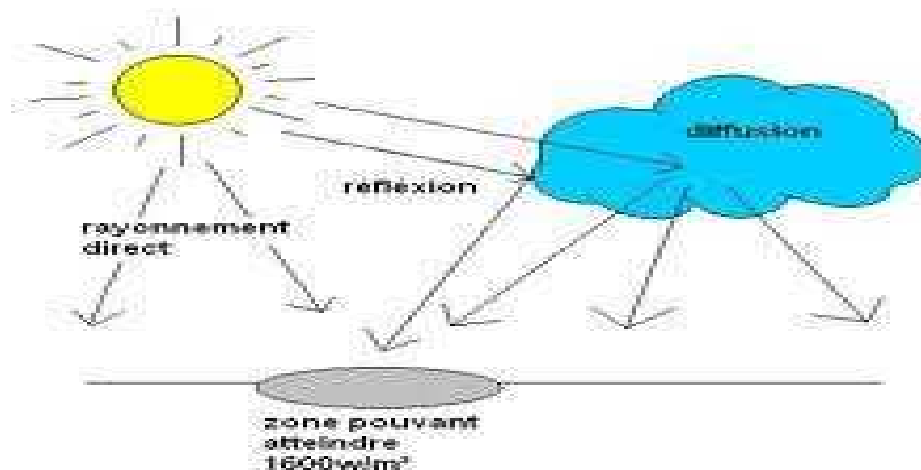


Figure I.2 : Les composants du rayonnement solaire

I.6 Gisement solaire

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

d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances.

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

I.7 Gisement solaire au sol

Le gisement solaire au sol est très variable comme présenté sur la figure 1.5. Nous constatons une variabilité importante les jours nuageux (1) par rapport aux jours avec éclaircies (2) et les jours de soleil (3). L'irradiation du soleil les jours nuageux est environ 200W/m^2 alors qu'elle est de 1000W/m^2 pour les jours ensoleillés. La présence de nuages modifie sensiblement l'importance des rayonnements du soleil, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant [6]

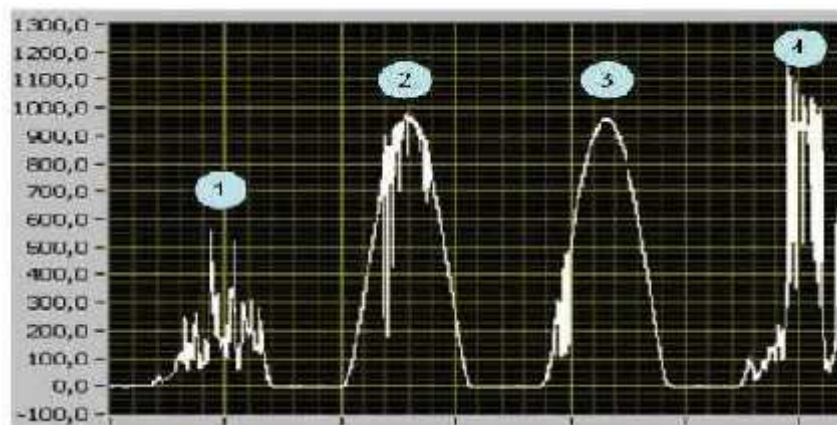


Figure I.3 : Irradiation globale (W/m^2) au sol

I.8 Le gisement solaire en Algérie

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

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la (figure I.4)

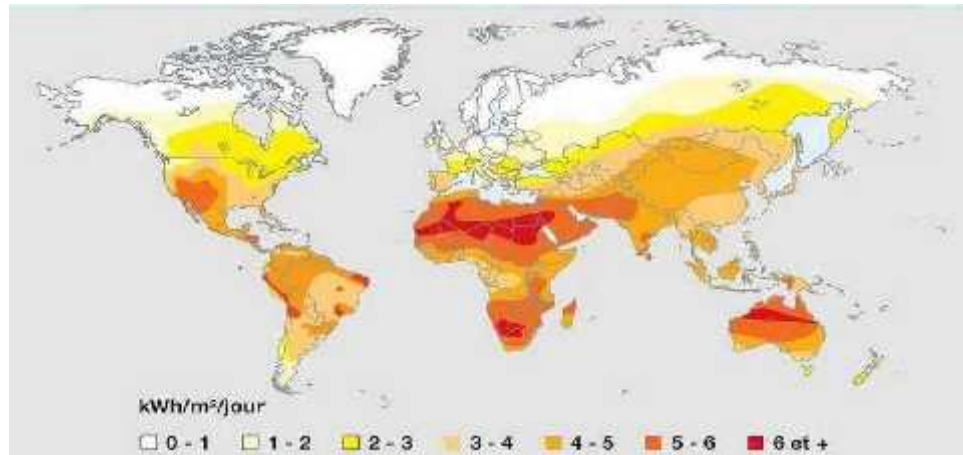


Figure I.4: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000TWh / an pour le solaire thermique, 13,9TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10grands gisements de gaz naturel qu'auraient été découverts à HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau selon l'ensoleillement reçu annuellement [8]

Régions	Régions côtières	Haut plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

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

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [8].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

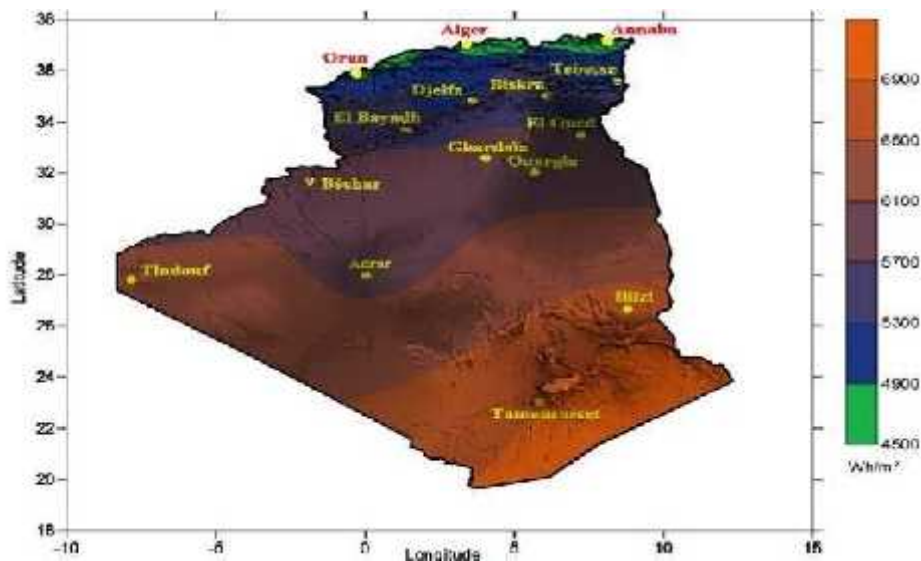


Figure I.5 : Moyenne annuelle de l’irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l’office national de la météorologie (O N M) réparties sur tout le territoire algérien [9]. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d’un tel appareillage. La durée d’insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre [10].

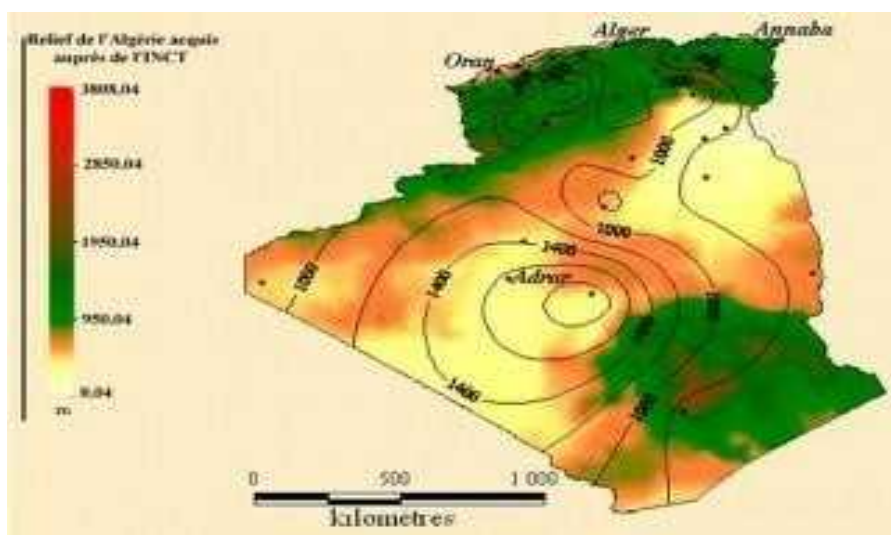


Figure I.6 : Répartition territoriale des stations météorologiques en ALGERIE

I.9 Différents types d'énergies solaires

L'énergie transportée par le rayonnement solaire peut être exploitée par différentes technologies selon l'usage final recherché (Figure I.7). Les technologies solaires photovoltaïques transforment ce rayonnement directement en électricité tandis que les technologies solaires thermiques exploitent l'énergie calorifique que ce rayonnement crée dans des matériaux l'ayant absorbé. [11]

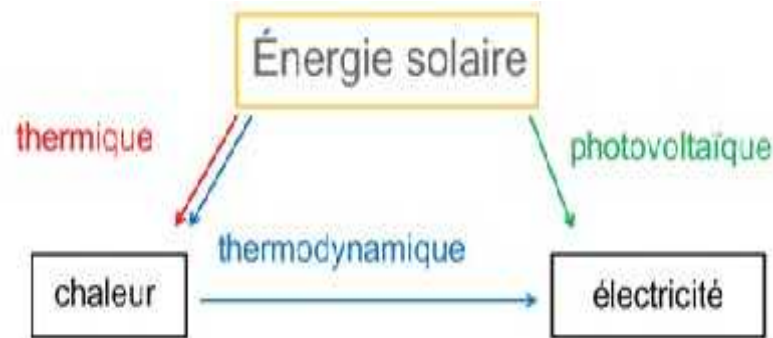


Figure I.7 : Différents types d'énergies solaires.

I.9.1L'énergie solaire photovoltaïque :

Le terme "photovoltaïque" réunit la notion de lumière (photos en grec) et de tension électrique (mesurée en volt). Il désigne un dispositif capable de produire de l'électricité sans bruit, sans pollution et sans aucun combustible.

I.9.1.1Principe de conversion

Le photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque. Dès que la lumière percute un matériau comme le silicium, la conversion d'énergie fait intervenir trois phénomènes physiques intimement liés et simultanés : – l'absorption de la lumière dans le matériau ; – le transfert d'énergie des photons aux champs électriques ; – la collecte des charges. Le silicium constitue un matériau photovoltaïque performant : il présente des propriétés optiques et électriques spécifiques pour assurer la conversion photovoltaïque.

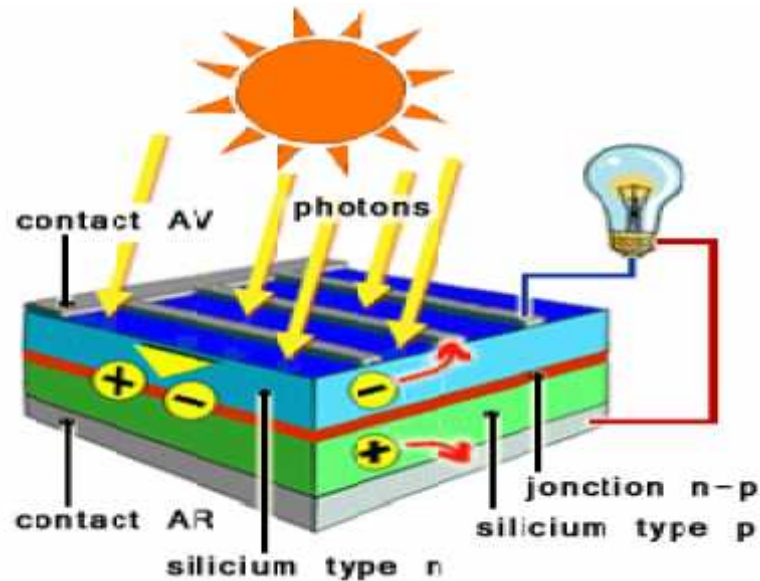


Figure I.8 : Principe de Conversion de l'Energie Solaire.

I.9.1.2 Technologie utilisée

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour réaliser des cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents. Les principales technologies industrialisées en série à ce jour sont le silicium mono- ou poly cristallin et le silicium en couche mince. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Pour le rendre opérationnel, il doit subir au préalable une série de traitements : – un procédé de raffinage permettant la réduction du silicium, procédé dit métallurgique pour le rendre pur à 99 % ; – suivi d'une seconde purification chimique pour lui donner toutes les qualités électroniques nécessaires.

I.9.1.3 Les différents types de cellules photovoltaïques :

I.9.1.3.1 Silicium monocristallin :

C'est un matériau de très haute pureté, qui est obtenu par des procédés industriels tels que le tirage Czochralski (CZ) « est un procédé de croissance de cristaux monocristallins de grande dimension » [7] ou la purification par fusion de zone (FZ), le produit fini se présente sous la forme de lingots qu'il faut ensuite découper en plaquettes de 300 μ m. C'est un matériau qui présente d'excellentes qualités électroniques et permet la fabrication de cellules à haut rendement (15-18%), mais il est très coûteux. La part du marché du silicium monocristallin est de moins en moins importante (33,6% actuellement) [8].

I.9.1.3.2 Silicium poly cristallin :

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.

I.9.1.3.3 Silicium amorphe :

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [9].

La technologie des types de cellules photovoltaïques elles représenté sur le tableau si dessus :

Technologie	Monocristallin	Poly cristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> - Très bon rendement : 14 à 20 %. - Durée de vie : importante (30 ans) - Coût de fabrication : élevé. - Puissance : 100 à 150 Wc/m². 7 m²/kWc. - Rendement faible sous un faible éclairement. - perte de rendement avec l'élévation de la température. - Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal - Couleur bleue uniforme 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement : 11 à 15 %. - Durée de vie : importante (30 ans) - Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins - Puissance : 100 W/m². °C 8 kW / m². °C - Rendement faible sous un faible éclairement. - perte de rendement avec l'élévation de la température. - Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. - Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible : 5 à 9 %. - Durée de vie : assez importante (20 ans) - Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies - Puissance : 50 Wc/m². 16 m²/kWc. - Fonctionnement correct avec un éclairement faible. - Peu sensible aux températures élevées. - Utilisables en panneaux souples. - Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. - Rendement faible en plein soleil. - Performances diminuant avec le temps. - Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Part de marché	43%	47%	10%

Tableaux I.2 : Comparaison des trois principales technologies de cellule photovoltaïque.

I.9.1.4 Les Avantages et les inconvénients des cellules photovoltaïques

Type	Silicium mono Cristallin	Silicium poly Cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	Plus de 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffusion
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffusion (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffusion (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil

Tableau I.3: Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques [9].

I.9.2 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est principalement utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage d'habitations ou de piscines. Les capteurs solaires plans sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique.

I.9.2.1 Principe de fonctionnement

Il existe deux types de capteurs solaires thermiques : les capteurs qui utilisent un liquide (eau ou antigel) comme fluide caloporteur, et ceux à air, qui utilisent l'air comme fluide caloporteur. Dans ces deux catégories, il y a deux familles :

Les capteurs plans : le fluide passe dans un serpentin sous une vitre ; ils sont peu coûteux, fonctionnent avec un bon rendement, surtout pendant l'été.

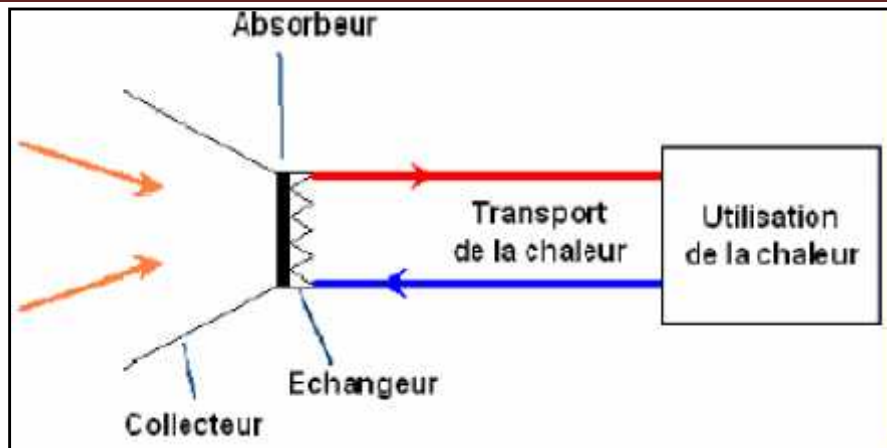


Figure I.9 : Composant d'un système thermique

I.10 Les capteurs solaires de type plan

Ils sont le plus couramment utilisés. Ils se composent d'un absorbeur situé dans un coffrage isolé en face arrière et constitué d'un vitrage en face avant. Cet absorbeur possède une couche sélective qui augmente la captation de l'énergie solaire tout en limitant les pertes par rayonnement. Le vitrage quant à lui évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent et crée un effet de serre qui augmente le rendement du capteur. L'isolation à l'arrière du capteur diminue les pertes de chaleur.

Il existe trois familles dans les capteurs plans :

I.10.1 Les capteurs non-vitres « ou capteur moquette »

Ils sont constitués de tubes noirs accolés en plastique dans les quels circule l'eau du circuit de filtration comme indiqué sur la (figure I.10). Ils présentent les avantages suivants :

- Très bon rendement à température ambiante
- Température en sortie peu élevée ($\approx 40^{\circ}\text{C}$)
- Appliqués au chauffage des piscines.

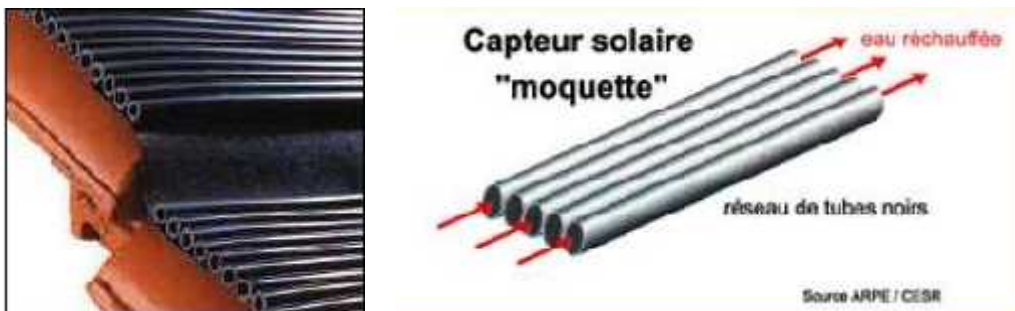


Figure I.10 : Capteur solaire non-vitres

I.10.2 Les capteurs vitrés

L'utilisation du vitrage permet de créer un effet de serre. La vitre transmet le rayonnement solaire mais pas celui émit par l'absorbeur. Les pertes thermiques par rayonnement et par convection du capteur sont réduites. Un exemple illustratif de ce type de capteur est donné sur la (figure I.11). Les composants de ce capteur présentent les caractéristiques suivantes :

- Absorbeur
- Forte absorptivité au rayonnement solaire.
- Faible émissivité.
- Forte conductivité thermique.
- Cuivre, Aluminium, Acier.
- Couverture
- Importante pour réduire les pertes.
- Verre voire polycarbonate (90 %).
- Simple, double voire triple vitrage pour les sites en climat froid.
- Isolant
- Laine minérale, mousses de polyuréthane.
- Tubes
- Fortement conducteurs de chaleur pour assurer l'évacuation de l'énergie et éviter la surchauffe inoxydable.

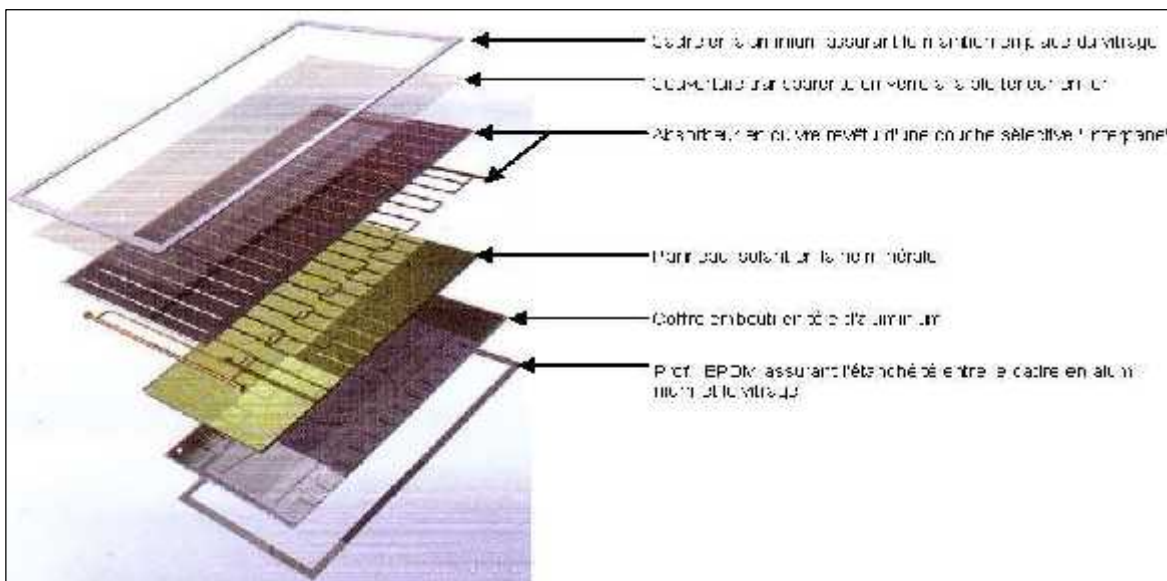


Figure I.11: Capteur solaire vitré

I.10.3 Les capteurs sous vides

Les capteurs solaires thermique sous vide sont composés 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 et 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.

Les capteurs sous vide présentent les caractéristiques suivantes :

- Meilleur rendement que les précédents ;
- Température plus élevées en sortie ;
- Tubes de 5 à 15 cm de diamètre ;
- Pression : $< 10^{-3}$ Pa ;
- Nombreuses innovations.



Figure I.12 : Capteur solaire sous vide

I.11 Les capteurs solaires concentrateurs

Un capteur à concentration est un capteur solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture. Il y a trois grandes familles de technologie de concentration solaire.

I.11.1 Les centrales cylindro-paraboliques

Sont les plus développées et dominent clairement le marché. Dans ce genre de systèmes, la concentration du rayonnement sur un seul foyer permet d'obtenir une haute température.

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques (Figure I.13), qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal dans lequel circule un fluide caloporteur (généralement une huile synthétique). Les tuyaux étant noirs, ils absorbent toute la chaleur du soleil et permettent à la température du fluide de monter jusqu'à 500° C. La chaleur ainsi récupérée produit de la vapeur via un échangeur, la vapeur qui actionne des turbines et qui produisent de l'électricité. Certaines centrales sont désormais capables de produire de l'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage de la chaleur. Si ce n'est pas le cas, une partie annexe de la centrale prend le relais et produit de l'électricité en brûlant des carburants traditionnels (gaz, charbon...) une fois le soleil couché.

La plus grande centrale solaire de ce type est la centrale NOOR du Maroc, situé à Ouarzazate. Cette usine est capable de fournir une puissance 160 MW.



Figure I.13 : Exemple de concentrateur cylindro-paraboliques

I.11.2 Les centrales à tour

Le principe des centrales à tour est des héliostats au sol réfléchissent les rayons du soleil vers une chaudière en haut d'une tour où un liquide (généralement du sel fondu) est chauffé jusqu'à 2000°C, comme indiqué sur la (figure I.14). Ce liquide porte ensuite à ébullition de l'eau dont la vapeur actionne des turbines et produit de l'électricité.

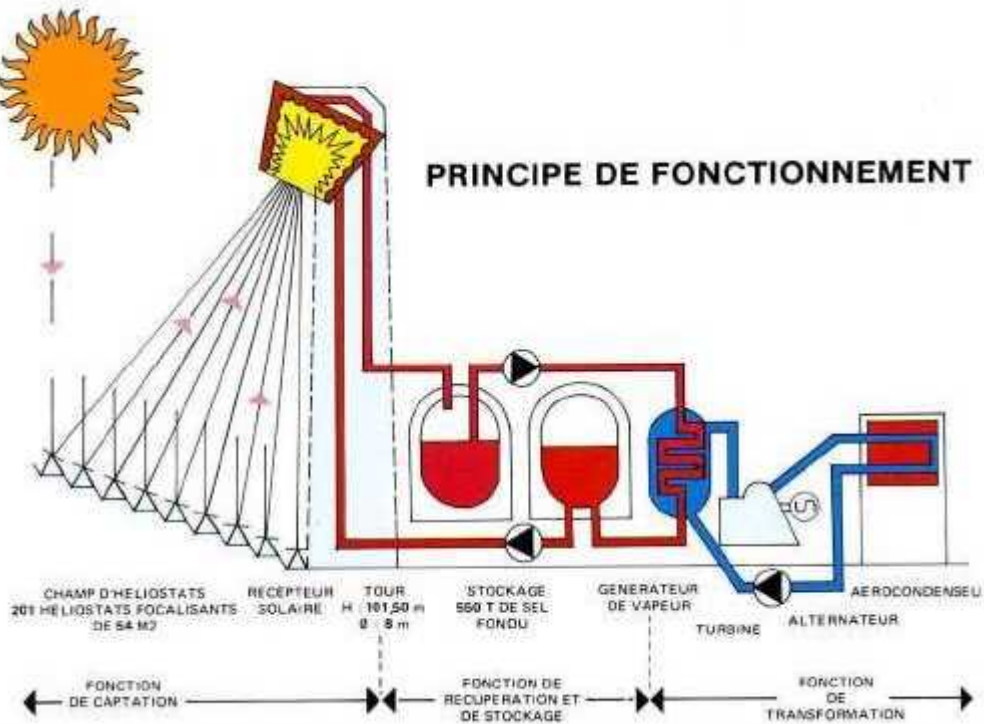


Figure I.14 : Principe de fonctionnement d'une centrale à tour

On dénombre aujourd'hui dans le monde plusieurs vingtaines de centrales à tour, et c'est pour le moment la manière la plus répandue de produire de l'électricité grâce au solaire thermique. La centrale à tour Thémis (France) présente un exemple que nous avons tenu à traiter est celui de la centrale à tour Thémis.



Figure I.15 : La première centrale expérimentale à tour, Thémis (France).

I.11.3 Les concentrateurs paraboliques

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur « Stirling » au foyer de la parabole. Le tout pivote sur 2 axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante. Des exemples de ce type de concentrateurs sont illustrés sur (la figure I.16). Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue entre 500 et 1000°C. Ainsi, la chaleur du soleil fait travailler un fluide comprimé afin de générer de l'électricité.

Chaque capteur est en fait une mini-centrale, qui produit de l'électricité de manière autonome ; l'association de plusieurs collecteurs paraboliques permet d'augmenter la puissance finale qui est de 15kW dans la plupart des cas. De nombreuses centrales de ce genre existent un peu partout dans le monde, mais l'on retrouve presque jamais le même type de parabole d'une centrale à l'autre (comme en témoignent les 4 photographies ci-dessus), nous sommes donc encore en phase d'expérimentation mais nous avons déjà constaté que cette technologie n'est probablement pas la plus rentable.

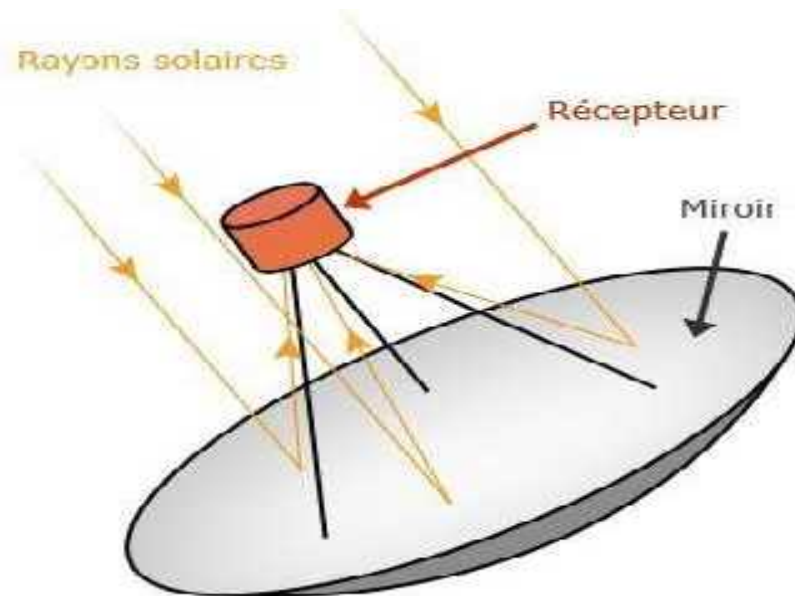


Figure I.16 : Principe de fonctionnement de concentrateurs paraboliques

I.12 Capteurs solaires hybrides

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

fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé (eau, air ou bi-fluide) et selon le type d'absorbeur (plan, concentrateur ...).

A cause de la faiblesse de conductivité thermique de l'air et du coefficient de transfert de chaleur, Mohamed Ould Sid Ahmed en master (Juin 2015), a étudié un capteur hybride PVT à air en y ajoutant des ailettes de refroidissement au canal. Le matériau étant des alliages d'aluminium récupéré des canettes de boissons, ce qui participe au développement durable.

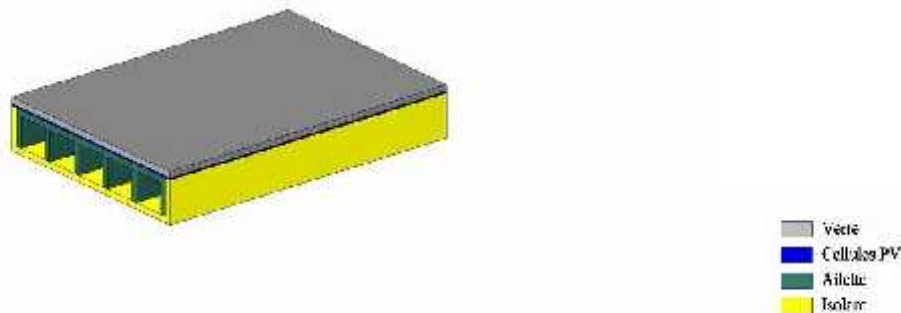


Figure I.17: La Configuration Etudiée par Mohammed Ould Sid Ahmed (Master Juin 2015 Université 8 Mai 1945 de Guelma).

I.12.1 Importance des panneaux solaires

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

Nous allons utiliser un nano-fluide pour le refroidissement du capteur PVT

Faizal et al. [12] ont étudié les performances thermiques des capteurs solaires nano-fluide et sa contribution de réduction de la taille pour estimer la réduction des coûts. Leurs résultats indiquent que le rendement du collecteur solaire avec nano-fluides est calculé en fonction de la densité du fluide de travail, de la chaleur spécifique et débits massiques. Les résultats ont confirmé que la densité plus la élevée et la chaleur spécifique la plus faible de nano-fluides offre une rendement thermique supérieure 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 conséquent, il permettra de réduire le poids, l'énergie et le coût de fabrication du collecteur. La valeur moyenne de 220 MJ incarné énergie peut être économisée pour chaque collecteur, la période de récupération peut atteindre 2,4 ans, les émissions de CO₂ d'environ moins de 170 kg sera le résultat de l'utilisation collecteur solaire à base de nano-fluide par rapport à un système conventionnel. Coût de dommages à l'environnement est également plus faible avec collecteur solaire à base de nano-fluide.

I.13 Méthode de refroidissement des panneaux solaires

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses ; elle présente l'avantage d'être propre et inépuisable. Cependant, les cellules solaires photovoltaïques (PV) ne convertissent qu'une partie du rayonnement solaire incident, tandis que, le reste favorise son réchauffement et donc l'élévation de sa température. Ce qui a pour effet d'affecter l'efficacité de ces cellules et celle des panneaux PV qu'elles composent. Pour atténuer cet effet négatif de l'élévation de température, on a recours au refroidissement. De nombreuses techniques de refroidissement sont proposées dans la littérature, notamment celles utilisant de l'eau comme fluide caloporteur. [13] ont fait circuler cette eau dans un échangeur de chaleur à serpentin selon différentes configurations de ses tubes. Ce qui a permis d'améliorer l'efficacité du panneau PV de 10.5 à 17.2%. Pour une meilleure homogénéisation du champ de température dans le panneau PV, [14] proposent un échangeur à microcanaux. Une autre technique de refroidissement [25], qui améliore l'efficacité de 14.1%, consiste à pulvériser de l'eau, simultanément sur les deux faces du panneau PV. [16] ont utilisé une éponge fixée sur la face arrière du

panneau PV. Cette éponge qui est continuellement imbibée d'eau a permis d'améliorer l'efficacité de ce panneau de 29.4%. Pour l'autonomie de fonctionnement de ces systèmes de refroidissement par eau, [17] proposent de refroidir l'eau chaude, en sortie du panneau PV refroidi, à travers un échangeur enfouis dans le sol. Par ailleurs, dans une étude expérimentale de refroidissement d'un panneau PV par ruissellement d'eau sur sa face avant [18], l'eau circule en circuit fermé entre ce panneau et un réservoir de stockage. Selon que le refroidissement soit continu durant la journée ou en intermittence d'une heure, l'efficacité du panneau est améliorée, respectivement, de 28.4 et 10.7%.

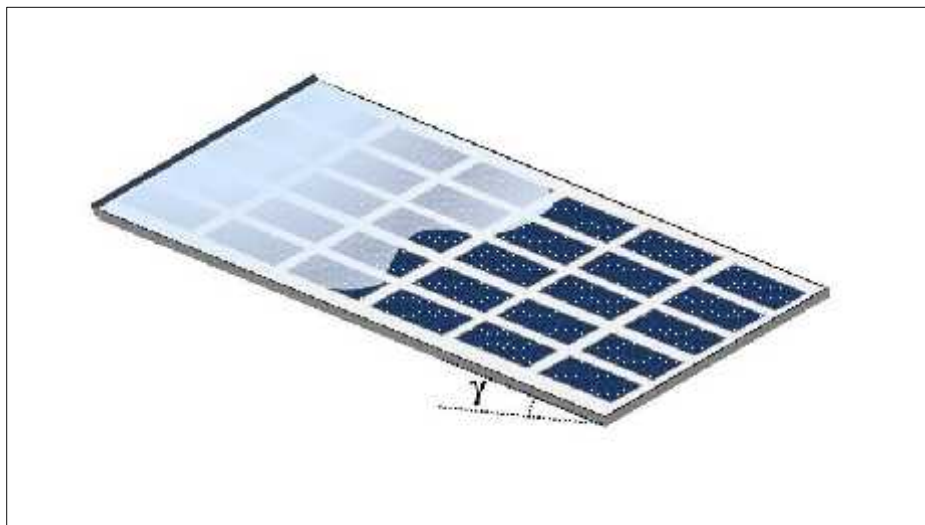


Figure I.18 : Illustration du panneau PV refroidi par ruissellement d'eau sur sa face avant.

I.14 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique : convection, conduction, et rayonnement. [19]

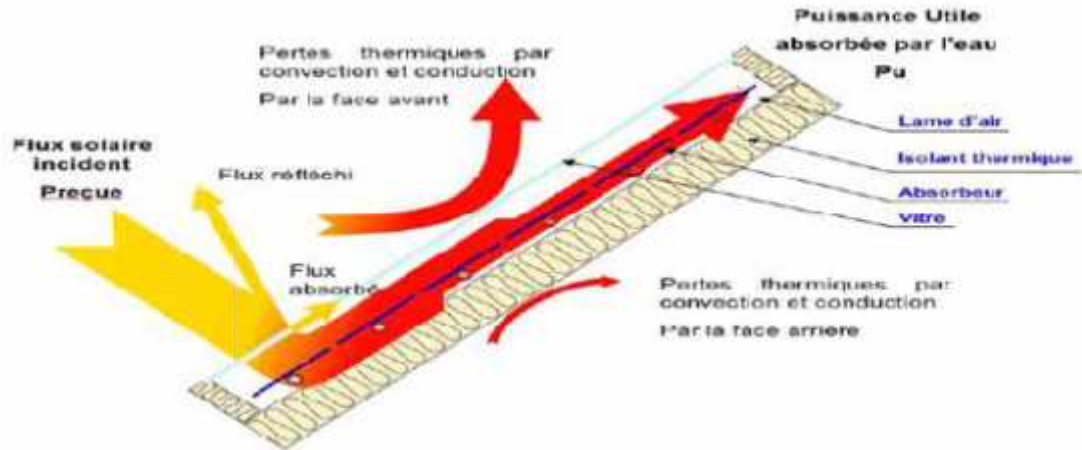


Figure I.19 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.

I.14.1 La conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres [20].

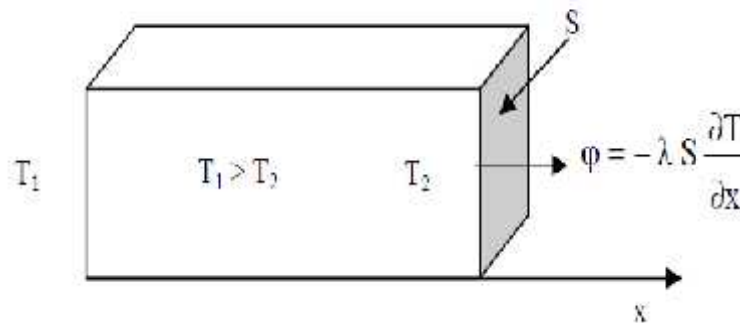


Figure I.20 : Schéma du transfert de chaleur par conduction

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation :

$$\vec{q} = - \lambda * A * \text{grad } T \text{ (I.6)}$$

q : Flux de chaleur (W)

λ : Conductivité thermique du milieu (W m⁻¹ K⁻¹)

A : Surface d'échange (m²)

Dans le capteur plan les échanges par conduction existent principalement entre :

- Les faces supérieures et inférieure de la vitre.
- Les faces supérieures et inférieure de l'isolant.
- L'absorbeur et l'isolant.

I.14.2 La convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques.

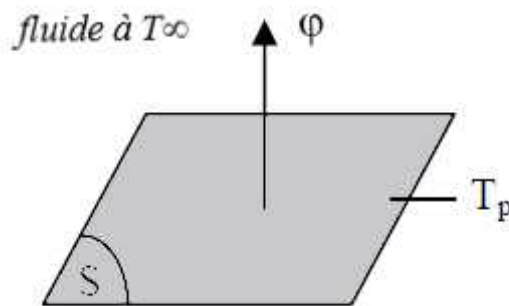


Figure I.21 : Schéma du transfert de chaleur convectif [2]

On distingue deux types de convection [21] :

- **La convection forcée** : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur, ...etc.).
- **La convection naturelle** : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo circulation.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton :

$$q = \alpha \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad (I.7)$$

q : Le flux échangé par convection (W)

α : Coefficient de convection ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

S : Surface de la paroi solide en contact avec le fluide (m^2)

T_p : Température de la paroi solide (K)

T_f : Température du fluide (K)

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Le tube et le fluide par convection libre.
- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.

- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

I.14.3 Le rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant.

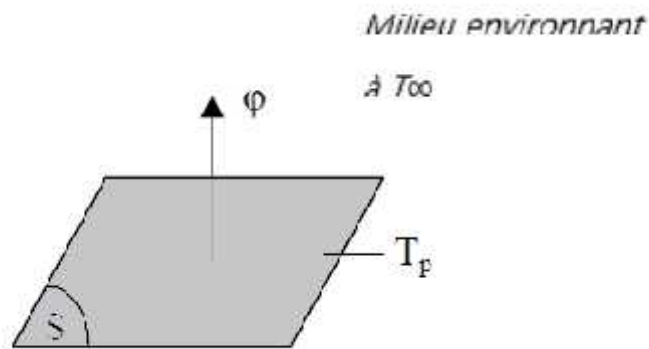


Figure I.22 : Schéma du transfert de chaleur radiatif [4]

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [3]:

$$q = \epsilon_p S (T_p^4 - T^4) \quad (I.8)$$

q: Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

ϵ : Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface (K)

T : Température du milieu environnant la surface (K)

S: Aire de la surface

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et le ciel.
- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

I.15 Notions sur la convection

La convection est une mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert 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 particules fluides adjacentes,

L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces particules. Ensuite ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie, celle-ci est à présent emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement

I.15.1 Type de convection

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement Aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte.

I.16 Convection naturelle

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions à température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse de courants descendants se produits pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud. Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poids spécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ de pesanteur terrestre. L'intervention du poids a pour effet de donner à la verticale un rôle privilégié. La définition de la géométrie d'un système convectif doit donc faire intervenir la forme et les dimensions ainsi que la disposition par rapport à la verticale. Les effets de convection naturelle sont familiers. On peut les observer quotidiennement dans l'eau que l'on chauffe dans un récipient, dans les panaches de certaines cheminées d'usines, la circulation atmosphérique, les vents, les tempêtes sont aussi des effets de la convection naturelle.

I.17 Les nombres adimensionnels

Les nombres adimensionnels les plus utilisés dans le domaine de la convection sont :

Le Nombre de Reynolds : représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les

Équations de Navier-Stokes. On le définit de la manière suivante : $Re = \frac{U_0 L}{\nu}$

Avec

U_0 : vitesse caractéristique du fluide [m/s]

L : dimension caractéristique [m]

ν : viscosité cinématique du fluide [m²/s]

$\rho = \frac{m}{V}$, masse volumique du fluide [kg/m³]

μ Viscosité dynamique du fluide [kg/(m.s)]

Le Nombre de Prandtl : qui est le rapport de la viscosité cinématique

ν et la diffusivité thermique α , il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux,

Ce nombre porte le nom de Ludwig Prandtl, physicien allemand : $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un nombre de Prandtl faible indique que la conduction thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température

Le Nombre de Peclet : est un nombre sans dimension utilisé en transfert thermique et en transfert massique. Il représente le rapport de deux temps caractéristiques : celui du transfert par convection et celui du transfert par conduction (ou par diffusion pour les transferts massiques). Il est équivalent au produit du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl dans le cas du transfert thermique. Ce nombre porte le nom d'Eugène Péclet, physicien

Français : $Pi = \frac{U_0 L}{\alpha} = Pr * Re$

Le Nombre de Grashof : est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection naturelle dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. Ce nombre porte le nom de Franz Grashof, L³

ingénieur allemand. On le définit de la manière suivante : $Gr = \frac{g L^3}{\nu^2}$

avec :

g : Accélération de la pesanteur.

β : Coefficient de dilatation.

Le Nombre de Richardson : qui compare les effets de la gravité à ceux d'inertie :

$$Ri = \frac{g L^3}{U_0^2}$$

Le nombre de Richardson sera le paramètre de convection mixte puisqu'il est fonction du paramètre de convection naturelle (Gr) et du paramètre de convection forcée (Re) :

$$Ri = \frac{G}{R^2}$$

Le Nombre de Rayleigh : est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides et caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide : inférieur à une valeur critique de 2000, le transfert s'opère essentiellement par conduction, tandis qu'au-delà de cette valeur c'est la convection naturelle qui devient importante. On peut le définir comme le produit du nombre de Grashof, reliant les effets de la force gravifique à la viscosité du fluide, et du nombre de Prandtl. Ce nombre porte le nom de Lord Rayleigh, physicien anglais.

On le définit de la manière suivante : $Ra = \frac{g H^3 (T_H - T_L)}{\nu} = Gr * Pr$

Le Nombre de Nusselt : est un nombre adimensionnel utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert thermique convectif et le transfert thermique conductif à travers une interface (souvent fluide/solide). Si la conduction est le principal mode de transfert, alors le nombre de Nusselt sera de l'ordre de l'unité. En cas de présence de convection (due par exemple au déplacement d'un fluide en régime turbulent), le transfert thermique s'effectuera principalement par déplacement du fluide et aura pour conséquence de faire tendre le nombre de Nusselt vers l'infini.

On le définit de la manière suivante : $Nu = \frac{hH}{k}$

h : Coefficient de transfert thermique.

H : Longueur caractéristique.

k : Conductivité thermique du fluide.

I.18 Conclusion

Les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance

d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir ! Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité (en intégrant l'hydroélectricité).

CHAPITRE II

Les Nano fluides

Chapitre II

Les Nano fluides

II.1 Généralités sur 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'en améliorer certaines propriétés.

Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Or, les fluides les plus employés tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène-glycol (EG) ne disposent que d'une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins. Avec les 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. Ce terme nano fluide a été introduit par Choi (1985).

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

- L'oxyde d'aluminium, Al_2O_3 .
- L'aluminium, Al.
- Le cuivre, Cu.
- L'oxyde de cuivre, CuO.
- L'or, Au.
- L'argent, Ag.
- Les nanotubes de carbone.
- Le silicone, Si.
- Le dioxyde de titane, TiO_2 .

Les liquides de base les plus utilisés sont :

- L'eau.
- L'éthylène-glycol, EG.
- Les huiles.
- Le Toluène.

II.2 Types de nanoparticules

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion, aussi seules les nanoparticules les plus couramment utilisées dans les applications liées aux transferts thermiques sont ici brièvement mentionnées.

D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories figure (II.1) :

- Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (l'aluminium Al, cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou d'oxydes (Oxyde d'aluminium Al_2O_3 , oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO_2 ...).
- Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO_2 , Nanotube de silicium...) [22]

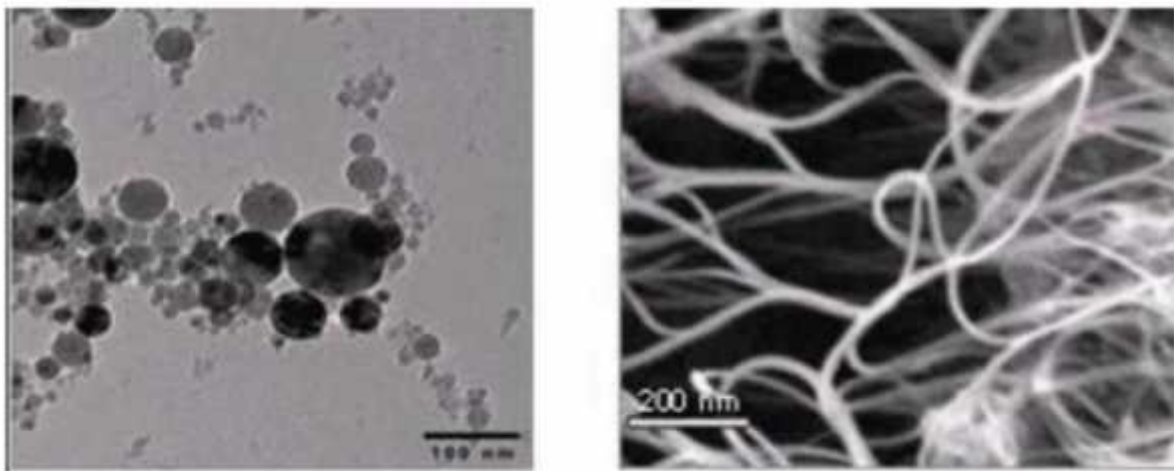


Figure II.1: Nanoparticules sphériques ; Nanotubes de carbone Bang et Chang, 2005)

II.3 Fabrication et préparation des nano fluides

Le point délicat est la fabrication de si petits morceaux de matière plus ou moins bien calibrés. Inutile d'essayer d'en faire chez soi en ponçant un bout de cuivre pour en faire de la poussière par exemple. Ça ne fera que des particules de taille micrométrique au mieux, qui encrasseront le circuit. 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 général, les nanoparticules utilisées pour la synthèse de nano fluides sont à base d'oxydes, de nitrures, de carbures, de métaux purs ou d'alliages, de nanotubes de carbone (NTC). On trouve également des particules composites pouvant utiliser des polymères.

Il y a deux méthodes principales pour obtenir un nano fluide :

- La méthode en une seule étape consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nano fluides mais permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules. Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur (figure II.2).
- La méthode en deux étapes consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrasons est souvent nécessaire afin de briser les agglomérats. En outre, pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le pH. On peut également utiliser les forces de répulsion stériques à l'aide de molécules adsorbées ou greffées sur la surface
- Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils 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 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 :

- La 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 assistés 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 (comme pour un Usinage par électroérosion). [23]

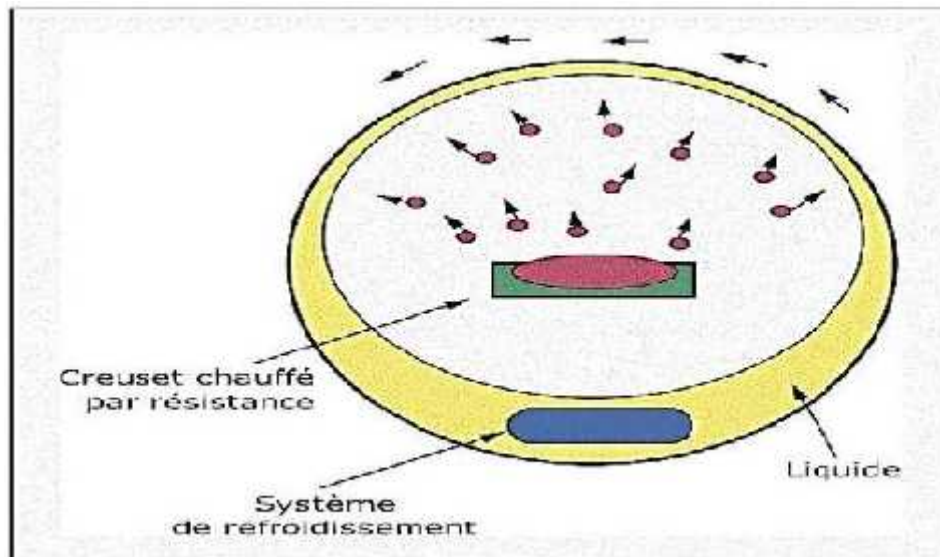


Figure II.2 : Procédé de synthèse de nano fluide en une seule étape (Ribeiro et Gruss 2009)

I.4 Les applications des nano fluides (Soufi, 2013)

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

II.5 Les avantages et les inconvénients

II.5.1 Les avantages des nano fluides :

-) Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
-) Haute dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
-) Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de Chaleur.

-) Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
-) Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

II.5.2 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.6 Caractéristiques thermo physiques des nano fluides

Les propriétés thermo physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, l'expansion thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des paramètres thermo physiques du nano fluide obtenu (la nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique, la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu, etc.).

De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées, lors de ces deux dernières décennies, en vue de mieux caractériser les propriétés physiques des nano fluides mais cette caractérisation est encore loin d'être satisfaisante. [24]

II.6.1 La Masse volumique

Pour calculer la masse volumique d'un nano fluide que nous supposerons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V} \right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (\text{II.1})$$

La fraction volumique des nanoparticules, notée ϕ désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide).

$$\phi_{nf} = \frac{V_s}{V_f + V_s} = \frac{V_s}{V_T}$$

On en déduit alors la masse volumique du nano fluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (\text{II.2})$$

Où

ρ_{nf} : La masse volumique du nano fluide,

ρ_f : La masse volumique du fluide de base

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solides

Remarque : Dans tous les travaux, sans exception, les nano-fluides ont été caractérisés en fonction de la fraction volumique notée $\phi = \frac{V_s}{V_T}$ or ce paramètre dépend de la température T du nano-fluide au moment du mélange, même si on suppose que le volume des particules solides varie peu pour de faibles variations de température, celui des fluides par contre varie et les expériences des uns et des autres pour réaliser le nano-fluide avec un ϕ donné ont été conduites à des températures différentes. Il aurait mieux valu pour mener à bien ces études prendre un autre paramètre indépendant de la température, c'est le cas de la fraction massique.

$$C = \frac{m_s}{m_T}$$

Une fois ce rapport utilisé, C reste constante égale à C_0 dans un milieu homogène et ce pour toute valeur de T si l'on ne prend pas en compte la thermo diffusion.

Nous présentons dans le tableau (3.1) les valeurs des rapports de la masse volumique des nano fluides sur la masse volumique du fluide de base pour les cinq nano fluides (eau+Al₂O₃), (eau+CuO), (eau+Cu), (eau+Ag) et (eau+Au) en fonction de la fraction volumique (ϕ) qui varie entre 0% et 8%.

	ρ_f/ρ_f				
%	Eau+Al ₂ O ₃	Eau+CuO	Eau+Cu	Eau+Ag	Eau+Au
0%	1	1	1	1	1
1%	1.0296	1.0546	1.0797	1.0951	1.1833
2%	1.0593	1.1092	1.1594	1.1903	1.3666
3%	1.0890	1.1638	1.2391	1.2855	1.5500
4%	1.1186	1.2184	1.3188	1.3807	1.7333
5%	1.1483	1.2730	1.3985	1.4759	1.9167
6%	1.1780	1.3276	1.4782	1.5711	2.1000
7%	1.2077	1.3823	1.5579	1.6663	2.2834
8%	1.2373	1.4369	1.6376	1.7615	2.4667

Tableau II.1 : Rapport des masses volumiques des différents nano fluides en fonction de la fraction volumique.

II.6.2 Viscosité dynamique des nano fluides :

La majorité des études qui ont traité de la viscosité des nano-fluides ont eu recours, pour son calcul à partir de la viscosité du fluide de base et de la fraction volumique ϕ , aux relations de Stokes-Einstein ou de Brinkman. Ces relations ont été établies dans un cadre précis à savoir particules métalliques de forme sphérique, en faible concentration, parfaitement dispersées et sans interaction inter-particules. Or les nanoparticules utilisées dans les différentes expérimentations ne sont ni sphériques ni de même taille, en particulier lorsqu'il s'agit de nano fluides avec des nanotubes de carbone. L'ajout de particules solides dans un liquide provoque une augmentation, plus ou moins importante, de la viscosité du mélange obtenu. Là encore, de nombreux facteurs peuvent être à l'origine des disparités constatées. Pour des nanoparticules identiques (nature, taille) et un même fluide de base, la qualité de la dispersion, et la température peuvent influencer considérablement sur la viscosité.

II.6.2.1 Les différents modèles de viscosités :

La viscosité dynamique d'un nano-fluide donné par Einstein [25] pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu(1 + 2.5\phi) \quad (\text{II.3})$$

μ_{nf} , μ_f désignent respectivement les viscosités dynamiques du nano fluide, du fluide de base et φ la fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation n'est valable que pour $\varphi < 0.03$. Par contre, Brinkman [26] a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}$$

On remarque que 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.

Pour ce qui est de la viscosité des nano-fluides, on conçoit que la prédominance des effets de surface sur les effets de volume, conjuguée aux effets de l'agitation thermique, rend caduques les modèles précédents.

Ainsi les travaux expérimentaux portant sur la mesure des viscosités des nano-fluides ont montré que cette dernière est plus élevée que celle tirée des relations précédentes.

$$\mu_{nf} = \mu_f(6.2\varphi^2 + 2.5\varphi + 1)$$

Cette équation permet le calcul de la viscosité de suspension de nanoparticules avec $\varphi > 10\%$.

II.6.2.1.1 Modèles d'Einstein et Modèles Brinkman :

La viscosité dynamique d'un nano fluide donné par Einstein [25] pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu(1 + 2.5\varphi) \quad (\text{II.4})$$

μ_{nf} , μ_f désignent respectivement les viscosités dynamiques du nano fluide, du fluide de base et φ la fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation n'est valable que pour $\varphi < 0.03$. Par contre, Brinkman [26] a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}$$

On remarque que 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.

Pour ce qui est de la viscosité des nano-fluides, on conçoit que la prédominance des effets de surface sur les effets de volume, conjuguée aux effets de l'agitation thermique, rend caduques les modèles précédents.

Ainsi les travaux expérimentaux portant sur la mesure des viscosités des nano-fluides ont montré que cette dernière est plus élevée que celle tirée des relations précédentes.

II.6.2.1.2 Modèle de Batchelor :

En prenant en compte l'effet de l'interaction hydrodynamique entre deux nanoparticules sphériques Batchelor [27] a montré que la viscosité n'est pas seulement une fonction linéaire de ϕ , comme l'indique la relation d'Einstein mais une fonction non linéaire de ϕ avec la présence d'un terme en ϕ^2 :

$$\mu_{nf} = \mu_f (6.2\phi^2 + 2.5\phi + 1)$$

Cette équation permet le calcul de la viscosité de suspension de nanoparticules avec $\phi > 10\%$.

II.6.3 Conductivité thermique des nano fluides

Une grande partie des travaux traitant des nano fluides porte sur la quantification de l'augmentation de la conductivité thermique des nano fluides. L'objectif de ces travaux est de mesurer cette conductivité thermique et de choisir les nanoparticules et le fluide porteur les plus appropriés pour obtenir des rapports conductivité thermique du nano fluide sur celle du fluide porteur la plus élevée possible. Les travaux ont également porté sur la façon de prédire cette augmentation de conductivité thermique en fonction de celle des nanoparticules et du fluide porteur ainsi que de celle de la taille et la forme de ces nanoparticules en proposant différentes

relations donnant ce rapport des conductivités thermiques nano fluide sur celle du fluide $\frac{\kappa_n}{\kappa_f}$.

En l'absence de données expérimentales et de théorie fondée permettant la détermination de la conductivité thermique d'un nano fluide, des relations utilisées précédemment pour le calcul de la conductivité thermique d'une suspension de particules de plus grande taille de l'ordre micromètres ou millimètres dans un fluide, ont été adoptées pour calculer la conductivité thermique des nano fluides.

II.6.3.1 Modèles des conductivités thermiques

A partir de la résolution de l'équation de l'énergie, beaucoup de modèles de calculs de la conductivité thermique ont été développés pour prédire l'estimation de la conductivité du nano fluide, constitués par des éléments très réguliers tels que les nanoparticules sphériques.

Les modèles décrits dans la littérature sont des outils de prédictions développés afin d'appréhender les mécanismes de transfert thermique aux seins des nano fluides.

Il existe un panel important de modèles de calcul de la conductivité thermique apparente dans un nano fluide. Notre objectif étant ici de présenter succinctement quelques-uns. Cette famille de modèles recouvre en réalité deux grands types d'approches d'une part l'analogie électrique, d'autre part par la résolution exacte de l'équation de la chaleur. Les modèles que nous présentons ne concernent que les nano fluides. En dernier recours seule l'expérimentation physique permet d'obtenir une évaluation précise de la conductivité des nano fluides.

II.6.3.2 Modèles de type Maxwell

Ces modèles concernent les milieux où l'empilement des particules est régulier. La phase solide est supposée discontinue, noyée dans une phase fluide continue. A partir de ce modèle, beaucoup de chercheurs ont développé plusieurs modèles qui s'appuient sur les mêmes principes que Maxwell [28].

II.6.3.2.1 Modèle de Maxwell

Maxwell fait partie des chercheurs qui se sont intéressés au calcul de la conductivité thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension. Pour aboutir à l'estimation de cette dernière, il a supposé que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre D_p . Les particules sont séparées d'une distance suffisante conduisant à l'absence d'interaction mutuelle entre elles, par conséquent le milieu est fortement dilaté (pas de contact entre les particules).

La formule de Maxwell est donnée par :

$$\frac{k_n}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\phi} \quad (\text{II.7})$$

k_n, k_f, k_s désignent respectivement les conductivités thermiques du nano fluide, du fluide de base et des particules solides.

II.6.3.2.2 Modèle de Hamilton-Crosser

Le modèle de Hamilton [29] est une extension du modèle de Maxwell. Il concerne les particules de forme quelconque. Pour prendre en compte cette diversité de forme, Hamilton introduit un facteur géométrique appelé sphéricité (ϕ) faisant référence à la géométrie sphérique. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule.

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

$$\frac{k_n}{k_f} = \frac{k + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k)\phi}{k + (n-1)k_f + (k_f - k)\phi} \quad (\text{II.8})$$

Où n est un facteur de forme empirique donné par :

$$n = \frac{3}{\psi}$$

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

Pour $\phi = 1$ (particules sphériques) le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell. Le modèle de Hamilton-Crosser est utilisé par Xuan et Li [30] pour obtenir une estimation de la conductivité thermique en utilisant des différentes valeurs de ϕ variant de 0.5 à 1.0, les résultats obtenus à partir de ce modèle pour $\phi = 0.7$ sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Par contre, Lee et al. [31] ont obtenu des valeurs de conductivité thermique des nano fluides qui concordent avec les résultats expérimentaux en utilisant $\phi = 0.1$ pour le nano fluide (Al_2O_3 +eau).

L'interface entre deux milieux constitue un obstacle au transfert de la chaleur. La résistance d'interface est un important facteur pour la détermination de la conductivité thermique des nano fluides. Ce facteur, noté résistance de Kapitza (R_k) a été pris en compte par certains auteurs pour le calcul de cette conductivité thermique. Hasselman et Johnson [32] ont adapté le modèle de Maxwell en tenant compte de cette résistance :

$$\frac{k_n}{k_f} = \frac{k(1+2\beta) + 2k_f + 2\phi[k_s(1-\beta) - k_f]}{k(1+2\beta) + 2k_f - \phi[k_s(1-\beta) - k_f]} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Avec } \beta = \frac{R_k k_f}{d}$$

d : le diamètre moyen d'une nanoparticule

R_k : La résistance de Kapitza

K_f : La conductivité thermique du fluide de base

D'après Wilson et al. [33], la résistance de Kapitza entre les nanoparticules et le fluide de base est égale à $7.7 \times 10^{-9} \text{ Km}^2 \text{ W}^{-1}$.

II.6.3.2.3 Modèle de Yu et Choi

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi [34]. 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.

$$\frac{k_n}{k_f} = \frac{k + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1 + \beta)^2 \phi}{k + 2k_f - (k_s - k_f)(1 + \beta)^2 \phi} \quad (\text{II.10})$$

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

II.6.3.2.4 Modèle de Bruggeman

Le modèle proposé par Bruggeman [35] semble mieux approximer certains résultats expérimentaux comparé aux autres modèles [29, 32] pour le cas des nanoparticules sphériques avec aucune limitation concernant les concentrations des nanoparticules.

$$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3 - \Delta)k_s + (2 + 3\Delta)k_f] + \frac{k_f}{4} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Avec} \quad \Delta = [(3 - \Delta)^2 \left(\frac{k_s}{k_f}\right)^2 + (2 + 3\Delta)^2 + 2(2 + 9 - 9\Delta^2) \left(\frac{k_s}{k_f}\right)]$$

Récemment, Keblinski et al. [35] ont discuté plusieurs mécanismes susceptibles de contribuer à l'augmentation de la conductivité thermique des nano fluides. Parmi ces mécanismes il y a le mouvement Brownien. Il s'avère que le mouvement Brownien des nanoparticules est trop lent pour transporter une quantité de chaleur notable à travers un nano fluide. Toutefois, ce mouvement peut avoir un rôle indirect pour produire une convection autour des nanoparticules qui sert à augmenter le transfert de chaleur.

Il est bien connu que les formules utilisées pour proposées par Maxwell et Hamilton-Crosser ne constituent qu'une première approximation de la conductivité thermique des nano fluides. Pour cela, il existe Plusieurs corrélations semi-empiriques basées sur des résultats expérimentaux calculer la conductivité thermique des différentes nano fluides.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 28.905 \phi^2 + 2.8273 \phi + 1 \text{ Pour le nano fluide (EG + Al}_2\text{O}_3) \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = -13 \phi + 6.3 \phi + 1 \quad \text{Pour le nano fluide (Al}_2\text{O}_3 + \text{eau)} \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 11.6 \phi^2 + 9.6 \phi + 1 \quad \text{Pour le nano fluide (Cu + eau)} \quad (\text{II.14})$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 7146 \phi^2 + 76.6 \phi + 1 \quad \text{Pour le nano fluide (huile + NTC)} \quad (\text{II.15})$$

Les équations (II.12), (II.13), (II.14) et (II.15) sont des corrélations empiriques utilisées pour estimer la conductivité thermique des nano fluides (Al₂O₃ + EG), (Al₂O₃ + eau), le nano fluide (Cu + eau) et le nano fluide (huile + nanotube de carbone) respectivement.

II.6.4 La chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $C_p = \frac{dQ}{m dT}$. 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.

De nombreux auteurs dont Park et Cho [36] ont utilisé :

$$(c_p)_{nf} = (1 - \phi)(c_p)_f + \phi(c_p)_s \quad (\text{II.16})$$

Certains auteurs dont Xuan et Roetzel ont utilisé :

$$(c_p)_{nf} = (1 - \phi)(c_p)_f + \phi(c_p)_s \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{aligned} (\rho C_p)_{nf} &= (\rho)_{nf}(c_p)_{nf} = \rho_{nf} \frac{Q_f + Q_s}{(m_f + m_s)\Delta T} \\ &= \rho_{nf} \frac{(m C_p)_f \Delta T + (m C_p)_s \Delta T}{(m_f + m_s)\Delta T} = \rho_{nf} \frac{(\rho V C_p)_f + (\rho V C_p)_s}{\rho_f V_f + \rho_s V_s} \\ &= \left(\frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \right) \left(\frac{(\rho V C_p)_f + (\rho V C_p)_s}{\rho_f V_f + \rho_s V_s} \right) = (\rho)_f (C_p)_f \frac{V_f}{V_f + V_s} + (\rho)_s (C_p)_s \frac{V_s}{V_f + V_s} \end{aligned}$$

D'où :

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

Les valeurs du rapport :

$(C_p)_{nf} / (C_p)_f$ obtenus à partir des deux relations (II.16) et (II.17) pour différents nano-fluides avec comme fluide porteur l'eau et pour différentes nanoparticules (Al_2O_3 , CuO , Cu , Ag et Au) en fonction de la fraction volumique variant de 0 à 8%. On relève une différence notable entre les valeurs calculées à partir des deux relations de chaleur spécifique (II.16) et (II.17).

II.6.5 Le coefficient d'expansion thermique :

Le coefficient d'expansion thermique est le facteur qui caractérise la variation de la masse volumique sous l'action de température il est appelé aussi le coefficient de dilatabilité, il est défini par la relation suivante :

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$$

Pour calculer 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, par analogie avec la relation suivante :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (II.2)$$

On déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (II.18)$$

Où β_f et β_s désignent respectivement les coefficients de dilatabilité du fluide porteur et celle des nanoparticules.

En revanche, Kim et al. [37] ont supposé que le coefficient d'expansion thermique des nanoparticules est largement inférieur à celui du fluide de base, donc ils simplifient l'équation (II.18) comme suit :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f \quad (II.19)$$

Supposant que les fluides porteurs sont incompressibles et la différence de température imposée aux nanoparticules restent modérées pour écrire que la masse volumique du nano fluide et de ses constituants s'exprime sous une forme linéaire de la température par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{nf} = \rho_{0,nf} (1 - \beta_n(T - T_0)) \\ \rho_f = \rho_{0,f} (1 - \beta(T - T_0)) \\ \rho_s = \rho_0 (1 - \beta_s(T - T_0)) \end{array} \right.$$

De la première équation, on en déduit l'expression de :

$$\beta_{nf} = - \frac{(\rho_{nf} - \rho_{0,nf})}{\rho_{0,nf}(T - T_0)}$$

En remplaçant les masses volumiques par les relations correspondant, on obtient la relation suivante :

$$\beta_{nf}\rho_{0,f} = (1 - \varphi)\beta_f\rho_{0,f} + \varphi\beta_s\rho_{0,s} \quad (\text{II.20})$$

D'après Kim et al. Si on néglige la dilatibilité des nanoparticules devant celle de fluide de base, on trouve l'expression suivante :

$$\beta_{nf}\rho_{0,f} = (1 - \varphi)\beta_f\rho_{0,f} \quad (\text{II.21})$$

II.7 L'utilisation des nano fluides dans l'amélioration du transfert thermique :

II.7.1 Synthèse bibliographique sur la convection dans les nano fluides :

La convection thermique est un mode de transport d'énergie par l'action qui combine de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte.

Multiplés études expérimentale et numérique sont disponibles dans la littérature montrant l'influence des nano fluides sur le transfert convectif dans les tubes, plusieurs corrélations ont été proposées pour la prédiction de nombre de Nusselt.

Pak et Cho [38] (1998) ont étudié expérimentalement le transfert de chaleur convectif des nano fluides pour un écoulement turbulent, ils ont utilisé des nanoparticules d'alumine (13 nm) et des nanoparticules de dioxyde de titanium (27 nm) de fraction volumique variant de 0 à 3% dispersées dans l'eau comme fluide de base. Ils ont remarqué que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de Reynolds et ils ont proposé alors la relation suivante en fonction des nombres de Reynolds et de Prandtl.

$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.5}$$

Cette relation est valable pour un nombre de Reynolds compris entre 10^4 et 10^5 , et un nombre de Prandtl varie de 6.5 à 12.3.

Xuan et Li [39] (2002) ont réalisé une étude expérimentale pour calculer le coefficient de transfert convectif des nano fluides pour des écoulements laminaire et turbulent dans un tube horizontal. Pour se faire ils ont utilisé l'eau comme fluide de base avec une suspension de nanoparticules de cuivre ($d_p < 100\text{nm}$) pour plusieurs fractions volumique (0.2, 0.5, 0.8, 1, 1.5 et 2%). Ils ont conclu que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et de la vitesse. En se basant sur ces résultats expérimentaux, ils ont établi deux corrélations en introduisant le terme de nombre de Peclet qui caractérise l'effet de la dispersion thermique causé par la micro-convection et la micro-diffusion des nanoparticules il est définit comme suit :

$$Pe_p = \frac{v d_p}{\alpha_n} = \frac{v d_p (\rho C_p)_n}{\lambda_n}$$

Pour un écoulement laminaire : ($800 < Re < 2000$)

$$Nu = 0.4328(1 + 11.28^{0.754} Pe^{0.218}) Re^{0.333} Pr^{0.4}$$

Pour un écoulement turbulent : ($10^3 < Re < 2.5 \times 10^5$)

$$Nu = 0.0059(1 + 7.6286^{0.6886} Pe^{0.001}) Re^{0.9238} Pr^{0.4}$$

Yang et al. [40] (2005) Ont effectué une étude expérimentale sur le transfert convectif d'un nano fluide contenant des nanoparticules de graphite de diamètre vari de 20 à 40 nm dispersées dans une huile synthétique pour un écoulement laminaire dans un tube circulaire où

le nombre de Reynolds varie de 5 à 110, et ils ont fait varier la fraction volumique de 0 à 2%. Ils ont conclu que le nombre de Nusselt augmente environ 22% pour le cas où le fluide caloporteur est un nano fluide donc ils ont présenté une corrélation en fonction de dimensions de tube ainsi que la viscosité dynamique.

$$Nu = 1.86Re^{1/3}Pr^{1/3}\left(\frac{D}{L}\right)^{1/3}\left(\frac{\mu_w}{\mu_f}\right)^{-0.1}$$

Maiga et al. [41] (2005) ont présenté un travail numérique pour mesurer le coefficient de transfert convectif des nano fluides pour un écoulement laminaire dans un tube circulaire, pour réaliser cette étude ils ont choisi l'eau comme fluide de base et l'alumine comme nanoparticules avec une concentration volumique comprise entre 0 et 10%, les résultats indiquent que l'inclusion des nanoparticules produit une augmentation remarquable dans le flux thermique, ils ont proposé deux corrélations, une pour une température constante et l'autre pour un flux constant. Ces formules sont valables pour un Reynolds inférieur à 1000 et Prandtl compris entre 6 et 753.

Pour une température constante :

$$Nu = 0.28.Re^{0.35}.Pr^{0.35} \text{ (II.22)}$$

Pour un flux constant :

$$Nu = 0.086Re^{0.55}Pr^{0.5} \text{ (II.23)}$$

Maiga et al. [42] (2006) ont effectué une autre étude numérique en gardant les mêmes conditions et les mêmes nano fluides mais pour un écoulement turbulent dont le nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl sont compris respectivement entre 10^4 et 5×10^5 et entre 6.6 et 13.9. La corrélation prend la forme suivante :

$$Nu = 0.085Re^{0.71}Pr^{0.35} \text{ (II.24)}$$

Velgapudi et al. [43] (2008) ont présenté expérimentalement une étude sur la prédiction des propriétés thermo-physiques et les caractéristiques du transfert thermique d'un nano fluide pour un régime turbulent, ils ont proposé une nouvelle corrélation empirique définie comme suit :

$$Nu = 0.0256Re^{0.8}Pr^{0.4} \text{ (II.25)}$$

Duangthongsuk et Wongwises [44] (2010) ont expérimentalement calculé le coefficient du transfert convectif ainsi que le facteur de friction pour un écoulement turbulent des

nanoparticules de dioxyde de titanium de fraction volumique variant de 0.2 à 2% suspendues dans l'eau, ils ont constaté que le coefficient de transfert thermique du nano fluide est 26% plus important que celui de fluide de base et le facteur de friction augmente légèrement en présence des nano fluides. En se basant sur les résultats expérimentaux ils ont proposé les corrélations suivantes valables pour $3 \times 10^3 \leq Re \leq 1.8 \times 10^4$

$$Nu = 0.074Re^{0.707} Pr^{0.385} (II.26)$$

$$f = 0.96 Re^{-0.375} (II.27)$$

Vajjha et al. [45] (2010) Ont mené des études expérimentales pour déterminer le coefficient convectif pour un régime turbulent de trois nano fluides contenant différent nanoparticules CuO et SiO₂ (<6%) et Al₂O₃ (<10%) dispersées dans l'eau, et pour un Reynolds compris entre 3000 et 1.6×10^4 , leur résultats montrent aussi que Nu augmente avec l'augmentation de Re et .

$$Nu = 0.056(Re^{0.65} (1+0.0169 Re^{0.15})) Pr^{0.542} (II.28)$$

Hojjat et al. [46] (2011) ont expérimentalement investigué le transfert thermique par convection forcé dans un tube horizontal pour un écoulement turbulent sous une température constante, trois types de nano fluides non-newtonien ont été préparé par la dispersion des nanoparticules de Al₂O₃, CuO et TiO₂ dans une solution aqueuse de la carboxy-méthyle cellulose, ils ont proposé la corrélation suivante :

$$Nu = 0.00115Re^{1.05} Pr^{0.693} (1+0.388 Re^{-0.388}) (II.29)$$

Sajadi et Kazemi [47] (2011) ont présenté une investigation expérimentale de la convection thermique d'un régime turbulent dans un tube contenant des nanoparticules de dioxyde de titanium (30 nm) de fraction volumique variant de 0.2 à 0.25% suspendues dans l'eau, ils ont remarqué que la présence des nano fluides cause une amélioration du transfert thermique et une augmentation dans la différence de pression, ils ont proposé une corrélation empirique pour un Reynolds $5 \times 10^3 \leq Re \leq 3 \times 10^4$

$$Nu = 0.067 Pr^{0.3} Re^{0.71} + 0.0005Re (II.30)$$

Godson et al. [48] (2011) ont effectué un protocole expérimental pour mesurer la convection thermique pour les écoulements laminaire, transitoire et turbulent d'un nano fluide contenant des nanoparticules d'argent d'une concentration volumique variée de 0.3 à 0.9% dispersée dans l'eau. Les résultats expérimentaux ont mené à la corrélation suivante :

$$Nu = 0.023Pr^{0.3}Re^{0.8} + (0.617 + 0.135) Re^{(0.445 + 0.37)}Pr^{(1.081 + 1.305)} \quad (II.31)$$

Mansour et al. [49] (2012) Ont effectué deux travaux expérimentaux sur la mesure de la convection thermique pour un écoulement turbulent d'un nano fluide contient des nanoparticules d'alumine d'une concentration volumique inférieure à 4% dans l'eau pure, ils ont présenté les deux corrélations suivantes :

Pour un tube horizontal :

$$Nu = Nu_0(1 + 0.625)(1 + 5.25 \times 10^{-5} \times Ra^{1.06})^{0.135} \quad (II.32)$$

Pour un tube vertical :

$$Nu = Nu_0 \left(1 + 52 \times 10^{-4} \frac{G}{R} \right)^{0.2} \quad (II.33)$$

II.8 Revue bibliographique sur l'application des nano fluides dans les collecteurs solaires

Avec l'apparition et le développement rapide des nanosciences et nanotechnologies pendant la deuxième moitié du 20ème siècle, la convection a pris une grande part d'étude, et a pris un autre aspect de perfectionnement c'est au niveau nanométrique de la matière du milieu convectif que les récents travaux ont été concentrés. La littérature concernant les nano fluides montre que leur utilisation en tant que fluide caloporteur est envisageable, la plupart des auteurs ayant constaté une amélioration des performances thermiques lors de l'utilisation des nano fluides grâce à leur propriétés thermo-physique intéressantes spécialement la hausse conductivité thermique. Nous présentons ici les recherches menées dans la dernière décennie sur l'application des nano fluides dans les récepteurs solaires pour améliorer le transfert thermique et les facteurs participant dans cette amélioration.

Bianco et al. [50] (2009) ont présenté une étude numérique sur l'effet d'utilisation des nanoparticules d'alumine de diamètre 100 nm et de fraction volumique (1%, 4%) dans un tube circulaire, ils ont constaté que l'inclusion des nanoparticules produit une augmentation considérable de la transmission de chaleur, cependant l'amélioration du transfert thermique s'accompagne par une augmentation de la contrainte de cisaillement aux parois.

Otanicar et Golden [51] (2009) présentaient une étude théorique de l'utilisation des nano fluides dans un capteur à absorption directe, ils ont choisi des nanoparticules de graphite de 0.1% dispersées dans un mélange contenant l'eau et le propylène glycol. Ils ont conclu que l'utilisation des capteurs solaire à base de nano fluide conduit à la réduction d'environ 3% des émissions de CO2 par rapport au collecteur classique.

Taylor et al. [52] (2010) ont effectué une étude expérimentale et théorique de trois nano fluides contenant l'alumine, l'argent, le cuivre de diamètre 20 nm et d'une concentration volumique 0.1% dispersées dans le therminol VP-1, les résultats montrent que les nano fluides contribuent à améliorer l'efficacité d'échange de 5 à 10%.

Lu et al. [53] (2011) ont utilisé pour un travail expérimental dans un capteur à tube sous vide les nanoparticules d'oxyde de cuivre de diamètre 50 nm et pour plusieurs fraction volumique (0.8, 1.0, 1.2, 1.5 %) suspendues dans l'eau. Ils ont constaté que le CuO a le potentiel d'augmenter le coefficient de transfert thermique d'environ 30% ainsi que la température de la paroi du thermosiphon diminue en raison d'utilisation de CuO.

He et al. [54] (2011) ont travaillé expérimentalement sur l'amélioration du transfert thermique dans un tube sous vide en utilisant deux nano fluides (TiO₂/ eau) et (NTC/ eau) le diamètre et la concentration volumique des nanoparticules étaient respectivement 10 nm et 0.2%. Ils ont confirmé que le NTC/ eau est le plus approprié que le TiO₂ / eau à utiliser dans un collecteur solaire à tube sous vide.

Khullar et al. [55] (2012) ont mené une étude théorique sur l'utilisation du nano fluide Alumine (5nm) dispersée dans le therminol VP-1 circulé dans l'absorbeur d'un capteur cylindro-parabolique, les résultats montrent que le rendement du capteur augmente d'environ 5 à 10%.

Chougule et al. [56] (2012) ont étudié expérimentalement l'amélioration du transfert thermique en présence de CNT/ eau dans une plaque plane, ils ont remarqué que l'efficacité moyenne du collecteur pour l'eau et le nano fluide sont 25 et 45% respectivement à un angle d'inclinaison 31.5°, d'autre part le rendement moyen du collecteur passe de 36% pour l'eau à 61% pour le nano fluide à un angle d'inclinaison 50°.

Yousfi et al. [57] (2012) ont présenté une étude expérimentale de l'utilisation des nano fluides dans une plaque plane, en utilisant des nanoparticules d'alumine de diamètre 15nm et de fraction volumique 0.2% dispersées dans l'eau+surfactant. Ils ont constaté que l'efficacité augmente d'environ 28% en utilisant 0.2% des nanoparticules.

Liu et al. [58] (2013) ont expérimentalement étudié la présence de CuO / eau dans un capteur à tube sous vide, ils ont conclu que la valeur maximale et moyenne de l'efficacité du collecteur peut augmenter de 6.6% et 12.4% respectivement.

Risi et al. [59] (2013) ont effectué une investigation numérique sur l'utilisation de (CuO+Ni/Gaz d'azote) dans un collecteur solaire cylindro-parabolique, ils ont trouvé que l'efficacité thermique atteint 62,5% à la température de sortie du nano fluide d'ordre 650°C et

quand la fraction volumique est inférieure à 0.3%, les inconvénients de chute de pression confondre avec les effets bénéfiques des propriétés thermiques des nano fluides.

Tiwari et al. [60] (2013) ont mené une étude théorique sur l'application de nano fluide (Al_2O_3 /eau) dans une plaque plane en variant la fraction volumique de 0.5 à 2%, les résultats indiquent que le rendement thermique accroit 31.64% en utilisant 1.5% des nanoparticules d'alumine, le nano fluide Al_2O_3 /eau a le potentiel de réduire 31% $kg\ CO_2/KWh$.

Sokhansfat et al. [61] (2014) ont étudié numériquement l'amélioration du transfert thermique dans l'absorbeur d'un capteur cylindro-parabolique en usant des nanoparticules d'alumine d'une concentration volumique qui ne dépasse pas 5% dispersées dans une huile synthétique à une température opérationnelle de 300, 400 et 500K. Les résultats numériques ont montré que le coefficient de transfert de chaleur par convection a une dépendance directe de la concentration volumique des nanoparticules où il accroit avec l'accroissance, le coefficient du transfert de chaleur augmente avec la diminution de la température de l'absorbeur.

II.9 Conclusion :

L'utilisation de nano fluides en tant que fluide caloporteur est un nouveau domaine qui est encore en phase de recherche. Les nano fluides contribuent à l'amélioration du transfert thermique de plusieurs dizaines de pour-cent, l'augmentation du transfert thermique a une dépendance directe de type, taille et la concentration volumique des nanoparticules utilisé. Néanmoins, compte tenu des diverses méthodes de synthèse et de caractérisation, les résultats expérimentaux ne sont pas reproductibles entre les différents groupes de recherche travaillant sur le sujet. En outre, l'influence d'un certain nombre de paramètres, tels que la taille et la forme, les phénomènes aux interfaces entre liquide et particules, sont encore mal compris et caractérisés. A travers cette thèse, nous présentons une étude sur les caractéristiques du transfert thermique en utilisant des nano fluides dans le tube linéique d'un capteur cylindro-parabolique en prenant en considération l'influence de type, la taille et la fraction volumique des nanoparticules en suspension.

CHAPITRE III

Formulation Mathématique et Procédures de Simulation

Chapitre III

Formulation Mathématique et Procédures de Simulation

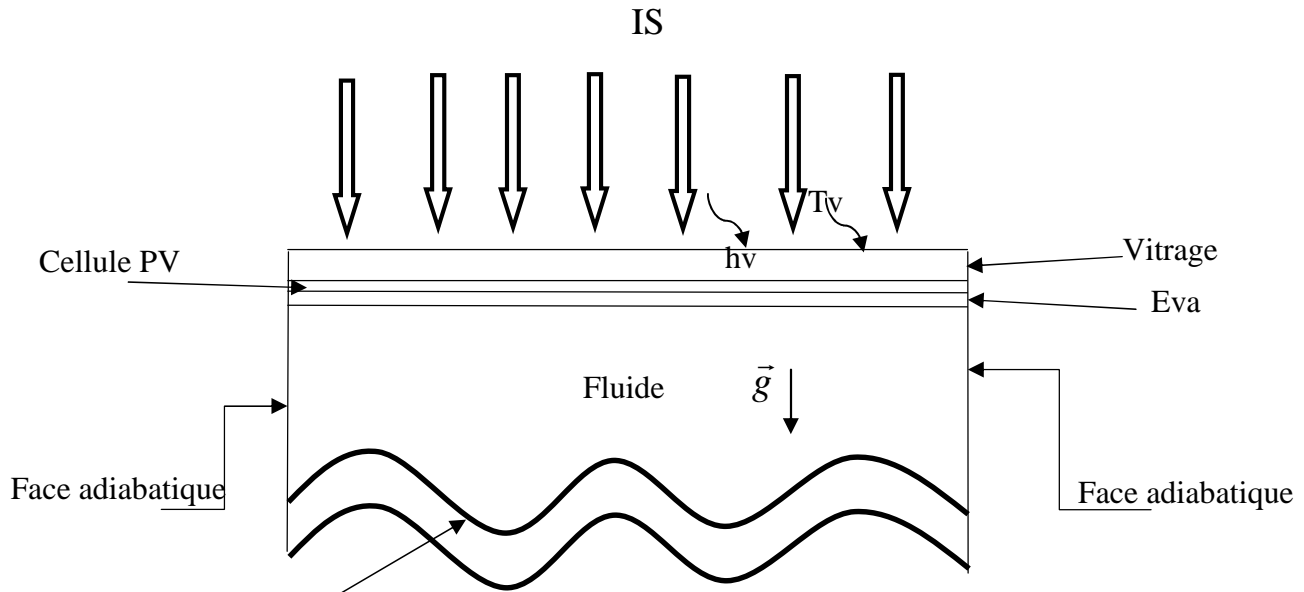
III.1 Introduction

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

III.2 Géométrie du problème

La géométrie de la configuration considérée est illustrée sur la figure (II.1). Il s'agit d'une géométrie miniaturisée et tridimensionnelle d'un panneau photovoltaïque hybride, constituée d'une cavité de forme ondulée contenant un nanofluide. Dans cette configuration nous trouvons les éléments suivants :

-) Un vitrage : C'est la plaque supérieure du panneau, il s'agit d'un verre trempé de faible teneur en fer. Ceci permet une meilleure transmission optique.
-) Une cellule photovoltaïque : son rôle est de transformer le rayonnement solaire en électricité.
-) L'EVA (éthylène-acétate de vinyle) est une résine transparente pour à couvrir les cellules photovoltaïques. Chimiquement, elle est formée de chaînes de copolymère d'éthylène et de vinyle d'acétate.
-) La cavité contenant le fluide (nanofluide, eau/Cu ou eau/TiO₂)
-) Un isolant à l'arrière : pour minimiser les pertes thermiques



I **Figure II.1:** Vue de face de la configuration étudiée

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

III.3 Hypothèses

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

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

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

T_0 : Température de référence.

ρ_0 : Masse volumique du fluide.

: Le coefficient d'expansion thermique à pression constante.

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

ρ_0 : la masse volumique à T_0 .

) Le transfert de chaleur par rayonnement n'est pas négligeable.

) Le milieu fluide est absorbant.

III.4 Equations générales de conservation

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

➤ Équation de continuité

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

➤ Équations de quantités de mouvement suivant x

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

➤ Équations de quantités de mouvement suivant y

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

➤ Équations de quantités de mouvement suivant z

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

➤ Équation d'énergie

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

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

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

III.5 Equation représentatives pour le nanofluide

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

➤ Équation de continuité

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

➤ Équations de quantités de mouvement suivant x

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

➤ Équations de quantités de mouvement suivant y

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

➤ Équations de quantités de mouvement suivant z

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

➤ Équation d'énergie

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial(u T)}{\partial t} + \frac{\partial(v T)}{\partial t} + \frac{\partial(w T)}{\partial t} \right) = \left(\frac{k}{c} \right)_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.11})$$

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

$$n C_p n \left(\frac{\partial(\rho u T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial t} \right) = k_n \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho_n c_n}$$

Propriétés physiques du nanofluide sont exprimés par les relations suivantes d'après les modèles cités au chapitre (II) :

) **La densité volumique**

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

) **La chaleur spécifique**

D'après modèle du Pak et Cho

$$(Cp)_{nf} = (1-\varphi) (Cp)_f + \varphi (Cp)_s \text{(III.13)}$$

) **Le coefficient de dilatation volumique**

Modèle du Pak et Cho

$$\beta_{nf} = (1-\varphi) \beta_f + \varphi \beta_s \text{(III.14)}$$

) **La conductivité thermique**

Modèle de Hamilton et Crosser

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_s)\varphi}{K_s + (n-1)K_f + (K_f - K_s)\varphi} K_f \text{(III.15)}$$

) **Viscosité dynamique**

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

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \text{(III.16)}$$

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

III.6 Modèle de transfert radiatif de Rosseland

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

III.6.1 Equation de modèle Rosseland

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

$$q_r = -\frac{16}{3} n^2 T^3 \nabla T \quad (III.12)$$

est donnée par l'équation suivante

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

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

$$G = 4\sigma n^2 T^4 \quad (III.13)$$

Où n est l'indice de réfraction.

$$q_r = -\frac{16}{3} n^2 T^3 \nabla T \quad (III.14)$$

III.7 Bilan thermique du capteur hybride PV/T à base

➤ Pour le vitrage :

$$M_v C_p \left(\frac{dT_v}{dt} \right) = P_v A_v - h_r (T_c - T_v) A_v - h_v (T_a - T_v) A_v - h_c (T_p - T_v) A_v \quad (III.15)$$

Avec:

M_v : Masse du vitrage, (kg)

C_p : Chaleur spécifique du vitrage, (J/kg .K)

A_v : Surface de la vitre, (m²)

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

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

h_r : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel, (W/m².K) h_p :

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

Température du vitrage, (K)

T_a : Température ambiante(K)

T_{Pvc} : Température de la Pvc, (K)

T_{ciel} : Température du ciel (K)

La puissance absorbée par le vitrage P_v est calculée par l'équation suivante

$$P_v = p_g \times \alpha_v$$

Tel que:

P_g : représente l'intensité de rayonnement global incidentsur un plan incliné,

α_v Représente le coefficient d'absorption du vitrage

➤ **Pour la Pvc :**

$$M_{Pvc} C_p \left(\frac{dT_p}{dt} \right) = P_p \cdot A_p + h_p (T_v - T_p) A_a + h_c (T_a - T_p) A_p - Q \cdot A_p \quad (III.16)$$

Avec:

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

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

A_{Pvc} : Surface de la Pvc, (m²)

h_c : Coefficient d'échange thermique par conduction entre la Pvc et le absorbeur, (W/m².K)

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

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

$$P_p = \tau_v \times \alpha_p \times \beta_p \times P_g \quad (III.17)$$

Avec:

α_p Coefficient d'absorption de la Pvc

β_p Facteurremplissage, qui représente le rapport entre la surface couverte par les Pvc et la surface totale du module PV.

τ_v Coefficient de transmission de la vitre

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

$$Q_e = n_e \times p_g \times \beta_p \times \tau_v \quad (III.18)$$

Avec:

n_e : Rendement électrique de la Pvc

➤ **Pour l'EVA**

$$M_e C_e \left(\frac{dT_e}{dt} \right) = h_c (T_p - T_e) A_p + h_v (T_f - T_e) A_e + h_r (T_i - T_e) A_e + P_e \quad \text{III.19}$$

M_e : Masse de l'absorbeur, (kg)

C_e : Chaleur spécifique du absorbeur, (J/kg.K)

A_e : Surface de l'absorbeur, (m²)

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

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

T_f et T_i : Représentent respectivement la température du fluide et de l'isolation, (K)

La puissance absorbée par l'absorbeur P_e (W/m²)

$$P_e = \tau_v \times (1 - \beta_p) \times \alpha_e \times P_g \quad \text{III.20}$$

Avec:

α_e Coefficient d'absorption de l'absorbeur

➤ Pour l'isolant

$$M_i C_i \left(\frac{dT_i}{dt} \right) = h_v (T_f - T_i) A_i + (h_c + h_v) (T_a - T_i) A_i + h_{re} (T_e - T_i) A_i + A_i \times h_r (T_s - T_i) \quad \text{III.21}$$

Avec:

M_i : Masse de l'isolant, (kg)

C_i : Chaleur spécifique de l'isolant, (J/kg.K)

A_{bis} : Surface de l'isolant, (m²)

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

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

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

T_{sol} : Température du sol, (K)

III. 8 Les coefficients des échanges thermiques :

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

➤ L'échange thermique par conduction

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

$$h_c = \frac{k}{e}$$

Avec :

e : Epaisseur de la paroi,(m)

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

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

$$h_p = \frac{k_v}{e_v}$$

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

Le coefficient d'échange thermique par conduction entre la Pvc et l'absorbeur peut être calculé par :

$$h_c = \frac{k_p}{e_p} + \frac{k_e}{e_e}$$

k_p , k_e et e_p , e_e :Sont respectivement les conductivités thermiques et les épaisseurs de la Pvc et le absorbeur.

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

$$h_c = \frac{k_i}{e_i}$$

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

➤ L'échange thermique par rayonnement :

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitrage et le ciel

$$h_r = \sigma \varepsilon_v (T_v^4 - T_c^4) / (T_v - T_a)$$

Avec:

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

ε_v : Emissivité du vitrage

Température du ciel est évaluée par la relation suivante :

$$T_c = 0,0 \quad (T_a)^{1,5}$$

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et l'isolation

$$h_r = \sigma(T_e + T_i)(T_e^2 + T_i^2) / \left(\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_e} - 1 \right)$$

Avec :

ϵ_i et ϵ_e : Représentent respectivement l'émissivité de l'isolant et l'EVA

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol peut être calculé par :

$$h_r = \sigma \epsilon_i (T_s + T_i)(T_s^2 + T_i^2)$$

➤ L'échange thermique par convection

Les coefficients d'échange thermiques par convection sont calculés par les corrélations empiriques utilisant le nombre de Nusselt, de la conductivité thermique de l'eau et d'une longueur caractéristique de la cavité (L_c). Pour cela on a utilisé des corrélations expérimentales, en définissant le nombre de Reynold, de Prandtl et de Nusselt

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

$$h_v = h_v = N \times \frac{k_e}{L}$$

Avec:

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

L : Largeur de la cavité, (m)

$$N = 0,0 \times R_e^{0,8} \times P_r^{0,4}$$

Avec :

Pr_{eau} : Nombre de Prandtl

R_e : Nombre de Reynolds de l'eau

III.9 Procédures de Simulations

Pour obtenir une solution numérique du problème étudié, on doit transformer les équations différentielles du modèle mathématique au moyen d'un processus discrétisation en un format facile pour le processus numérique. Ce format n'est autre que le système d'équations algébriques obtenu après la discrétisation. Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis. La méthode des volumes finis est à l'origine de la majorité des codes de calculs (Fluent, CFD, ...). La méthode des volumes finis qui se distingue par sa fiabilité quant aux résultats, son adaptation au problème physique, sa garantie pour la conservation de la masse et de quantité de mouvement et de tout scalaire transportable sur chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes numériques. La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. La simulation ne remplace pas l'expérimentation mais la complète. Elle permet d'effectuer l'analyse du problème dans des conditions réalistes (reproduire des tests que l'on fait en expérimentation pour mieux les comprendre et à moindre coût).

À travers la simulation, le système étudié devient plus flexible. On peut plus facilement faire des études paramétriques. L'utilisation peut aussi faire varier l'échelle de temps pour une étude, ce qui est impossible par ailleurs, elle se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatiques. Ces derniers sont couramment appelés des environnements de simulation. Nous avons réalisé nos simulations à l'aide des logiciels de CFD Gambit et Fluent.

III.10 Présentation des logiciels Gambit et Fluent

III.10.1 Préprocesseur Gambit

C'est un préprocesseur intégré pour l'analyse en CFD (computationnel fluide Dynamics), il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques, Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

Les options de génération de maillage de Gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré. Sinon, Gambit génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite.

Le préprocesseur permet aussi de définir les conditions aux limites appropriées aux frontières du domaine de calcul.

Il existe deux méthodes possibles pour réaliser le maillage sur GAMBIT :

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

III.10.2 Code Fluent

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

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

L'ensemble géométrie et génération de maillage se fait à l'aide du logiciel Gambit qui constitue un préprocesseur livré avec Fluent.

III.10.2.1 Les avantages de fluent(CFD) :

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

III.11 Etapes principales de simulation :

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

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

III.12 Démarrage de Gambit

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant :

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

Vous pouvez créer un raccourci dans la barre des tâches. S'il y a un problème d'exécution, supprimez tous les fichiers *.lok dans le répertoire

:/Fluent.Inc/ntbin/ntx86 et relancez Gambit.exe

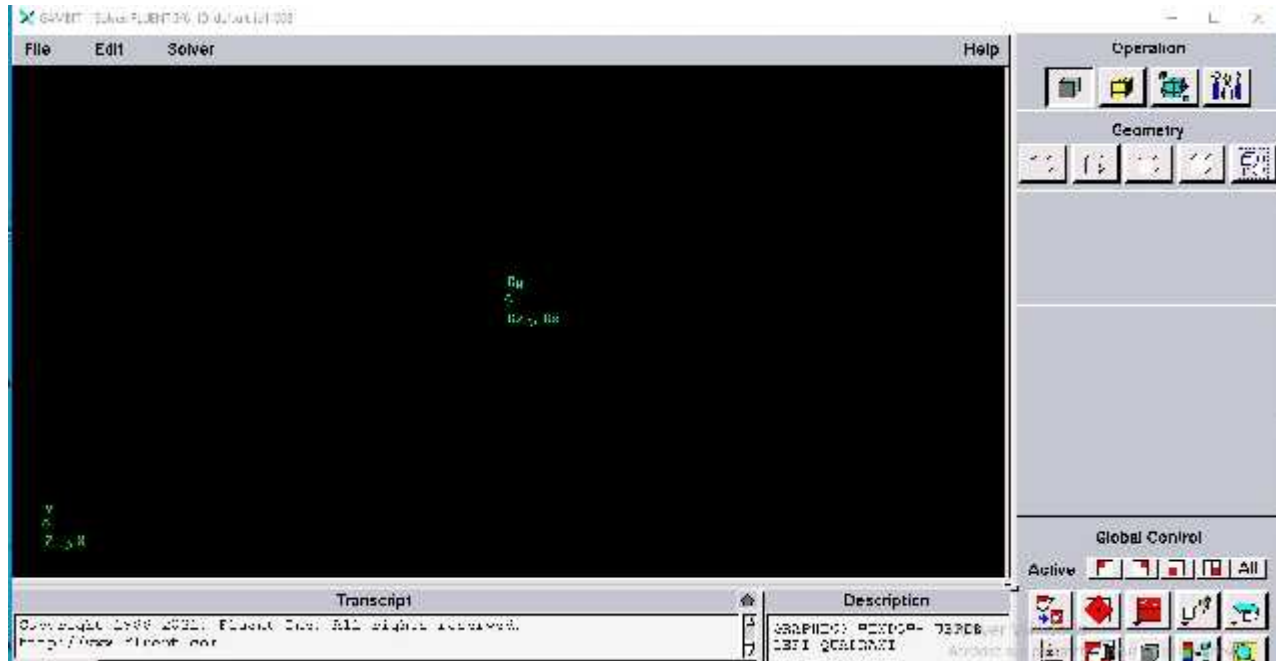


Figure III.2: Lancement du Gambit.

III.12.1 Construction de la géométrie

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

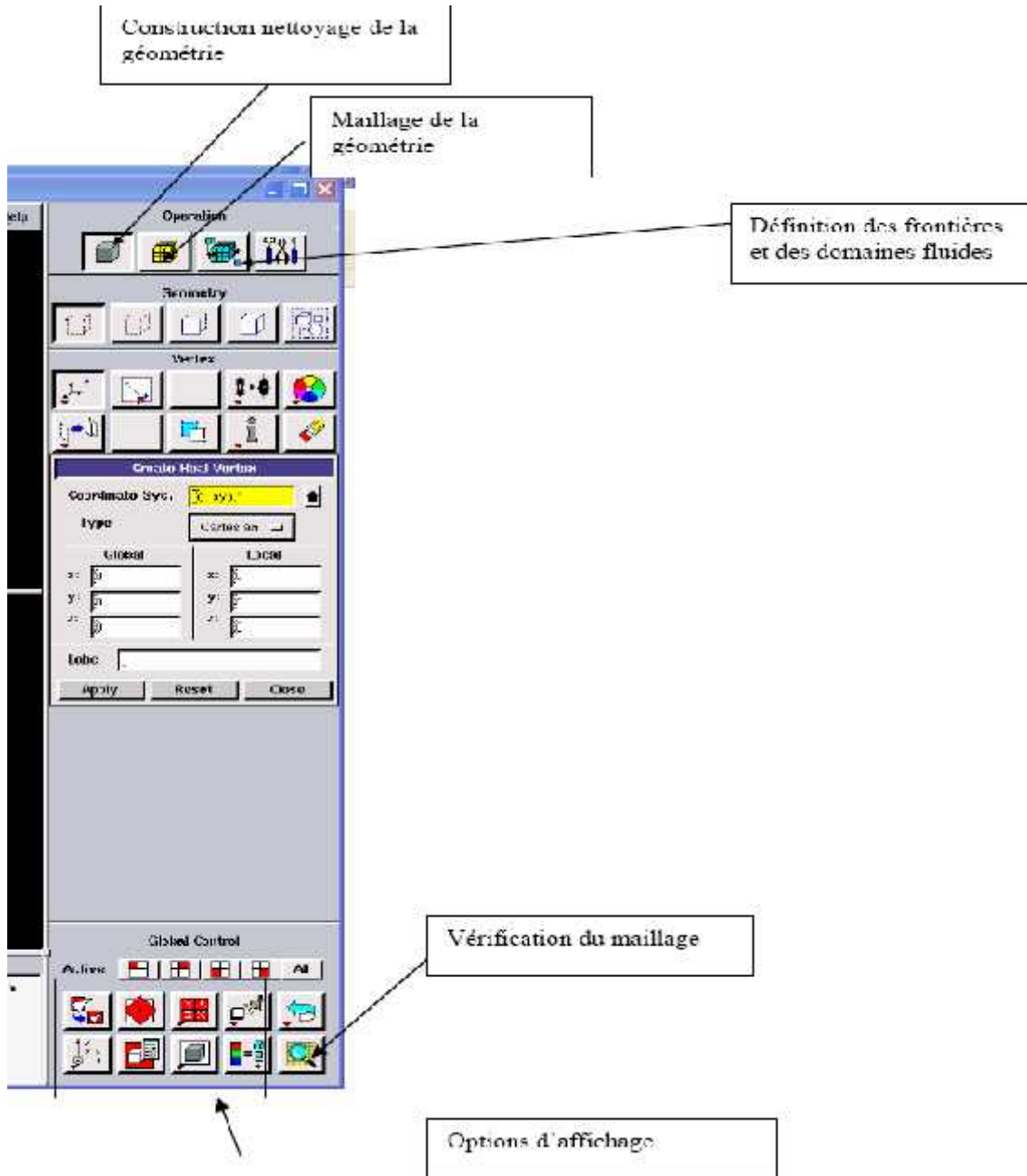


Figure III.3 : Les opérations pour construire une géométrie.

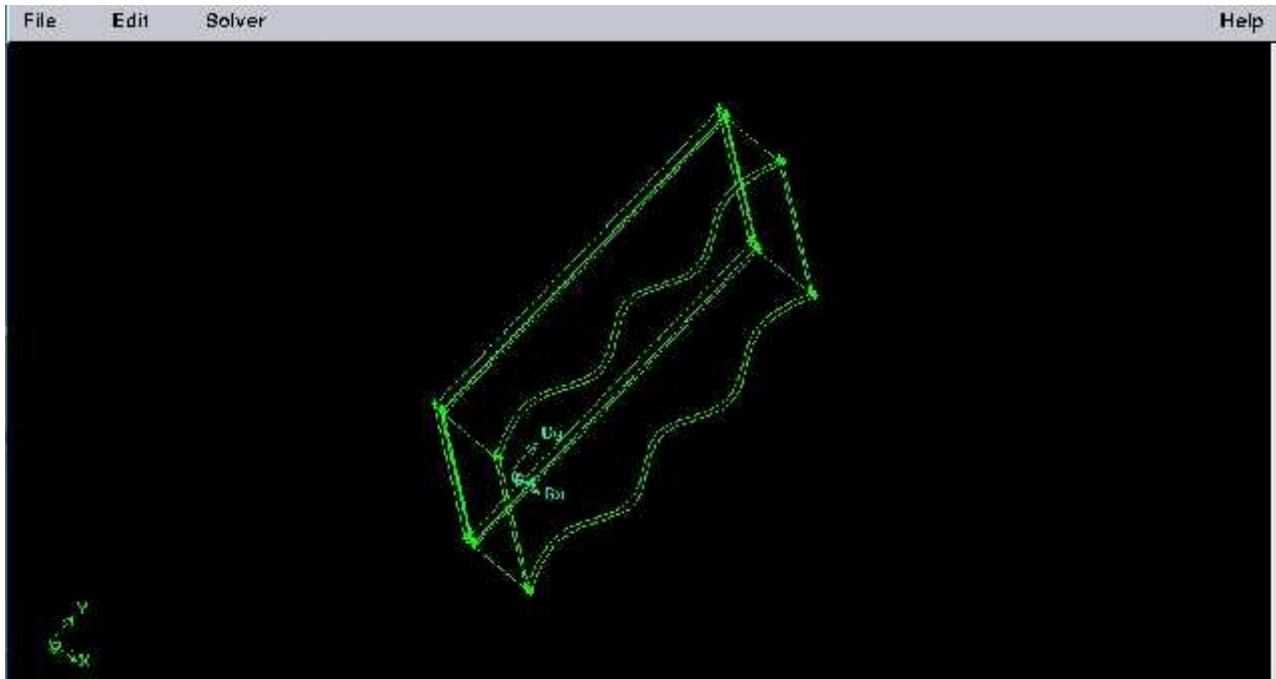


Figure III.4 :la Forme géométrique.

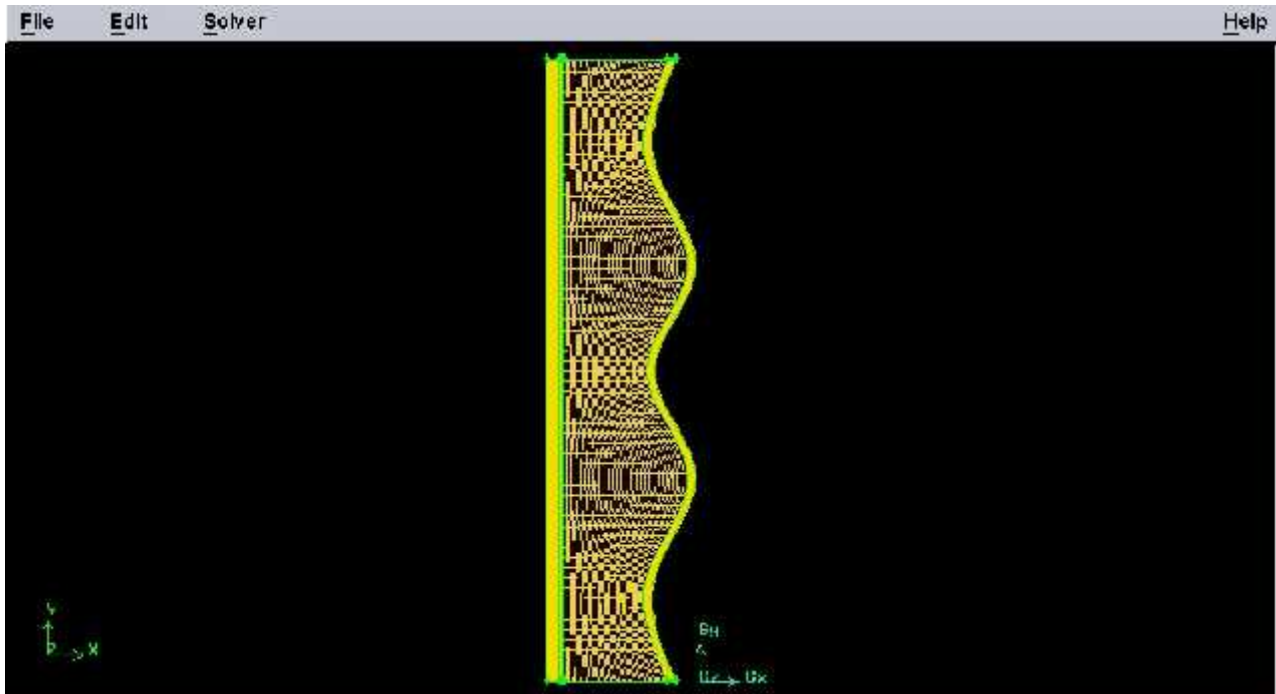


Figure III.5 : Maillage de géométrie.

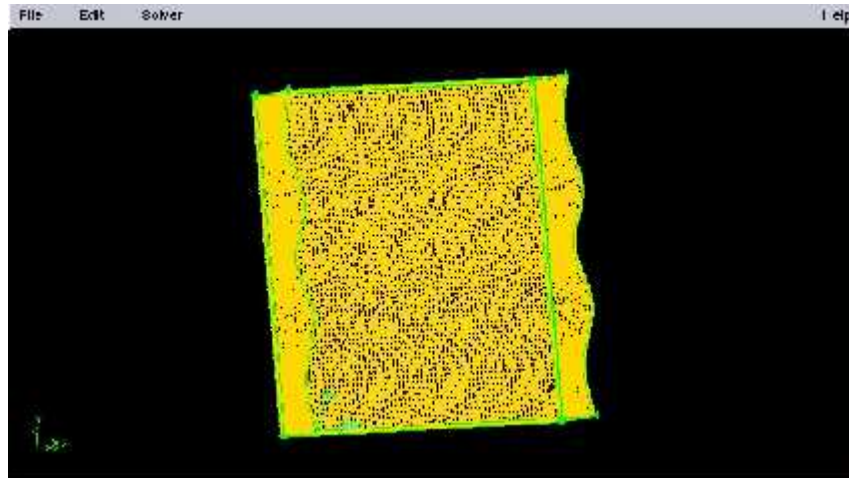


Figure III.5: Maillage de géométrie.

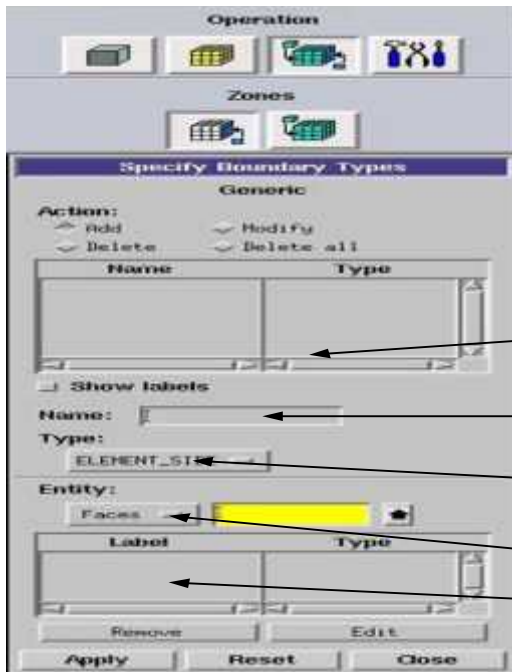
III.12.2 Conditions aux limites et définition des domaines

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

Ce menu permet de définir les conditions physiques aux limites du domaine, à savoir si les

lignes (en 2D) ou les faces (en 3D) sont des entrées, des sorties de fluide, des surfaces libres, des axes de symétries, des murs...

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



Faces ou lignes définissant la limite.
Ensembles des faces que comprend la limite
Ensembles des limites définies

Figure III.6 : Conditions aux limites.

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

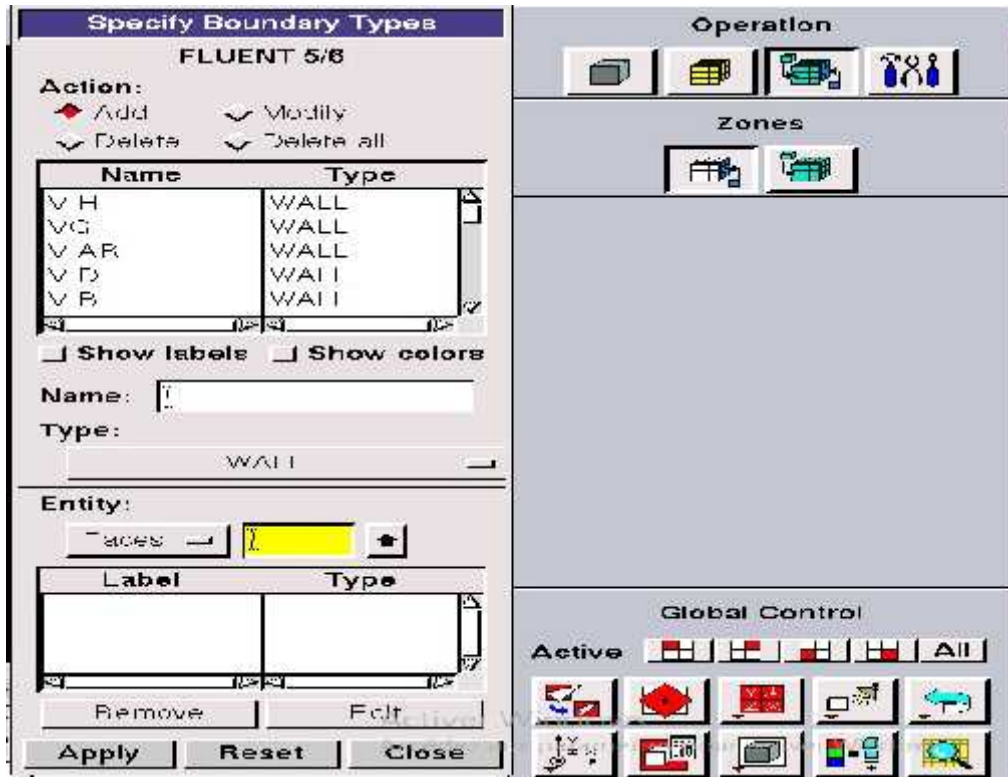


Figure III.7 : Conditions aux limites.

III.12.3 Exportation du maillage de Gambit

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

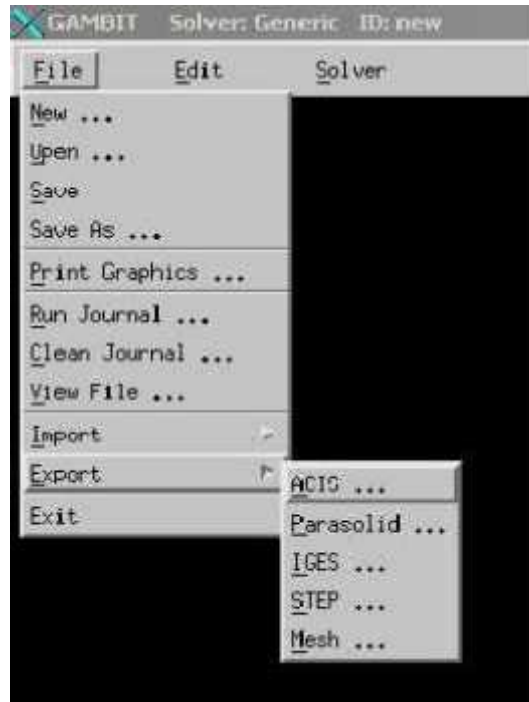


Figure III.8 : Exportation du maillage.

III.12.4 Types des fichiers qui sont créés par gambit

Quatre fichiers sont créés par défaut :

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

III.13 Simulation sous FLUENT

III.13.1 Démarrage de Fluent

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

Les étapes de simulation sous Fluent sont les suivantes :

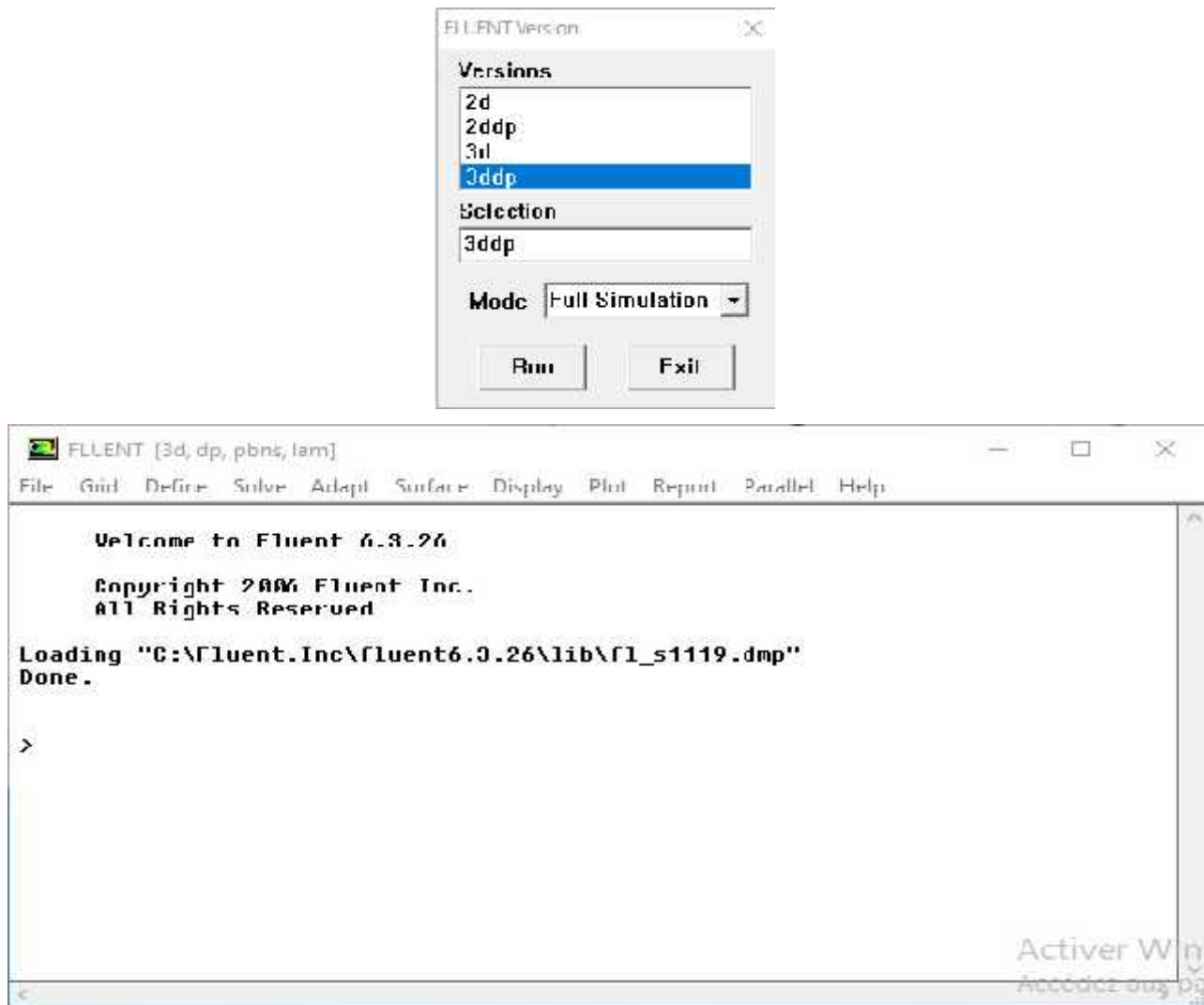


Figure. III.9: Vue globale de Fluent.

III.13.2 Importation de la géométrie (*.msh) :

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

File — - **Read** — - **Case...**



Figure. III.10: Importation de la géométrie.

III.13.3 Vérification du maillage importé :

Grid Check

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

III.13.4 Lissage du maillage (*Smooth and swap the grid*) :

Grid Smooth/Swap...

Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratiqué de lisser le maillage, cliquez sur le bouton Smooth puis sur le bouton Swap. Répétez jusqu'à ce que FLUENT affiche que zéro faces sont swappées.

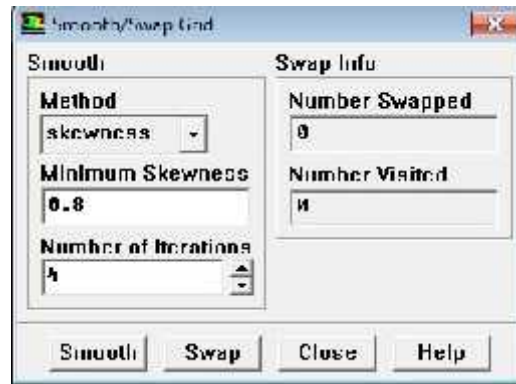


Figure. III.11 : vérifier la qualité de maillage.

III.13.5 Vérification de l'échelle : Grid — - Scale

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

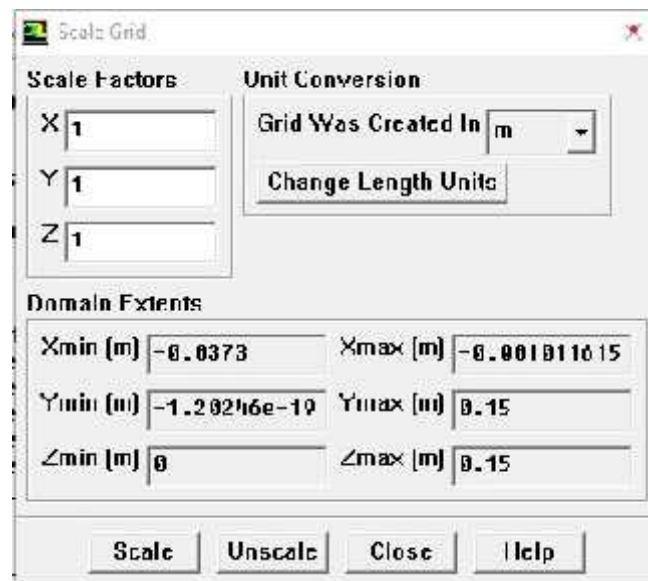


Figure. III.12: vérification de l'échelle.

III.13.6 Présentation de la géométrie :

DisplayGrid

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

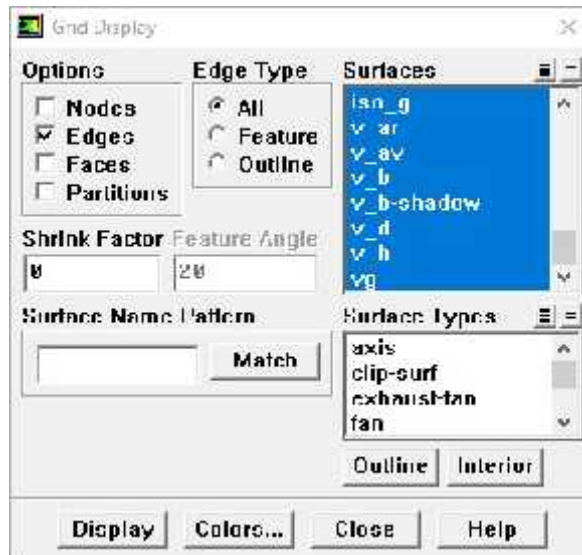


Figure. III.13: Affichage de la grille et vérification des conditions.

III.13.7 Choix du solveur :

Define Models Solver

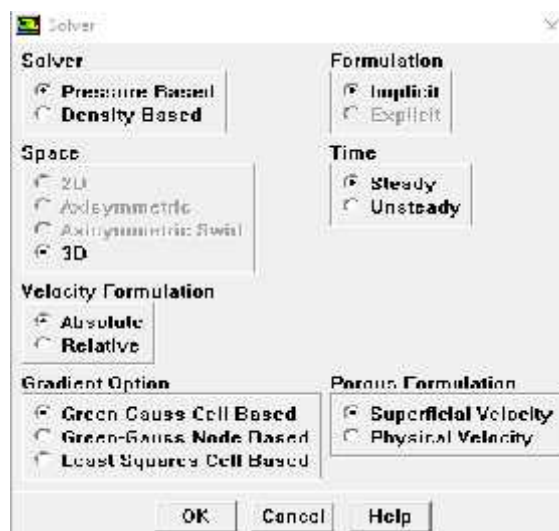


Figure. III.14: Choix de solveur.

III.13.8 Autorisation du transfert de chaleur :

Define Models Energy

Formulation de l'équation d'énergie

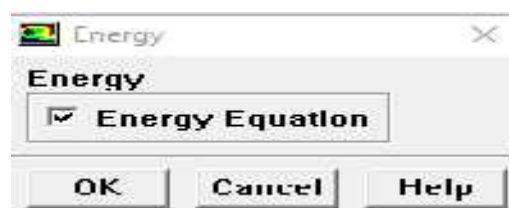


Figure. III.15: Autorisation l'équation de l'énergie.

III.13.9 Choix du type d'écoulement :

Define Models Viscous

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

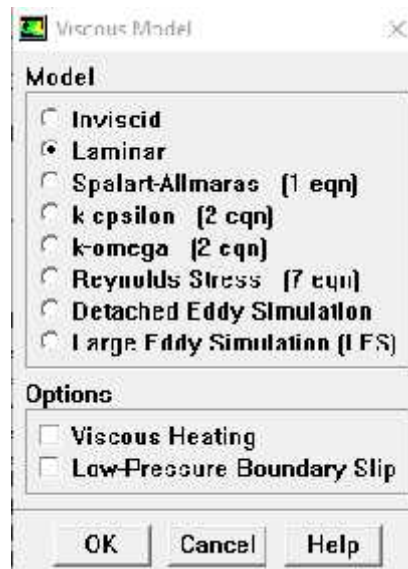


Figure. III.16: Choix du type d'écoulement

III.13.10 Choix du modèle de rayonnement

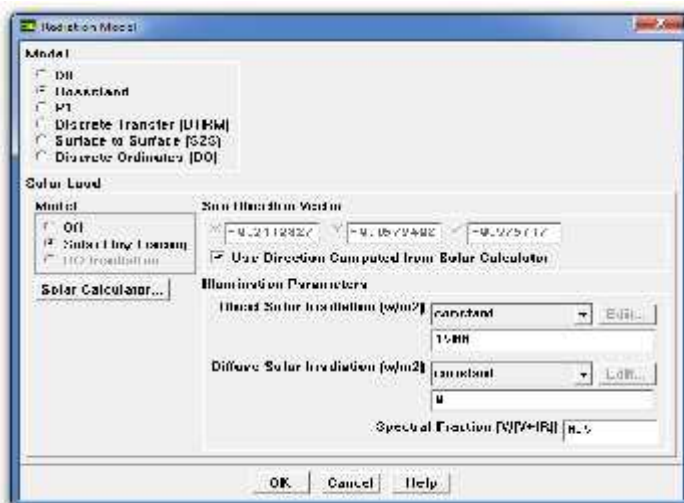


Figure. III.17: Choix du modèle de rayonnement

III.13.11 Définir la position pour le calcul solaire

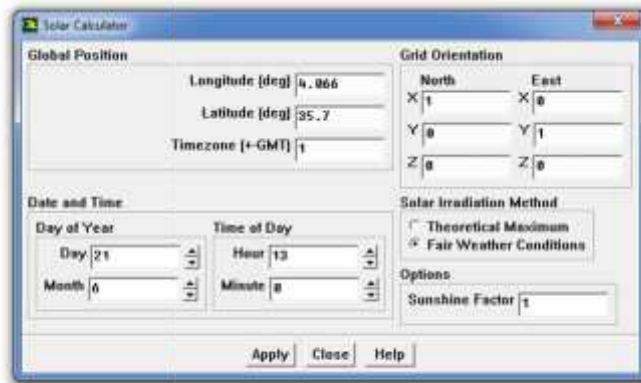


Figure. III.18: Calculs solaires

III.13.12 Définir les propriétés des matériaux :

Define Materials...

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

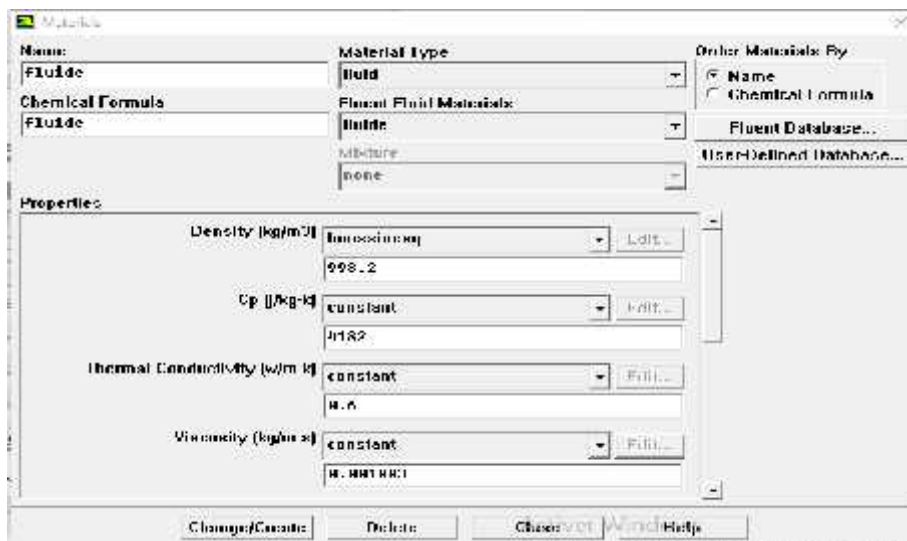


Figure. III.19: Définir les propriétés physiques des matériaux.

III.13.13 Définir les conditions aux limites :

Define Operating condition

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

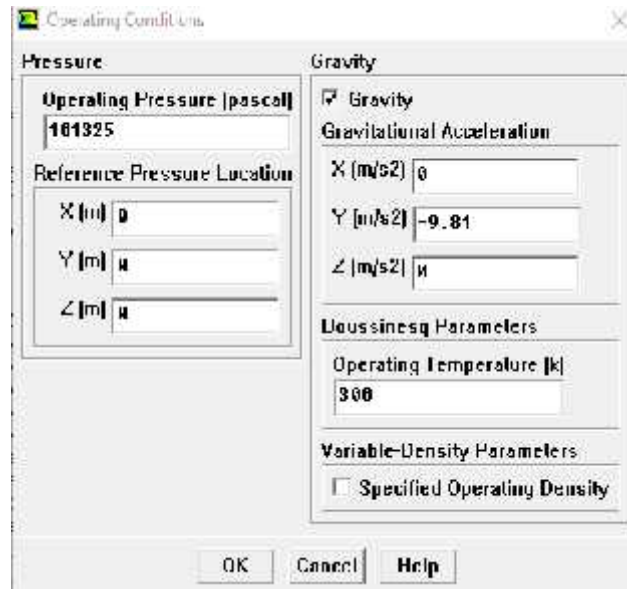


Fig. III.20: Choix de la pression de référence.

Define Boundary Conditions...

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

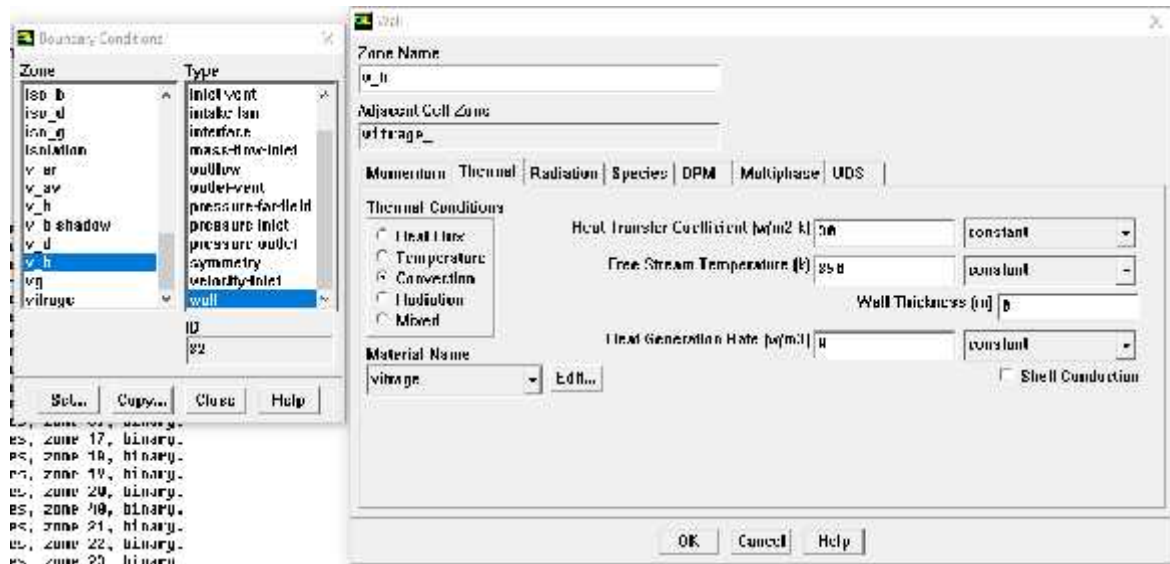


Figure. III.21: Valeurs des conditions aux limites.

III.13.14 Les facteurs de sous- relaxation :

Solve Controls Solution

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

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

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

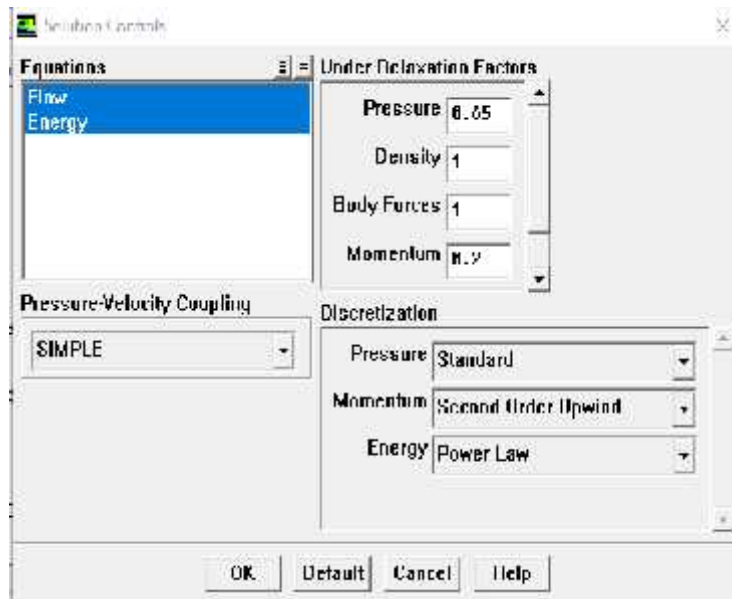


Figure.III.22 :Choix des facteurs de sous relaxation et les schémas de discrétisation

III.13.15 Initialisation du calcul :

Solve Initialize Initialize...

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

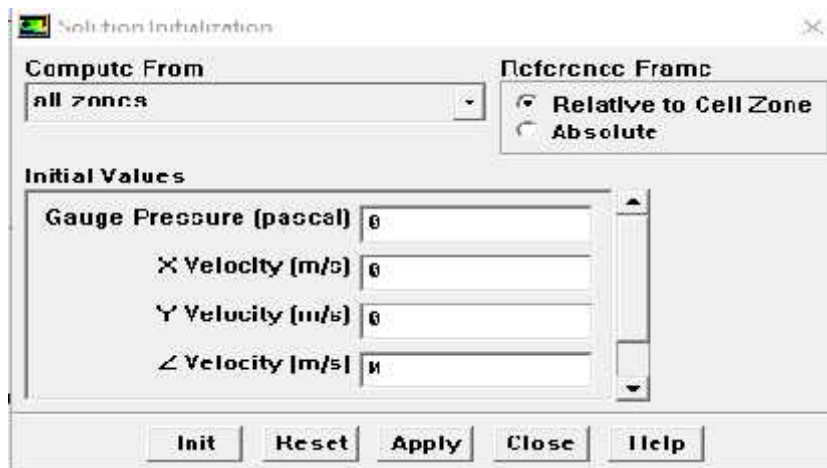


Figure. III.23: Initialisation de la solution.

III.13.16 Choix du résidu :

Solve Monitors Residual...

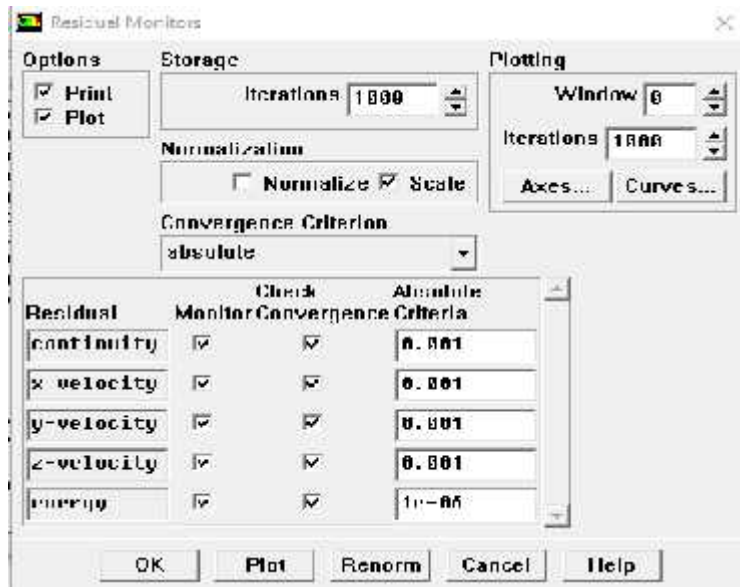


Figure.III.24 : Choix des résidus.

III.13.17 Calcul :

Solve Iterate :

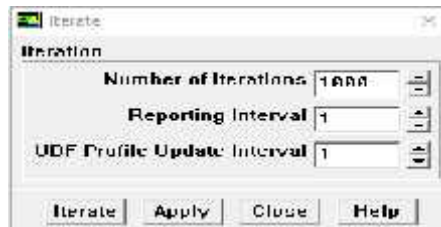


Figure. III. 25 : Choix des nombres des itérations.

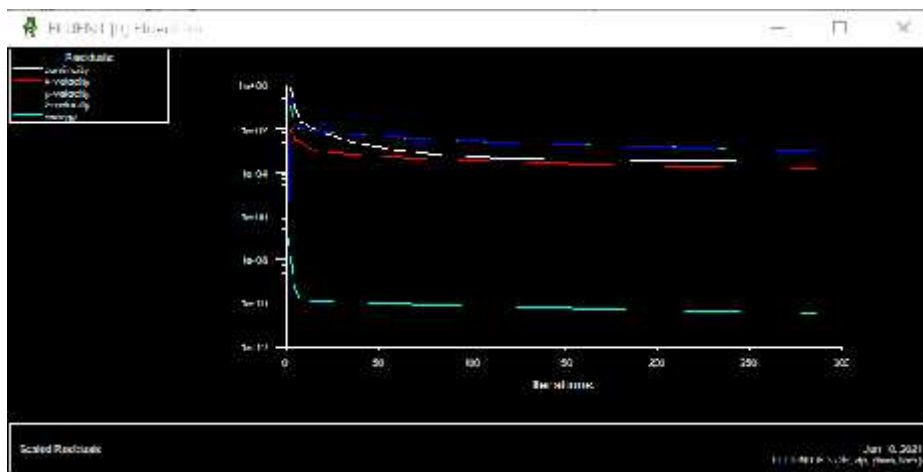


Figure. III.26 : Allure de l'évolution des résidus de calcul.

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

III.13.18 Visualisation des résultants :

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

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

III.13.19 Sauvegarde de fichier :

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

III.14 Conclusion :

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

CHAPITRE IV

Résultats et discussions

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de simulations d'un panneau photovoltaïque hybride fonctionnant avec de l'eau. Notre travail a porté sur l'étude du transfert de chaleur par convection naturelle de la cavité ondulée qui forme l'absorbeur et qui est remplie de nanofluide. Nous avons utilisé deux types de nanofluide dont le fluide de base est l'eau dans lequel nous avons ajouté des nanoparticules de Cuivre (nanofluide eau/Cu) et des nanoparticules de TiO_2 (nanofluide eau/ TiO_2).

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

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

Le fluide dans la cavité est porté à la température ambiante $T_a=300K$, le panneau photovoltaïque est soumis à un rayonnement incident $G=1500W/m^2$, la face supérieure du panneau qui est le vitrage est soumise à une température $T_v=350K$ et un coefficient de transfert de chaleur convectif $h_v=30w/m^2K$. Le panneau étant incliné d'un angle de 90° par rapport à l'horizontale.

L'objectif de ce travail est de déterminer le taux de transfert de chaleur du fluide dans la cavité en variant la concentration des nanofluides utilisés pour un nombre de Grashof $Gr=10^6$

Nous présentons pour nos résultats sous forme de contours de la température les deux nanofluides ainsi que le nombre de Nusselt pour différentes concentrations des nanoparticules.

IV.2 Propriétés physiques

Les tableaux ci-dessous montrent les propriétés thermo physiques du fluide de base l'eau et des nanoparticules TiO_2 et Cu pour des différentes concentrations.

		cp		k	μ
Eau	998.2	4182	2.1×10^{-4}	0.6	1.003×10^{-4}
Cu	8933	385	0.0000167	400	-
TiO2	4250	686	0.000018	9	-

Tableaux IV.1 : propriétés thermo physique des fluides de base et des particules solide

Q	ρ_n	c_p	β_n	k_n	μ_n
0	998.2	4182	0.00021	0.6	0.0001003
0.02	1155.818	3592.544	0.00018	0.650355	0.000936
0.04	1314.536	3147.707	0.000157	0.689259	0.00098
0.06	1473.254	2798.717	0.00014	0.729811	0.001025
0.07	1631.972	2517.609	0.000125	0.772117	0.001069

Tableaux IV.2 :propriétés thermo physique du nano fluide (l'eau/Cu).

Q	ρ_n	c_p	β_n	K_n	μ_n	
0	998.2	4182	0.00021	0.6	0.0001003	
0.02	1062.158	3899.47	0.000194	0.643669	0.000937	
0.04	1127.216	3652.207	0.00018	0.675378	0.00098	
0.06	1192.274	3431.928	0.000167	0.708181	0.001025	
0.08	1257.332	3234.444	0.000156	0.742136	0.001069	

Tableaux IV.3:propriétés thermo physique du nano fluide (l'eau/TiO2).

Tableau IV.4 : Paramètres utilisés dans les simulations.

Paramètres	Vitrage	Cellule	eva	Isolant
Coefficient d'absorption(m^{-1})	$\alpha_v=0.04$	$\alpha_c=0.9$	$\alpha_p=0.05$	-
Coefficient de transmission (m^{-1})	$\tau_v=0.9$	$\tau_c=0.09$	$\tau_e=0.01$	-
Emissivité	$\epsilon_v=0.86$	$\epsilon_c=0.7$	$\epsilon_p=0.7$	$\epsilon_i=0.7$
Épaisseur (mm)	4mm	0.3mm	0.5mm	3cm
Conductivité thermique (W.m-1.K-1)	$k_v=0.9$	$k_c=677$	$k_p=0.031$	$k_i=0.035$
Densité (kg.m-3)	$\rho_v=2200$	$\rho_c=2330$	$\rho_p=1390$	$\rho_i=24$
Chaleur spécifique (J.kg.K)	$C_v=670$	$C_c=900$	$C_p=1400$	$C_i=917$

IV.3 Choix du maillage

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui réponde à nos objectifs, parmi ces paramètres, on peut citer :

- ✓ Selon la durée des simulations
- ✓ Selon la chaleur moyenne
- ✓ Selon un nombre Nusselt moyen
- ✓ Selon Le nombre de mailles.
- ✓ Selon La distance entre les mailles (concentration des mailles).
- ✓ Selon La forme de la maille.
- ✓ Selon Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

Un maillage non uniforme adéquat a été choisi pour la résolution du problème considéré.

Pour étudier l'influence du maillage sur la résolution numérique, nous avons utilisé trois types de grilles basées sur des nombres de nœuds différents selon les directions x , y et z. (334800)_{nœuds}, (230400)_{nœuds} et (142500)_{nœuds}.

Le tableau IV.5 et figure IV.1 montrent la variation du nombre de Nusselt en fonction des nombres de nœuds de chacune des grilles de maillages.

Notre choix s'est orienté vers la grille (142500)_{nœuds} ce dernier à donné des résultats et un temps de calcul acceptables.

Gr=10 ⁶			
Maillage N _{Noeuds}	334800	230400	142500
Nu	3.49	3.609	3.61

Tableau IV.5 Variation du nombre de Nusselt en fonction des nombres de nœuds

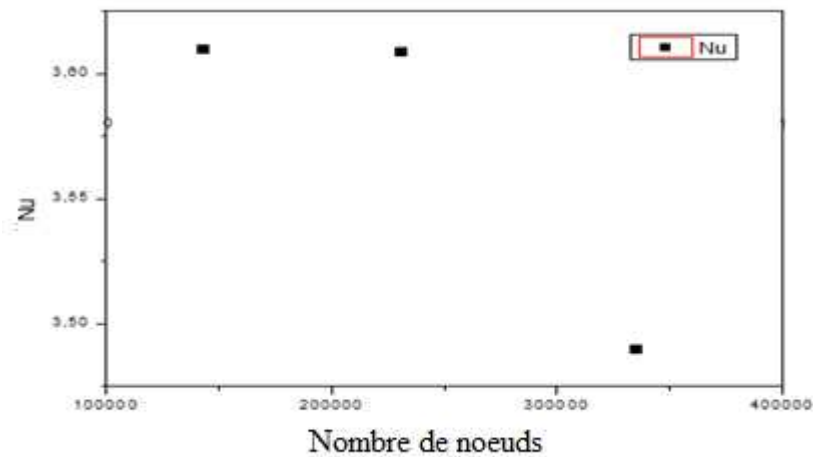


Figure IV.1 Variation du nombre de Nusselt en fonction des nombres de noeuds

IV.4 Variation des Champs de température :

Les figures IV.2, IV.3 et IV.4 montrent les contours de température du panneau pour l'eau pure ensuite pour les nanofluides (eau/Cu) et (eau/TiO₂). Ces figures montrent que la température est plus élevée dans la partie supérieure du panneau qui est le vitrage puisque ce dernier est soumis au rayonnement solaire et à une température $T_v=350K$. Ensuite cette chaleur est transmise vers la cellule, l'Eva puis le fluide et une partie est perdue par l'isolation.

La figure (IV.6), montre la variation de la température des différents éléments du panneau, pour l'eau et les deux nanofluides. Nous constatons aussi que la température la plus élevée est celle du vitrage ensuite la cellule, l'Eva puis le fluide et enfin l'isolation. En remplaçons l'eau par le nanofluide la température diminue. Le nanofluide eau/Cu donne des températures plus faibles que celle du nanofluide eau/TiO₂

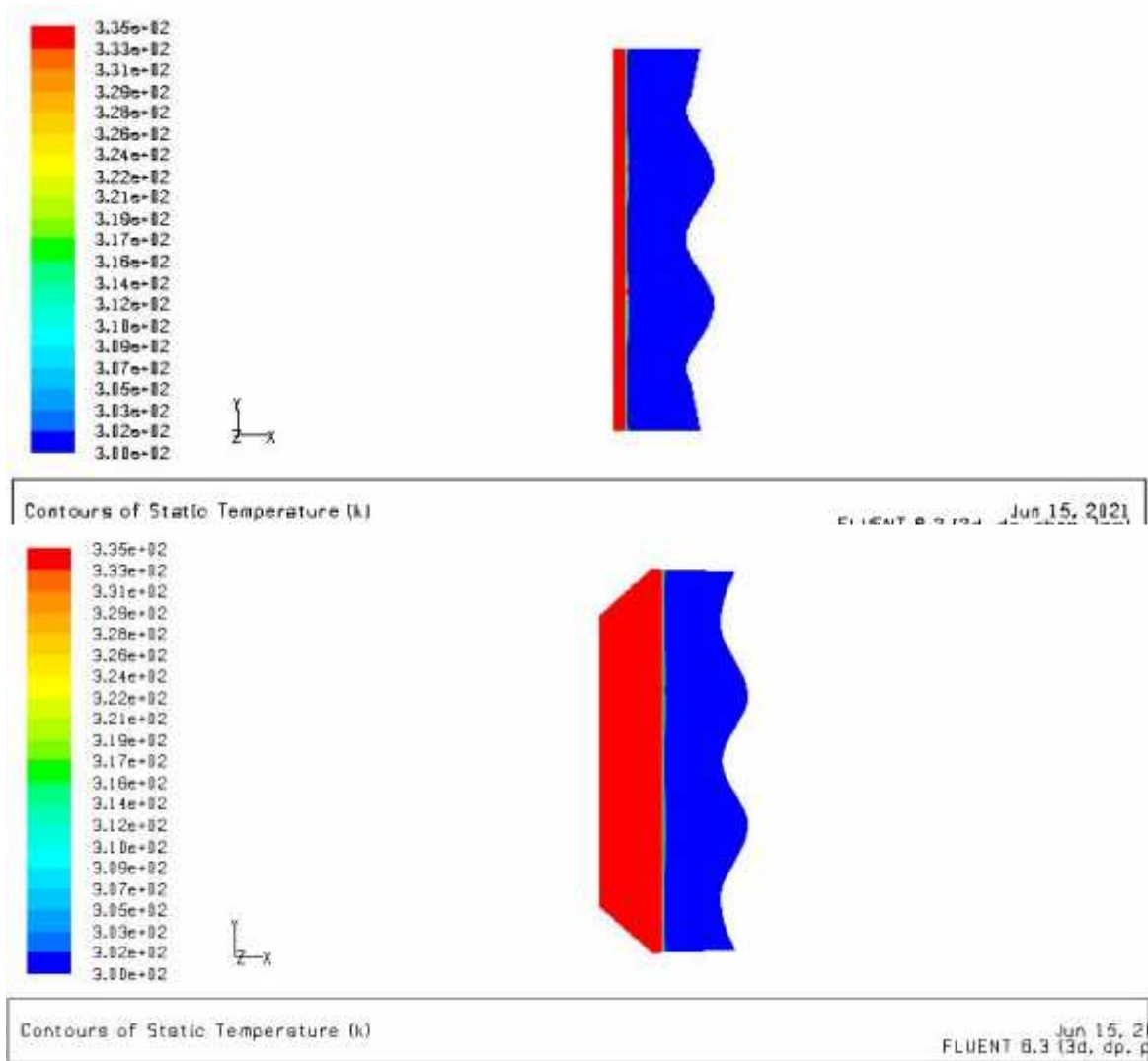


Figure IV. 2 : Les contours de la température pour l'eau dans un panneau PV/T $\phi = 0$

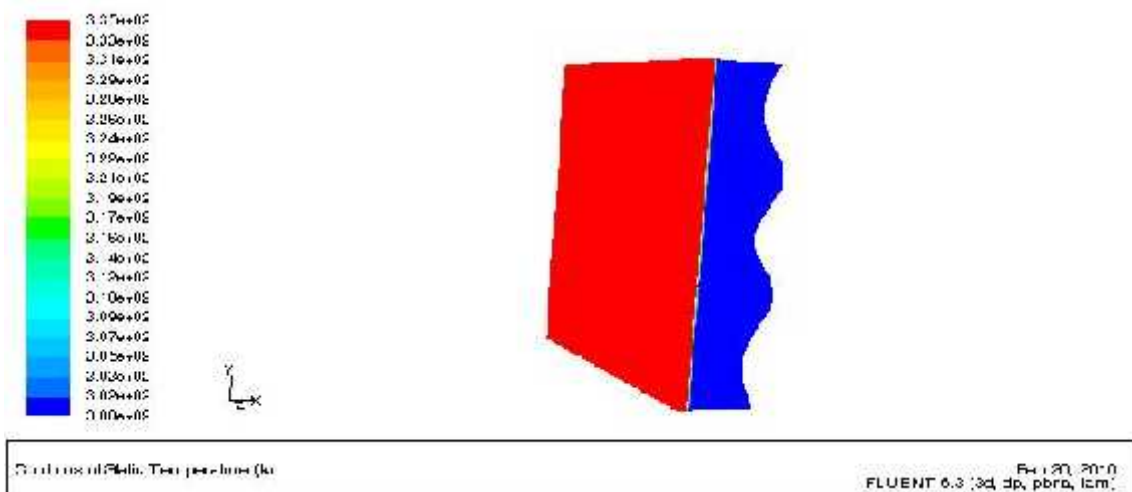


Figure IV.3 : Variation des contours de température pour, le nanofluide cuivre Cu ($\phi = 0.02$)

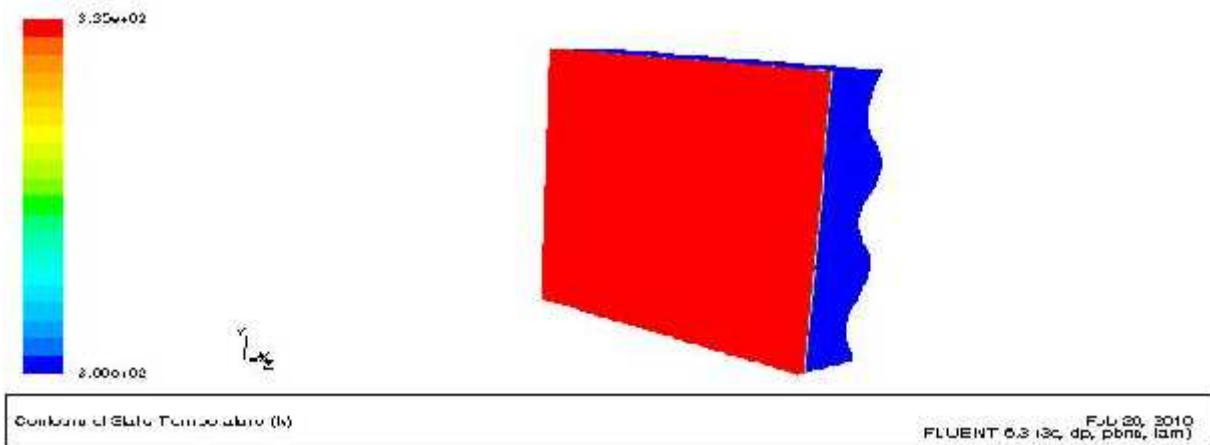


Figure IV.4: Variation des contours de température pour, le nanofluid cuiver TiO_2 ($\phi=0.02$)

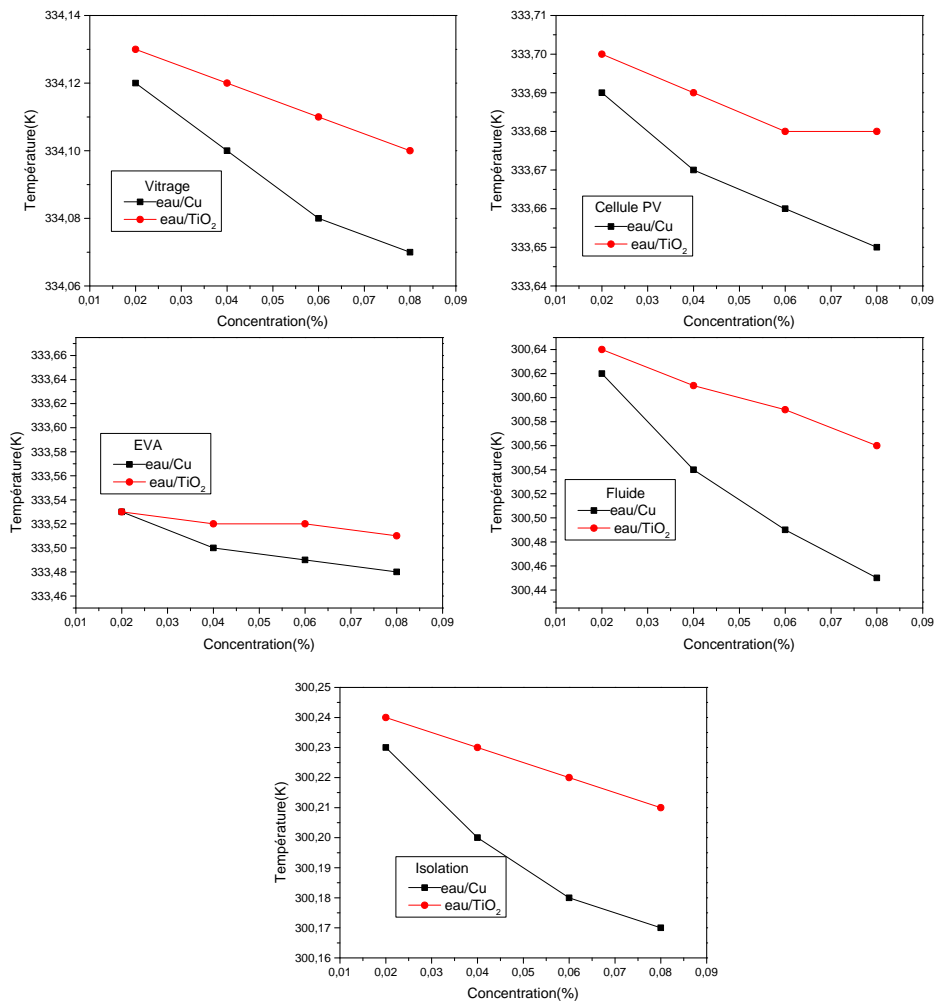


Figure IV. 5: Profils de température des éléments du panneau solaire

IV.5 Variation des champs de vitesse :

Les figures IV.6 à IV. 9 , montrent les vecteurs de vitesse du fluide dans la cavité et qui montrent que le fluide subit des rotations sous l'effet de la chaleur qui lui est transmise de l'Eva.

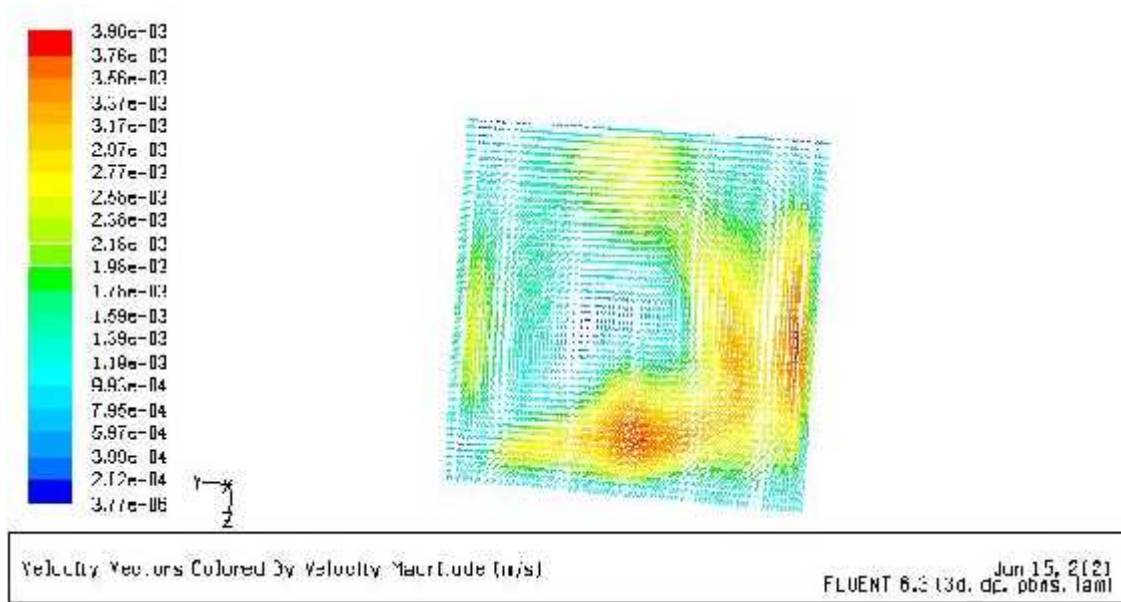


Figure IV.6: Variation de vitesse pour l'eau

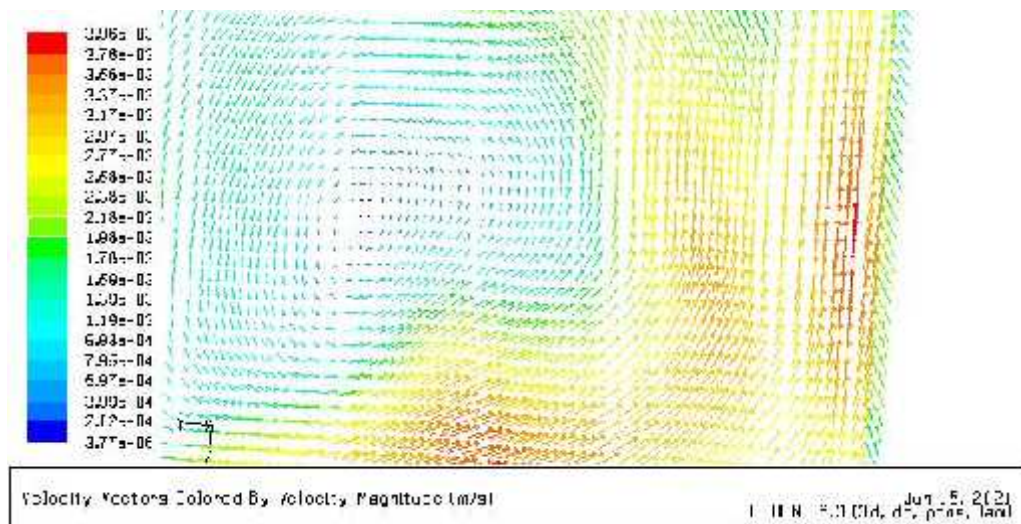


Figure IV.7 : champs de vitesse pour l'eau

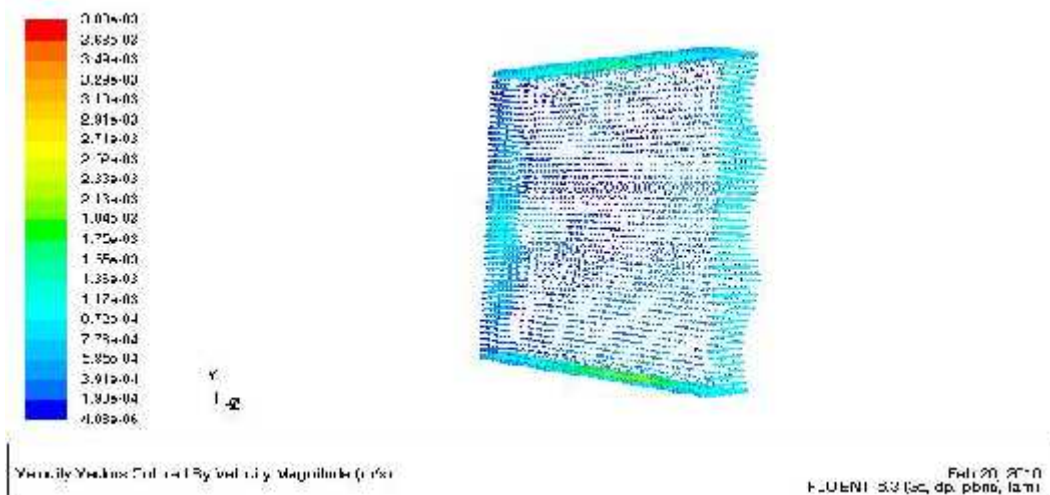


Figure IV.8 : Variation de vitesse le nanofluide Tio2

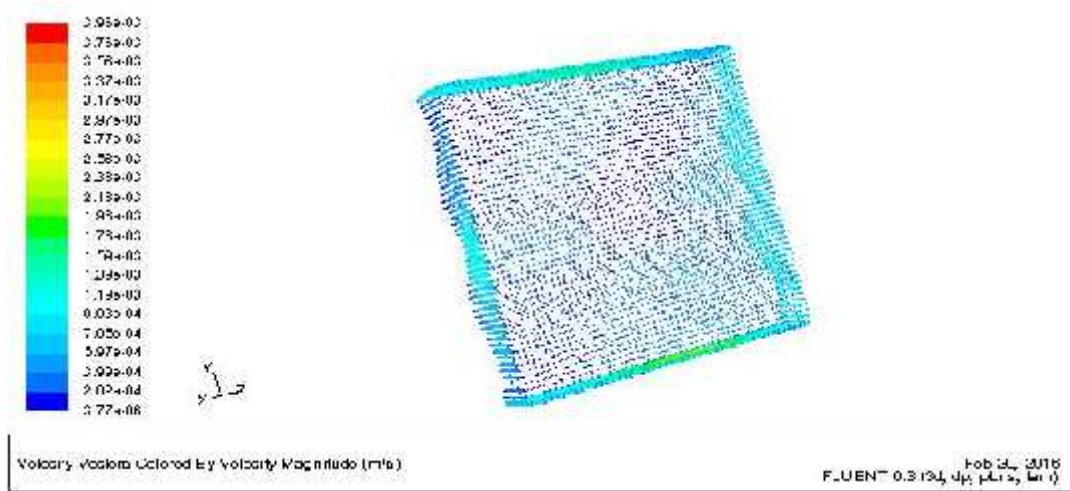


Figure IV.9 : Variation de vitesse le nanofluide CuiverCu

IV.6Le nombre de Nusselt Nu

Le nombre de Nusselt Nu montre le taux de transfert de chaleur par convection. La figure (VI.15 et VI.16), montre l'évolution du nombre de Nusselt du nanofluide eau/TiO₂ et celui de l'eau/Cu en fonction de la concentration , nous constatons que le nombre de Nusselt diminue quand la concentration augmente pour les deux nanofluides. Le nanofluide eau/Cu donne un meilleur taux de transfert de chaleur.

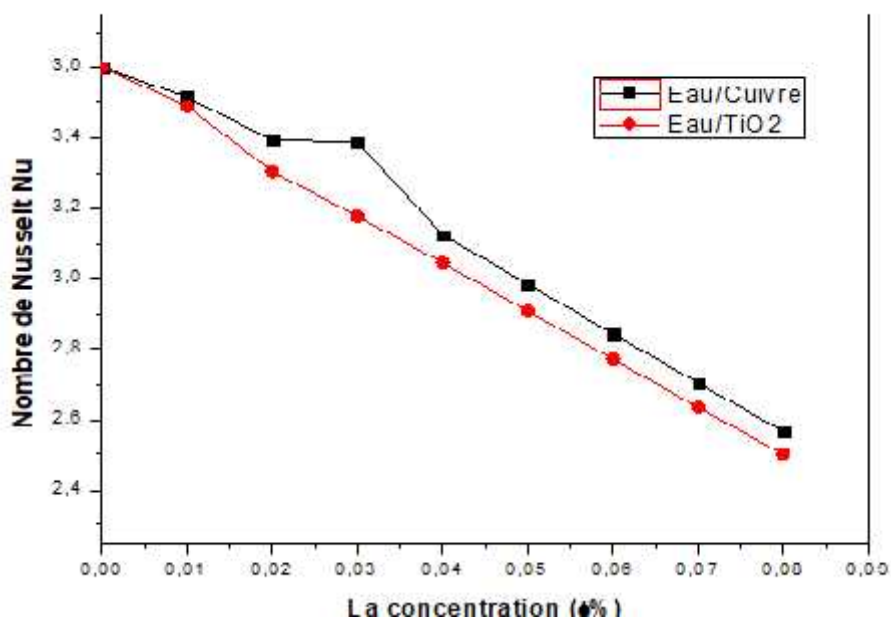


Figure IV.10: Variation de nombre de Nusselt (eau/Tio2)et (eau/Cu) en fonction de concentrations

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Dans ce mémoire nous avons étudié numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité tridimensionnelle en forme ondulée. Cette cavité est remplie d'un nanofluide qui constitue le fluide caloporteur d'un panneau photovoltaïque.

Nous avons utilisé comme outils de simulation les logiciels Gambit pour la création de géométrie et Fluent pour les calculs numériques.

L'objectif principal de ce travail est de déterminer le taux de transfert de chaleur du fluide dans la cavité en variant la concentration des nanofluides utilisés pour un nombre de Grashof $Gr=10^6$.

Les nanofluides utilisés sont constitués d'un fluide de base qui est l'eau dans lequel nous avons rajouté des nanoparticules de Cu ou de TiO_2 .

Nous avons présenté nos résultats sous forme de contours et profils de la température pour les deux types de nanofluides ainsi que le nombre de Nusselt pour différentes concentrations des nanoparticules.

Les conclusions qu'on a pu tirer de ce travail sont :

- La température des éléments du panneau PV/T est plus élevée au niveau du vitrage puis la cellule. Alors que celle du fluide et de l'isolation est faible.
- La température de tous les éléments du panneau diminue quand la concentration du nanofluide augmente.
- Le nanofluide eau/Cu a donné un meilleur taux de transfert de chaleur que celui du nanofluide eau/ TiO_2 .

Références

- [1] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [2] R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
- [3] Charles Chauliaguet : L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981 P22, 32 et p147-148.
- [4] www.google.com mots clés capteurs solaires plans.
- [5] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [6] M. Dariga « Réalisation d'un système de conversion et gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9d%C3%A9_de_Czochralski.
- [8] A.Labouret, M.Villoz « Energie solaire photovoltaïque » Dunod 3eme édition 2006.
- [9] S. ABADA ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître ès Sciences, Université laval, 2011.
- [10] K.Merzouk. Potentiel énergétique éolien, Bulletin des Energies Renouvelables, N°1, p 11, Juin. (2002).
- [11] BOURAGBI, L. (2008). Etude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).
- [12] - Faizal M, Saidur R, Mekhilef S, Alim MA. Energy, Economic and Environmental Analysis of Metal Oxides Nanofluid for Flat-Plate Solar Collector. Energy Conversion and Management 76 (2013) PP.162–168.
- [13] Anas Al Tarabsheh, Spyros Voutetakis, Athanasios Papadopoulos, Panos Seferlis, Issa Etiera, Omar Saraereh, Investigation of Temperature Effects in Efficiency Improvement of Non Uniformly Cooled Photovoltaic Cells, Chemical Engineering Transactions (2013) Vol. 35.
- [14] A. Muzaffar, Hafiz.M. Ali, W. Moazzam, and M. Babar Saeed, Performance enhancement of PV cells through micro-channel cooling, AIMS Energy (2015) 3(4), pp. 699-710.
- [15] S. Nizetic, D. Čoko, A. Yadav, F. Grubišić-Čabo, Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel : The performance response, Energy Conversion and Management (2016)108, pp. 287–296.
- [16] S. Iqbala, S. Afzal, A. U. Mazhar, H. Anjum, A. Diyyane, Effect of Water Cooling on the Energy Conversion Efficiency of PV Cell, American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences 'ASRJETS' (2016).
- [17] S. Jakhar, Manoj S. Soni and N. Gakkhar, Parametric modeling and simulation of photovoltaic panels with earth water heat exchanger cooling, Geothermal Energy (2016).
- [18] K. Sukarno, A. H. Ag Sufiyan, H. Razali, J. Dayou, Evaluation on Cooling Effect on Solar PV Power Output Using Laminar H2O Surface Method, International Journal Of Renewable Energy Research (2017).

Références

- [19] KHEBCHI Abderrahman, Optimisation de l'écoulement forcé dans la veine d'air d'un capteur solaire plan à air pour une performance dynamique et thermique, Université AboubakrBelkaïd –Tlemcen, 2017.
- [20] Karrassalima, « étude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur », thèse de magister en physique spécialité : physique énergétique option : photo thermique- université mentouri de Constantine, 2009.
- [21] Saadi souad « effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan » université mentouri de Constantine ; 2010.
- [22] B1. Bang, I., C., Chang, S., H. (2005) : boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃- Water nanofluids from a plan surface in a pool, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 2407-2419.
- [23] R Ribeiro J., P., Gruss J., A. (2009) : Nanofluides pour les applications thermiques, technique de l'ingénieur, 2ème édition
- [24] Gladés Bachir. 14 Octobre 2010 : Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard. L'Université Toulouse III- Paul Sabatier.
- [25] - A. Einstein. Investigations on the Theory of the Brownian Movement. Dover Publications, New York, (1956).
- [26] - H.C. Brinkman. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution. J. Chem. Phys, 20 1952) pp.571–581.
- [27] G.K. Batchelor. Brownian Diffusion of particles with Hydrodynamic Interaction. Journal of Fluid Mechanics, 74(1) : 1-29, 1976.
- [28] J.C. Maxwell. A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., 1891.
- [29] R.L. Hamilton and O.K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 1(3), 187-191, 1962.
- [30] Y. Xuan and Q. Li. Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of Heatfluid flow, 21(1), 58–64, 2000.
- [31] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, and J.A. Eastman. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. ASME J. Heat Transfer, 121, 280-289, 1999.
- [32] D.P.H. Hasselman, and L.F. Johnson. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal Barrier resistance. Journal of composite Materials, 21(6): 508-515, 1987.
- [33] O.M. Wilson, X.Y. Hu, D.G. Cahill, and P.V. Braun. Colloidal metal particles as probes of nanoscale thermal transport in fluids. Physical Review B, 66(22), 2002.
- [34] W. Yu and S.U.S. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. J. nanoparticle Res 5 : 16771, 2003.
- [35] P. Keblinski, J.A. Eastman, and D.G. Cahill. Nanofluids for thermal transport. Materials today, 8, 36, 2005.
- [36] - B.C. Pak and Y.I. Cho. Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles. Experimental Heat Transfer, 11(1998) pp.151–170.

Références

- [37] J. Kim, Y.T. Kang, and C.K. Choi. Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids. *Physics of Fluids*, 16(7) : 2395-2401, 2004.
- [38] Pak BC, Cho IY. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer* 1998 ;11 :151–70.
- [39] Xuan Y, Li Q. Investigation of convective heat transfer and flow features of nanofluids. *Journal of Heat Transfer* 2003 ;125(1) :151–5
- [40] Yang YZ, Zhang G, Grulke EA, Anderson WB, Wu G. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2005 ;48(6) :1107–16.
- [41] Maiga S, Palm SJ, Nguyen CT, RoyG, Galanis N. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2005 ; 26 :530–46.
- [42] MaigaSEB, NguyenCT, GalanisN, RoyG, Mare´ T, Coqueux M. Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al₂O₃ nanoparticle suspension. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow* 2006 ; 16(3) :275–92.
- [43] Velagapudi, V., Konijeti, R. K. And Aduru, C. S. K. "Empirical Correlations to Predict Thermo physical And Heat Transfer Characteristics of Nanofluids." *Thermal Science*, (2008)12(2), 27-37.
- [44] Duangthongsuk W, Wongwises S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂–water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2010 ;53 :334–44.
- [45] Vajjha RS, Das DK, Kulkarni DP. Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2010 ; 53 :4607–18.
- [46] M. Hojjata, S.Gh. Etemada, R. Bagheria, J. Thibaultb. Rheological characteristics of non-Newtonian nanofluids: Experimental investigation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Volume 38, Issue 2, February 2011, Pages 144–148
- [47] Sajadi AR, Kazemi MH. Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2011 ;38 :1474–8.
- [48] Godson A sirvatham L, Raja B, Lal DM, Wongwises S. Convective heat transfer of nanofluids with correlations. *Particuology* 2011 ;9 :626–31.
- [49] Mansour RB, Galanis N, Nguyen CT. Experimental study of mixed convection with water–Al₂O₃ nanofluid in inclined tube with uniform wall heat flux. *International Journal of Thermal Sciences* 2011 ;50(3) :403–10.
- [50] V. Bianco, F. Chiacchio, O. Manca, S. Nardini. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 3632–3642.

Références

- [51] Otanicar TP, Golden JS. Comparative environmental and economic analysis of conventional. *Environmental Science and Technology* 2009 ;43 :6082–7.
- [52] Taylor RA, Phelan PE, Otanicar TP, Walker CA, Nguyen M, Trimble S, et al. Applicability of nanofluids in high flux solar collectors. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2011 ; 3 :023104–15.
- [53] Lu L, Liu Z-H, Xiao H-S. Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluids for high temperature evacuated tubular solar collectors : Part1 : Indoor experiment. *Solar Energy* 2011 ; 85 :379–87.
- [54] He Y, Wang S, Ma J, Tian F, Ren Y. Experimental study on the light-heat conversion characteristics of nanofluids. *Nanoscience and Nanotechnology Letters* 2011 ; 3 :494–6.
- [55] Khullar V, Tyagi H, Phelan PE, Otanicar TP, Singh H, Taylor RA. Solar energy harvesting using nanofluids-based concentrating solar collector. In : *Proceedings of the MNHMT 2012 3rd micro/nanoscale heat & mass transfer international conference on March3–6, Atlanta, Georgia, USA ; 2012.*
- [56] Chougule SS, Pise AT, Madane PA. Performance of nanofluid-charged solar water heater by solar tracking system. In : *International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM). Nagapattinam, TamilNadu, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2012.p.247–53.*
- [57] Yousefi T, Shojaeizadeh E, Veysi F, Zinadini S. An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Solar Energy* 2012 ; 86 :771–9.
- [58] Liu Z-H, Hu R-L, Lu L, Zhao F, Xiao H-s. Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluid for evacuated tubular high temperature air solar collector. *Energy Conversion and Management* 2013 ; 73 :135–43.
- [59] Risi Ad, Milanese M, Laforgia D. Modelling and optimization of transparent parabolic trough collector based on gas-phase nanofluids. *Renewable Energy*; 2013; 58:134–9.
- [60] Tiwari AK, Ghosh P, Sarkar J. Solar water heating using nanofluids—a comprehensive overview and environmental impact analysis. *International journal of Emerging Technology and Advances Engineering* 2013.
- [61] T. Sokhansefat, A.B. Kasaeian, F. Kowsary. Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33(2014)636–644.

Résumé

Dans ce travail on a mené une étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans une panneau photovoltaïque hybride, constituée d'une cavité de forme ondulée contenant un nanofluide. Chauffée par une température constante et remplie d'un mélange d'eau et de nanoparticules (Cu et TiO₂).

Nous avons utilisé comme outils de simulation les logiciels Gambit pour la création de géométrie et Fluent pour les calculs numériques. L'objectif principal de ce travail est de déterminer le taux de transfert de chaleur du fluide dans la cavité en variant la concentration des nanofluides utilisés pour un nombre de Grashof $Gr=10^6$. Les conclusions qu'on a pu tirer de ce travail sont : La température des éléments du panneau PV/T est plus élevée au niveau du vitrage puis la cellule. Alors que celle du fluide et de l'isolation est faible ; La température de tous les éléments du panneau diminue quand la concentration du nanofluide augmente ; Le nanofluide eau/Cu a donné un meilleur taux de transfert de chaleur que celui du nanofluide eau/TiO₂.

Mots clés : les nanofluides, convection naturelle, panneau photovoltaïque hybride, CFD Fluent

Abstract

In this work, a numerical study of stationary laminar natural convection was carried out in a hybrid photovoltaic panel, consisting of a wavy-shaped cavity containing a nanofluid. Heated by a constant temperature and filled with a mixture of water and nanoparticles (Cu and TiO₂). We used as simulation tools the software Gambit for the creation of the geometry and Fluent for the numerical simulations. The main objective of this work is to determine the heat transfer rate of the fluid in the cavity by varying the concentration of the nanofluids used for a Grashof number $Gr = 10^6$. The conclusions that have been drawn from this work are: The temperature of the PV / Tpanel elements is higher at the level of the glazing then the cell. While that of fluid and insulation is low. The temperature of all the elements of the panel decreases when the concentration of the nanofluid increases; The water / Cu nanofluid gave a better heat transfer rate than that of the water / TiO₂ nanofluid.

Keywords: nanofluids, natural convection, hybrid photovoltaic panel. CFD Fluent

في هذا تم إجراء دراسة عددية للحمل الحراري الطبقي الطبيعي الثابت في لوحة كهروضوئية هجينة ، تتكون من تجويف موج الشكل يحتوي على مائع نانوي. يسخن بدرجة حرارة عشوائية ويمتلئ

Gambit

(TiO₂. Cu) النانوية والجسيمات

الهندسة وطلاقة للحسابات العددية. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحديد معدل انتقال الحرارة للسائل

في التجويف عن طريق تغيير تركيز السوائل النانوية المستخدمة لعدد $Gr = Gr_{hof}$

10^6 الاستنتاجات التي تم استخلاصها من هذا العمل هي: - يكون التقاط عناصر لوحة PV / T

مستوى التزجيج ثم الخلية. في حين أن السائل والعزل منخفض؛ تنخفض درجة حرارة جميع عناصر

اللوحة عندما يزداد تركيز المائع النانوي ؛ أعطى الماء /

TiO₂ nanofluid. /

الكلمات المفتاحية: السوائل النانوية، الحمل الحراري الطبيعي، الألواح الكهروضوئية الهجينة CFD.

Fluent,