



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 :

CHERHABIL Tarek & BELFAR Abdelbassit

Thème

ETUDE NUMERIQUE DE L'AMELIORATION DU TRANSFERT THERMIQUE DANS UN CAPTEUR SOLAIRE CYLINDRO- PARABOLIQUE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Benkharbache Souad	MCA	Président
Bakhti Fatima Zohra	MCA	Encadreur
Bouaouina Lalouani	MCB	Examinateur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2022

REMERCIEMENT

A la fin de ce modeste travail nous adressons nos remerciements premièrement à ALLAH tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'études.

Et tous les enseignants qui ont contribué à notre enseignement pendant toutes les années scolaires. Nos remerciements s'adressent à BAKHTI.F pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour son suivi continu pendant la préparation de ce Mémoire.

Sommaire

Remerciement	
Sommaire	
La liste des figures	
La liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	1
Chapitre I: Revue bibliographique	3
I.1. Introduction	4
I.2. Généralités sur le soleil et la terre	4
I.2.1. Soleil	4
I.2.2. Caractéristiques du soleil	4
I.2.3. Température du soleil	5
I.2.4. Origine	5
I.2.5. La constante solaire C	6
I.2.6. La Terre	6
I.2.7. Mouvements de la terre autour du soleil	7
I.2.8. Mouvement du soleil	8
I.3. Rayonnement solaire	9
I.4. Les composantes du rayonnement solaire	9
I.4.1. Rayonnement direct (D)	9
I.4.2. Rayonnement diffus(S)	10
I.4.3. Albédo	10
I.4.4. Le rayonnement global(G)	10
I.5. Position du soleil par rapport à la terre	11
I.5.1. Coordonnées célestes	11
I.5.1.a. Sphère céleste	11
I.5.1.b. Coordonnées célestes horaires	11
I.5.2. Coordonnées géographiques	12
I.5.2.1. La longitude (L)	12
I.5.2.2. La latitude (L)	12
I.5.2.3. L'altitude (φ)	12
I.5.3. Coordonnées horizontales	12
I.5.3.1. La hauteur du soleil (h)	12
I.5.3.2. L'azimut(a)	13
I.6. Les temps solaires	13
I.6.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)	14
I.6.2. Le temps solaire moyen (T.S.M)	14
I.6.3. Le temps universel (TU)	14
I.6.4. Le temps légal (TL)	14

I.7. Gisement solaire	14
I.7.1. Le gisement solaire en Algérie	15
I.7.2. Importance du gisement solaire Algérien	17
I.8. Les capteurs solaires	18
I.8.1. Définition	18
I.8.2. Différents types de capteurs solaires	18
I.8.2.a. Capteurs solaires photovoltaïques :	18
I.8.2.b. Capteurs solaires thermiques :	18
I.8.2.c. Concentrateurs solaires :	18
I.8.3. Les capteurs photovoltaïques	19
I.8.3.1. Principe de fonctionnement	19
I.8.4. Capteurs solaire thermiques	19
I.8.4.1. Principe	19
I.8.4.2. Différents types de capteurs solaires thermiques	20
I.8.4.2.a. Capteurs solaires plans :	20
I.8.4.2.b. Capteurs à tubes sous vide	21
I.8.4.2.c. Capteurs solaires à concentration :	22
I.8.4.2.d. Capteurs solaires hybrides :	22
I.8.4.3. Les capteur cylindro-parabolique	22
I.8.4.3.1. Définition	22
I.8.4.3.2. Dimensionnement d'un capteur cylindro-parabolique	23
I.8.4.4. Les capteurs paraboliques	24
I.9. Différents modes de transfert de chaleur dans capteur cylindro-parabolique	24
I.9.1. Conduction à travers l'absorbeur :	25
I.9.2. Conduction à travers l'absorbeur :	25
I.9.3. Le rayonnement à travers le verre :	25
I.10. Généralités sur les nano fluides	26
I.10.1. Définition :	26
I.10.2. Types des nanoparticules :	27
I.10.3. Préparation des nanofluides:	28
I.10.4. Les applications des nano fluides :	29
I.10.5. Autres applications:	30
I.10.5. Les avantages et les inconvénients	30
I.10.5.1 Les avantages des nanofluides :	30
I.10.5.2 Les inconvénients des nano fluides :	31
I.10.6 Caractéristiques thermo-physiques des nanofluides	31
I.10.6.1 Fraction volumique (ϕ)	31
I.10.6.2. La masse volumique	31
I.10.6.3. La conductivité thermique :	32
I.10.6.4. Viscosité dynamique des nanofluides :	33
I.10.6.5. Chaleur spécifique :	35
I.6.6.12. Modèle de Xuan (2000):	35

I.10.6.6. Coefficient d'expansion thermique :	35
CHAPTER II : FORMULATION MATHÉMATIQUE	36
II-1 Introduction	37
II-2 Les géométries du problème étudié	37
II.3 Hypothèses simplificatrices	38
II.4. Les équations gouvernantes du problème étudié	39
II.4.1. Equation de continuité	39
II.4.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement	39
II.5. Modèle de radiation	40
II.6. Equation de transfert radiatif	41
II.7. Les équations du modèle Rosseland	42
II.8. Conditions aux limites:	42
II.9. Calcul des Grandeurs Hydrodynamique et Thermique :	43
II.9.1. Nombre de Reynolds	43
II.9.2. Coefficient d'échanges convectif h:	44
II.9.3. Nombre de Nusselt :	45
II.10. Conclusion	45
CHAPITRE III : Procédure de Simulation Numérique	46
III.1. Introduction	47
III.2. Présentation des logiciels AnsysFluent et Solidworks :	47
III.3. Etapes principales de simulation ::	49
III.4. Création de la géométrie sur solidworks:	50
III.5. Etapes de simulation avec le logiciel Ansys fluent	52
III.5.1. Vue globale de Ansys fluent :	52
III.5.2. Insertion de Fluid Flow (Fluent)	53
III.5.3. Importation de la géométrie	53
III.5.4. Maillage	54
III.6. Les étapes de simulation sous Ansys Fluent	55
III.6.1 Ouverture de la version fluent	55
III.6.2 Autorisation du transfert de chaleur	56
III.6.3. Détermination du type d'écoulement	56
III.6.4. Autorisation et choix du modèle de radiation	57
III.6.5. Définition des caractéristiques des matériaux	57
III.6.6. Définir des zones solide et fluide:	58
III.6.7. Imposer les conditions aux limites	58
III.6.8. Choix des schémas de discrétisation	59
III.6.9. L'initialisation:	60
III.6.10. Choix des résiduels :	60
III.6.11. Lancement du calcul:	61

III.6.12. Convergence des calculs :	61
III.6.13. Calcul de la température de sortie:	62
III.6.14. Calcul de la température de la paroi:	62
III.6.15. Calcul de la température moyenne:	63
III.7. Conclusion	63

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1 Introduction :	65
IV.2 Les paramètres utilisés :	65
IV.3. Resultats et Discussions	67
IV.3.1. Cas de l'eau pure :	67
IV.3.1.1. Contours de températures :	67
IV.3.1.2. Contours de vitesses :	69
IV.3.1.3. Variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre du Reynolds	71
IV.3.1.4. Variation du coefficient de convection h	72
IV.3.2. Cas du nanofluide (CuO+eau):	73
IV.3.2.1 Contours de température :	73
IV.3.2.2 Contours de vitesses et les lignes de courant :	75
IV.3.2.3. Variation du nombre de Nusselt et le coefficient de convection h en fonction du nombre de Reynolds et la concentration ϕ	79
IV.4. Conclusion	81
Conclusion generale	82

References bibliographiques
Résumé

La liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1) Variation mensuelle de la constante solaire[4]	6
Figure (I.2) mouvement de la terre autour du soleil.[6]	7
Figure (I.3) trajectoire de la terre[5].	8
Figure (I.4) Mouvement apparent du soleil [5].	9
Figure (I.5) Rayonnement direct, diffus, global et albédo[8].	11
Figure (I.6) Sphère Céleste[8]	11
Figure (I.7) La déclinaison du soleil (δ)	12
Figure (I.8) Les coordonnées célestes horizontales	13
Figure (I.9) Schéma descriptive pour les angles azimut et hauteur solaire	13
Figure (I.10) Carte du monde de l'enseillent moyen annuel	15
Figure (I.11) Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu[10].	16
Figure (I.12) Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie.	17
Figure (I.13) structure d'une cellule photovoltaïque utilisant	19
Figure (I.14) processus dans un capteur solaire plan	20
Figure (I.15) capteurs plans sans vitrage.	21
Figure (I.16) Vue éclatée d'un capteur plan vitré à Eau.	21
Figure (I.17) capteur à tubes sous vide	22
Figure (I.18) Schéma d'un capteur cylindro-parabolique.	23
Figure (I.19) Schéma d'un capteur parabolique.	24
Figure (I.20) Modes du transfert thermique dans le récepteur solaire [14]	29
Figure (I.21) Procèdes de synthèse des nanofluides en une seule étape [17]	29

Chapitre II

Figure (II.1) La configuration étudiée et les conditions aux limites	38
--	----

Chapitre III

Figure (III.1) Dessin de 4 circle	50
Figure (III.2) creation d'une arc	50
Figure (III.3) creation une copy de l'arc	51
Figure (III.4) Fonction extrude les surfaces	51
Figure (III.5) Exportation de la géométrie en fichier STEP sur Solidworks	52
Figure (III.6) Vue globale du logiciel Ansys	52
Figure (III.7) Insertion de Fluid Flow (Fluent)	53
Figure (III.8) Importation de la géométrie.	53
Figure (III.9) Maillage des lignes.	54
Figure (III.10) Maillage des faces.	54
Figure (III.11) Maillage de volume	55

Figure (III.12) Ouverture de la version fluent	55
Figure (III.13) Autorisation de l'équation d'énergie	56
Figure (III.14) Détermination du type d'écoulement	56
Figure (III.15) Autorisation et choix du modèle de radiation	57
Figure (III.16) Définition des caractéristiques du fluide	57
Figure (III.17) Définition des zones solide et fluide	58
Figure (III.18) Définir les conditions aux limites imposées.	58
Figure (III.19) Définir la condition fluide inlet	59
Figure (III.20) Choix des schémas de discrétisation	59
Figure (III.21) Initialisation de la solution.	60
Figure (III.22) Choix des résiduels	60
Figure (III.23) lancement du calcul.	61
Figure (III.24) convergence du calcul.	61
Figure (III.25) calcul de Température de sortie	62
Figure (III.26) calcul de Température de paroi	62
Figure (III.27) calcul de Température moyen	63

Chapitre IV

Figure (IV.1) Les contours de température pour $Re=600$	67
Figure (IV.2) Les contours de température pour $Re=1000$	68
Figure (IV.3) Les contours de température pour $Re=2000$	68
Figure (IV.4) La différence des températures dans le cas de pure l'eau en fonction de Re	69
Figure (IV.5) Les contours de vitesse dans $Re=600$	70
Figure (IV.6) Les contours de vitesse dans $Re=1000$	70
Figure (IV.7) Les contours de vitesse dans $Re=2000$	71
Figure (IV.8) Variation du nombre de Nusselt de l'eau en fonction de Re .	72
Figure (IV.9) Variation du coefficient de convection en fonction de Re de l'eau	72
Figure (IV.10) Les contours de température pour une concentration $\phi=1\%$ ($Re=1000$)	73
Figure (IV.11) Les contours de température pour une concentration $\phi=2\%$ ($Re=1000$)	74
Figure (IV.12) Les contours de température pour une concentration $\phi=4\%$ ($Re=1000$)	74
Figure (IV.13) différence de température dans les deux cas en fonction de Re	75
Figure (IV.14) Les contours de la vitesse pour une concentration $\phi=1\%$ ($Re=1000$)	76
Figure (IV.15) Les contours de la vitesse pour une concentration $\phi=2\%$ ($Re=1000$)	77
Figure (IV.16) Les contours de la vitesse pour une concentration $\phi=4\%$ ($Re=1000$)	77
Figure (IV.17) Lignes de courant pour une concentration	78

$\phi=1\%$ (Re=1000)	
Figure (IV.18) Lignes de courant pour une concentration	78
$\phi=2\%$ (Re=1000)	
Figure (IV.19) Lignes de courant pour une concentration	79
$\phi=4\%$ (Re=1000)	
Figure (IV.20) Variation du nombre de Nusselt en fonction de la concentration ϕ (Re=1000)	80
Figure (IV.21) Variation du nombre de Nusselt de l'eau pur et le nanofluide en fonction de la concentration ϕ et le nombre de Reynolds Re	80
Figure (IV.22) Variation du coefficient de convection h de l'eau pur et le nanofluide en fonction de la concentration ϕ et le nombre de Reynolds Re	81

La liste des tableaux

Tableau(I.1) caractéristiques principales du soleil	5
Tableau (I.2) Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques[10]	16
Tableau (I.3) Combinaison fluide de base/ nanoparticules disponibles en littérature	27
Tableau (II.4) dimensions du capteur cylindro-parabolique	38
Tableau (IV.5) Les propriétés physiques de nano fluide (oxyde de cuivre CuO)	66

Nomenclature

Symboles Latins :

A : surface d'échange thermique [m^2]

a : le coefficient d'absorption

α : le coefficient d'absorption

C : la constante solaire

C : le coefficient de la fonction de phase linéaire-anisotrope

C : la vitesse de la lumière en (m/s)

C_p : Capacité calorifique massique à pression constante

C_p : La chaleur spécifique à pression constante

D : rayonnement direct

D_{ae} : le diamètre extérieur de l'absorbeur

D_{ai} : le diamètre intérieur de l'absorbeur

D_h : Diamètre hydraulique [m]

E : l'énergie , exprimée en Joule

G : rayonnement global

G : le rayonnement incident

h : hauteur du soleil

h : la constante de Planck ($h = 6.626 \cdot 10^{-37}$ J/s)

h_m : Coefficient de convection moyen [W/m^2K]

k_f : Conductivité thermique du fluide [$W/m K$]

k_n : la conductivité thermique du nanofluide

K_s : la conductivité thermique des particules solides

L : est la longitude

L : la longueur du récepteur

\dot{m} : Débit massique [kg/s]

N : est le numéro du jour dans l'année

n : le numéro du jour dans l'année compte a partir du 1er Janvier

n : quantième jour de l'année $1 \leq n \leq 365$

n : l'indice de réfraction

N : le numéro du jour de l'année

N_{uf} : est le nombre de Nusselt du fluide caloporteur

q_c : Quantité de chaleur définie par l'expression

\vec{r} : La position de vecteur

\vec{s} : la direction du vecteur

\vec{s}' : la direction du vecteur de diffusion

S : Rayonnement diffus

s : la longueur du trajet

S_G : une source de rayonnement définie par l'utilisateur

T : la température locale

T_0 : Température de référence

T_{ae} : la température extérieure de l'absorbeur

T_{ai} : la température intérieure de l'absorbeur

T_c : est la température du ciel

T_m : Température moyenne de mélange basé sur la masse volumique

T_o : Température d'entrée [K]

T_{out} : Température moyenne de sortie [K]

T_w : Température moyenne de la surface d'échange

u_0 : vitesse d'entrée du fluide [m/s]

V_s : son respectivement le volume des nanoparticules et le volume du fluide de base [m^3]

Symboles Geek :

β : Le coefficient de dilatation isobare du fluide.

β :le coefficient de dilatation à pression constante

B : est le rapport de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

ϵ_{ve} : est l'émissivité du verre externe

λ : La conductivité thermique

μ : Viscosité dynamique du fluide

ν_f : viscosité cinématique du fluide [m^2/s]

ρ : La masse volumique

ρ_0 : Masse volumique du fluide

Φ : la fonction de phase

Ω : l'angle solide

σ_s : le coefficient de diffusion

σ : La constante de Stefan-Boltzmann ($5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

μ : la viscosité dynamique du fluide de base

μ_n : la viscosité dynamique du nonofluide

ρ_f : la masse volumique de base fluide

ρ_{nF} : la masse volumique du nanofluide

ρ_s : la masse volumique des nanoparticules solides

σ : est la constante de Stefan-Boltzmann qui est égale à

σ : la constante de Stefan-Boltzmann

λ_a : la conductivité thermique de l'absorbeur

λ_f : est la conductivité thermique du fluide caloporteur, évaluée à la température moyenne du fluide

σ_s : le coefficient de diffusion

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré

$5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Introduction générale

L'énergie renouvelable, en particulier, l'énergie solaire a été utilisée depuis longtemps pour des fins domestiques ou industriels en commençant par le chauffage et la production de l'eau chaude sanitaire jusqu'à la production d'électricité ou la fusion des métaux. Les systèmes à concentration du rayonnement solaires tels que les concentrateurs paraboliques, cylindro-paraboliques ont largement contribué à l'évolution de l'utilisation de l'énergie solaire thermique. La majorité des systèmes de production d'électricité solaire thermique (ou thermodynamique) utilisent les concentrateurs cylindro-paraboliques ayant une concentration linéaire du flux thermique solaire.

Afin de rendre ce type de concentrateurs solaires compétitif, les chercheurs ont toujours tenté d'augmenter leur rendement et leur efficacité. De plus, l'augmentation du rendement thermique conduit à une basse température du tube absorbeur, ainsi qu'à des gradients de température plus faibles sur celui-ci, ce qui réduit les éventuels problèmes de déformations thermomécaniques.

L'amélioration du transfert thermique entre le fluide caloporteur et la paroi du tube absorbeur est considérée parmi les moyens les plus efficaces permettant l'augmentation du rendement des installations de production d'électricité solaire.

Toutes les techniques d'intensification du transfert de chaleur vont influencer ces deux paramètres : le coefficient d'échange thermique convectif et la surface d'échange fluide/paroi. L'ajout des ailettes va principalement agir sur la surface d'échange, alors que la conductivité du fluide caloporteur va agir sur le coefficient d'échange.

L'utilisation des nanofluides à base de particules métalliques présente une meilleure conductivité thermique et coefficient de transfert de chaleur convectif par rapport au fluide de base est certainement la solution la plus prometteuse dans le domaine d'amélioration des transferts thermiques

C'est dans ce contexte que nous avons mené notre étude intitulée :

Etude numérique de l'amélioration du transfert thermique dans un capteur solaire cylindro-parabolique

Le travail que nous développons dans ce mémoire porté sur la simulation d'un écoulement laminaire tridimensionnelle de l'absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique. Ce travail a été mené en se focalisant sur l'amélioration apportée au performance thermique du capteur solaire en utilisant le nanofluide comme fluide caloporteur.

Pour atteindre nos objectifs nous avons dans un premier cas utilisé l'eau comme fluide caloporteur, et dans le deuxième cas nous avons remplacé l'eau par le nanofluide (eau+Cuo) avec différentes concentrations $\phi=1\%$, 2% , 3% et 4% .

Les simulations numériques ont été effectuées pour des nombres de Reynolds allant de 200 jusqu'à 2000.

Cette étude est organisée de quatre chapitres précédés d'une introduction générale et suivis d'une conclusion générale.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique permettant une meilleure compréhension de gisement solaire, des capteurs solaires et les nanofluides. Une présentation plus détaillée a été consacrée aux concentrateurs cylindro-paraboliques.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les configurations étudiées, les hypothèses simplificatrices, ainsi que les équations de continuité et de quantité de mouvement couplées à l'équation d'énergie pour le fluide.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté des généralités sur les deux logiciels utilisés, nous avons exposé les différentes étapes principales de la création de la géométrie étudiée et le maillage en utilisant le logiciel Solidworks et les étapes de la simulation numérique en utilisant le logiciel Ansysfluent.

Le quatrième et dernier chapitre est la partie la plus importante dans notre étude. Il comporte les résultats numériques obtenus et leurs interprétations pour les deux cas étudiés. Une étude comparative entre les deux cas a été également réalisée.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Revue bibliographique

I.1. Introduction

La production d'énergie thermique à partir de l'énergie solaire est considérée comme l'une des techniques les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Cette approche, connue sous le nom de chauffage solaire, utilise des capteurs solaires pour convertir la lumière du soleil en chaleur utilisable.

Il existe actuellement des millions de mètres carrés de capteurs solaires et de systèmes solaires installés dans le monde, utilisant les technologies les plus récentes. Ces installations permettent de chauffer l'eau, de fournir de l'énergie pour le chauffage des bâtiments ou même de produire de l'électricité grâce à des systèmes solaires thermiques et photovoltaïques.

La recherche dans ce domaine se concentre principalement sur le développement des capteurs solaires offrant de meilleures performances thermiques. Cela signifie qu'il est important de prendre en compte tous les paramètres qui influent sur leur comportement. Ces paramètres comprennent les aspects géométriques, thermo-physiques et optiques liés à la conception des capteurs solaires.

I.2. Généralités sur le soleil et la terre

I.2.1. 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. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [1,2]. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [1].

I.2.2. Caractéristiques du soleil

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau (I .1)

Caractéristiques	Valeurs
Diamètre (km)	13,92. 10 ⁵
Masse (kg)	2 .10 ³⁰
Surface (km ²)	6,09 .10 ¹²
Volume (km ³)	1,41 .10 ¹⁸
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Temperature au centre (MK)	16
Température à la surface (K)	5900

Tableau (I.1) caractéristiques principales du soleil

I.2.3. Température du soleil

Au cœur du soleil, au sein du noyau solaire, il règne une température de pas moins de 15 millions de degrés celsius. Cette température énorme a permis d'initier des réactions de fusion nucléaire, lesquelles entretiennent aujourd'hui une telle température. En direction de la surface du soleil, soit sa photosphère, la température décroît jusqu' à n'être plus que de quelque 6.000°C. Dans certaines régions qui apparaissent plus sombres, que les astronomes appellent des taches solaires, la température est encore plus faible de l'ordre de 3500°C. De manière tout à fait surprenante la température de la couronne solaire, qui forme l'atmosphère solaire, peut atteindre jusqu' à un million de degrés Celsius. Un phénomène que les chercheurs pensent pouvoir expliquer par l'existence, sous la surface du soleil, d'une couche de plasma qui se comporte comme une marmite en ébullition. Celle-ci serait à la source d'un champ magnétique qui réchaufferait les couches.

I.2.4. Origine

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X. Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence

d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3,7 \cdot 10^{26}$ J.

I.2.5. La constante solaire C

C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire [3].

La variation de la constante solaire suit la relation suivante [4]:

$$C = I_0 [1 + 0,033 \cos (0,984j)] \quad (I.1)$$

C : la constante solaire.

$I_0=1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue [5].

n: le numéro du jour de l'année.

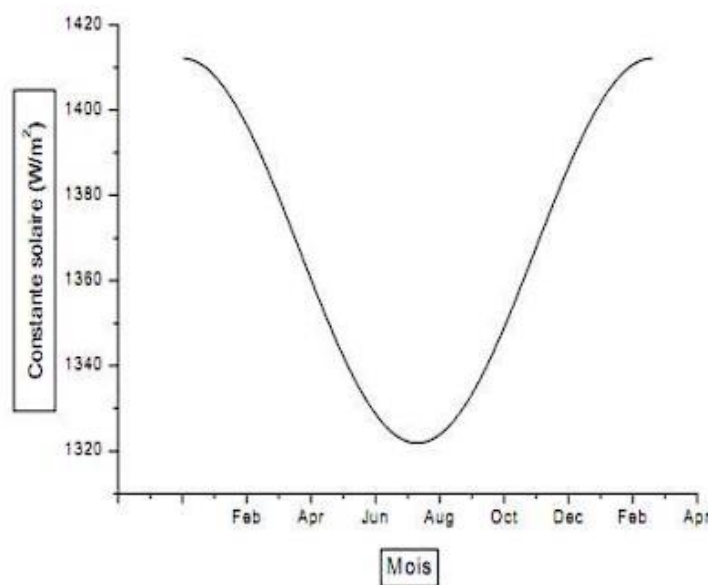


Figure (I.1) Variation mensuelle de la constante solaire[4]

I.2.6. La Terre

La terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Sa superficie est de $510101 \times 10^3 \text{ Km}^2$, son volume est égale à $1083320 \times 10^6 \text{ Km}^3$, sa masse est 6×10^{21} tonnes et sa masse volumique est de $5,515 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. La terre décrit autour du soleil une ellipse presque circulaire (voir figure (I.2)). Cette trajectoire est appelée orbite terrestre. Le plan dans lequel cette orbite se trouve est appelé l'écliptique. L'écliptique est simplement le plan défini par la trajectoire apparente du Soleil dans le ciel. L'axe de rotation terrestre fait un angle de

+23°27' à - 23°27' ce qu'on appelle déclinaison. La ligne des équinoxes est définie par l'intersection du plan de l'équateur terrestre avec le plan de l'écliptique, qui est l'orbite apparente du Soleil autour de la terre. L'équateur terrestre est un plan imaginaire qui divise la terre en deux hémisphères, l'hémisphère nord et l'hémisphère sud. Lorsque le Soleil traverse l'équateur terrestre en se déplaçant du sud vers le nord, cela marque le début du printemps dans l'hémisphère nord et de l'automne dans l'hémisphère sud. Ce moment précis est appelé l'équinoxe de printemps dans l'hémisphère nord et l'équinoxe d'automne dans l'hémisphère sud. À ce moment-là, le point de l'intersection entre la ligne des équinoxes et l'orbite terrestre est appelé le point vernal ou point de l'équinoxe.

Le point vernal est considéré comme l'origine pour mesurer les angles qui définissent la position relative du Soleil par rapport à la terre. Cela inclut des paramètres tels que l'ascension droite et la déclinaison, qui sont utilisés pour localiser le soleil dans le système de coordonnées célestes. L'ascension droite est mesurée en heures, minutes et secondes, tandis que la déclinaison est mesurée en degrés, minutes et secondes. En utilisant le point vernal comme référence, les astronomes peuvent déterminer la position du soleil à n'importe quel moment de l'année en fonction de ces coordonnées célestes. Cela est utile pour la navigation, l'observation des étoiles, et pour déterminer les saisons et les cycles astronomiques.[6]

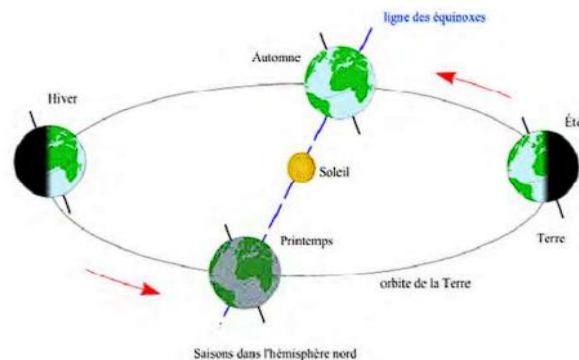


Figure (I.2) mouvement de la terre autour du soleil.[6]

I.2.7. Mouvements de la terre autour du soleil

La connaissance des mouvements relatifs à la terre et au soleil est nécessaire pour connaître le flux solaire reçu sur la surface de la terre en un lieu quelconque et en un instant quelconque de la journée ou de l'année.

La terre effectue donc une révolution autour du soleil, selon une trajectoire assez proche d'un cercle (plan de l'écliptique ou orbite de la terre).

La distance terre-soleil est approximativement de 150 millions de kilomètres, et il faut 8 minutes à sa lumière ou énergie pour nous parvenir. Ce tour complet dure 365 jours et 6 heures, ce qui correspond à une année solaire. Tous les 4 ans, une année bissextile de 366 jours permet de compenser les 6 heures par un jour ($4 \times 6 = 24h$) [5].

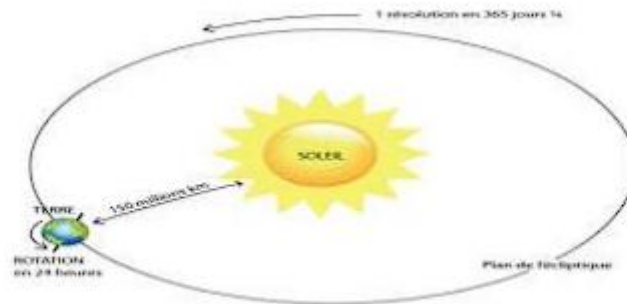


Figure (I.3) trajectoire de la terre[5].

I.2.8. Mouvement du soleil

Le mouvement que paraît faire le soleil en une journée vu par un observateur situé sur terre est appelé ‘Le mouvement apparent du soleil’. En dehors des régions polaires, de l’Equateur et des tropiques :

- Le matin ; le soleil est à l’Est, bas sur l’horizon, c’est le « lever du soleil »
- A midi ; le soleil est positionné au Sud ou au Nord, et il est au plus haut de son trajet apparent ;
- Le soir ; le soleil apparaît à l’Ouest, bas sur l’horizon, c’est le « coucher du soleil ». Le mouvement apparent du soleil observé par un homme fixe en un point de latitude L au Nord de l’Equateur est schématisé sur la figure (I.4).

L’angle que fait la direction du soleil avec la verticale du lieu au midi solaire est égal à $(L - \delta)$.

La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre dans l’hémisphère Nord.

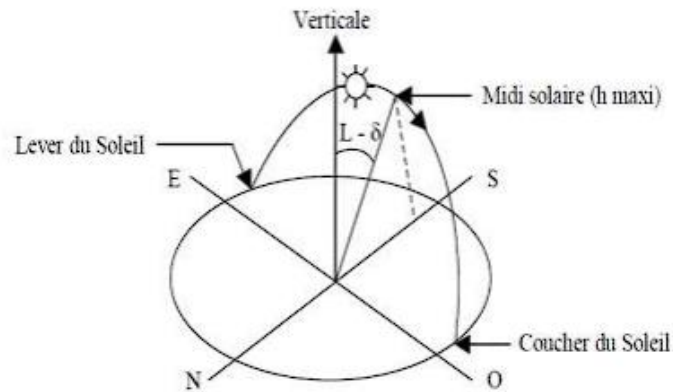


Figure (I.4) Mouvement apparent du soleil [5].

I.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est de nature électromagnétique, provenant essentiellement d'une série d'interactions composites émises par le soleil [7].

Le rayonnement électromagnétique émis à un double aspect ondulatoire et corpusculaire correspondant à deux champs, l'un électrique et l'autre magnétique, il se déplace dans le vide avec une vitesse de 3.10^8 m/s. Le corpuscule, appelé photon, de masse nulle, a une énergie reliée à la fréquence ν ou δ à la longueur d'onde par la relation suivante :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.2)$$

E : l'énergie, exprimée en Joule

C : la vitesse de la lumière en (m/s)

h : la constante de Planck ($h = 6.626.10^{-37}$ J/s)

I.4. Les composantes du rayonnement solaire

I.4.1. Rayonnement direct (D)

Rayonnement solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque solaire sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normal est désigné par I. Nous avons la relation suivante:

$$I_d = I^* \sin(h) \quad (I.3)$$

h : hauteur du soleil.

L'éclairement solaire direct (D) sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles.

Dans le cas ou nous ne disposons d'aucune mesure, on peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation :

$$I^* = 1370 \exp \left[\frac{T_L}{0.9 + 9.4 \sin(h)} \right] \quad (I.4)$$

Ou T_L est le facteur de trouble de linke calculable par:

$$T_L = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta) \ln(p_v) \quad (I.5)$$

β est le coefficient de trouble atmosphérique.

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

Avec : h : Hauteur du soleil.

I.4.2. Rayonnement diffus(S)

C'est une partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi de multi-réflexions (dispersion) par l'atmosphère.

Pour un observateur au sol, le rayonnement diffus sur un plan horizontal

$$D^* = 54.8 \sqrt{\sin(h)} \left[T_L - 0.5 - \sqrt{\sin(h)} \right] \quad (I.6)$$

I.4.3. Albédo

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neige). Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

$$ALB = \frac{\text{énergie refléchi}}{\text{énergie récu}} \quad (I.7)$$

I.4.4. Le rayonnement global(G)

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct.

$$G = S + D \quad (I.8)$$

Avec : G : rayonnement global

S : Rayonnement diffus

D : rayonnement direct

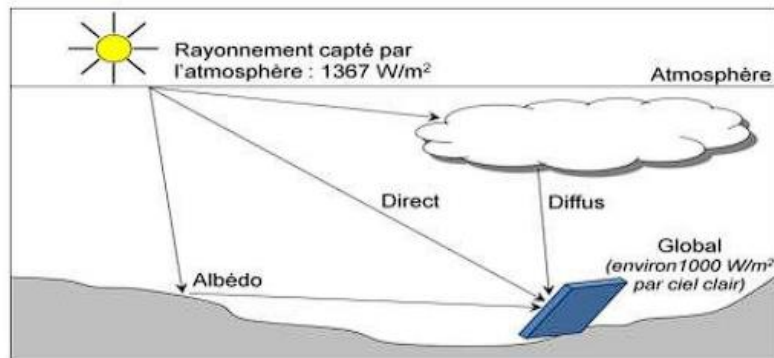


Figure (I.5) Rayonnement direct, diffus, global et albédo[8].

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

I.5.1. Coordonnées célestes

I.5.1.a. Sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon indéfini, établie dans les cieux et ayant comme centre l'œil d'un observateur terrestre. La sphère est la base du système de coordonnées employé pour déterminer les positions des astres. Elle est également utilisée pour désigner les intervalles de temps (voir figure (I.6)) [8].

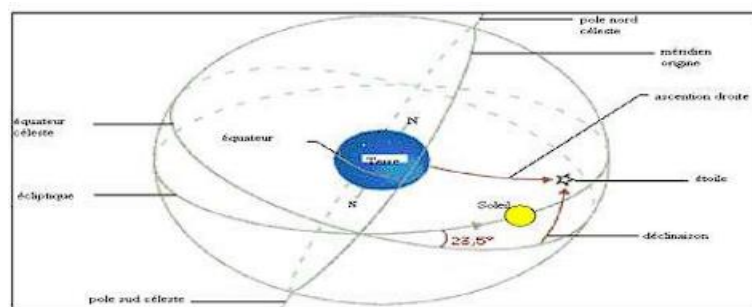


Figure (I.6) Sphère Céleste[8]

I.5.1.b. Coordonnées célestes horaires

-La déclinaison (δ)

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \times \sin\left[\frac{360}{365}(n-81)\right] \quad (I.9)$$

n : quantième jour de l'année $1 \leq n \leq 365$

n : le numéro du jour dans l'année compte a partir du 1er Janvier.

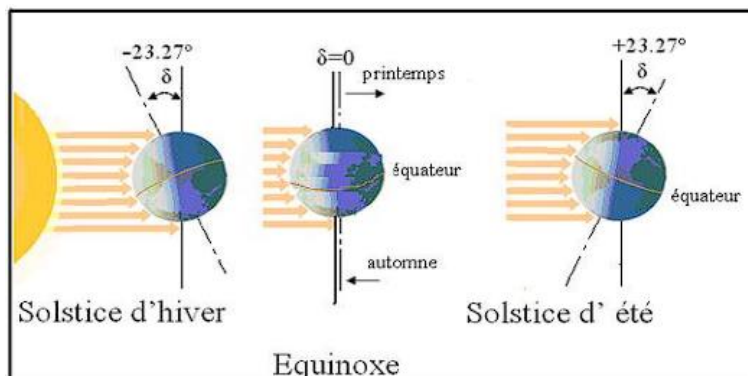


Figure (I.7) La déclinaison du soleil (δ)

-L'angle horaire(ω)

L'angle horaire du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu.

$$\omega = 15^\circ (\text{TSV} - 12) \quad (\text{I.10})$$

I.5.2. Coordonnées géographiques

I.5.2.1. La longitude (L)

Est comptée positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest, à partir du méridien Greenwich, elle varie de -180° à $+180^\circ$.

I.5.2.2. La latitude (L)

Permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans hémisphère Nord et de 0° à -90° dans hémisphères Sud.

I.5.2.3. L'altitude (φ)

Correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer.

I.5.3. Coordonnées horizontales

I.5.3.1. La hauteur du soleil (h)

Ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compte de 0° à 90° vers le zénith. il est donne par la relation:

$$\text{Sinh} = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta \cos\omega \quad (\text{I.11})$$

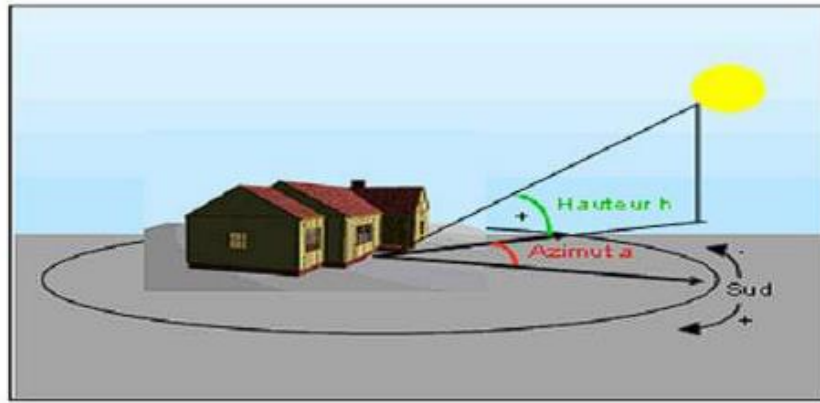


Figure (I.8) Les coordonnées célestes horizontales

I.5.3.2.L'azimut(a)

Ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compte de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest, il est donné par la relation :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh} \quad (I.12)$$

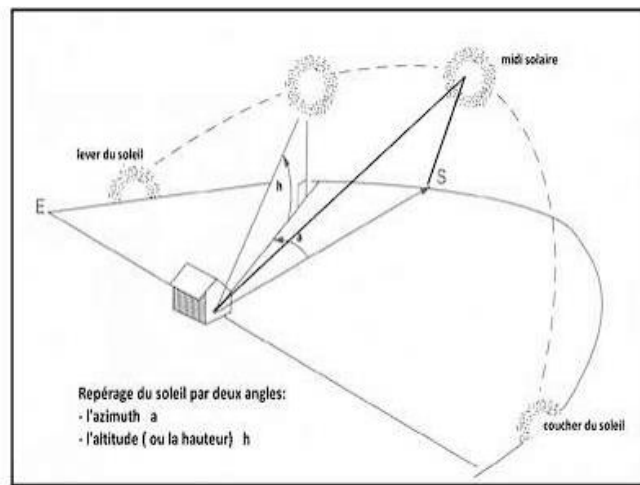


Figure (I.9) Schéma descriptive pour les angles azimut et hauteur solaire

I.6.Les temps solaires

I.6.1.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:

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (I.13)$$

ω en degré

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

I.6.2. Le temps solaire moyen (T.S.M)

Il est donné par la relation:

$$ET = TSV - TSM \quad (I.14)$$

ET, l'équation du temps, qui corrige le TSV par rapport au TSM

$$Et = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \text{ [min]} \quad (I.15)$$

$$N' = (N - 81) \times 360/365 \quad (I.16)$$

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

I.6.3. Le temps universel (TU)

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

$$TU = TSM - L/15 \quad (I.17)$$

Où : L : est la longitude

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

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

$TU = TSM$, pour le méridien de Greenwich

I.6.4. Le temps légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (1.18)$$

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie

I.7. Gisement solaire

Le gisement solaire est une source d'énergie renouvelable abondante et gratuite. Le soleil est une énorme boule de plasma chaud qui émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions. Ce rayonnement solaire, qui comprend des photons de différentes longueurs d'onde, voyage à travers l'espace jusqu'à la terre.

Lorsque le rayonnement solaire atteint l'atmosphère terrestre, une partie est réfléchiée ou dispersée par les nuages, les molécules d'air et les particules en suspension. Une autre partie traverse l'atmosphère et atteint la surface de la terre. Cette énergie solaire qui atteint la surface de la terre est utilisée par les plantes lors de la photosynthèse et peut également être captée et convertie en électricité ou en chaleur par des technologies solaires.

I.7.1. 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 [9]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la Figure (I.10):

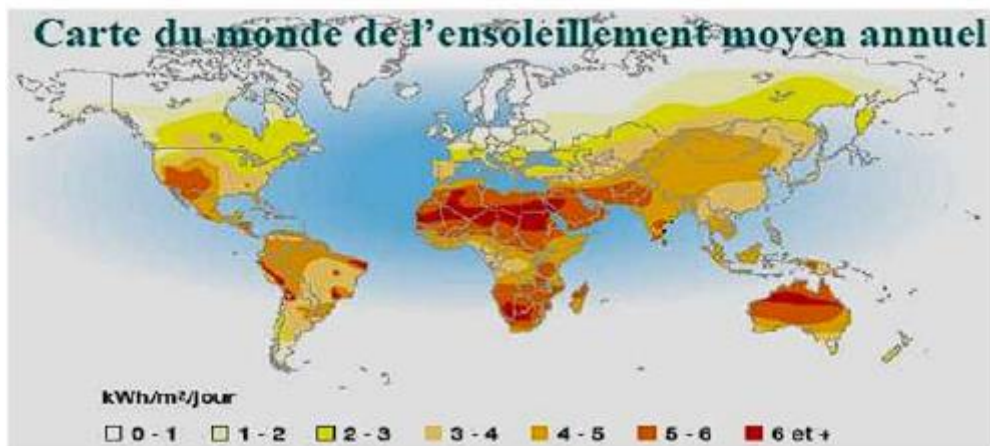


Figure (I.10) Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (I.2) selon l'ensoleillement reçu annuellement [10]:

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

Tableau (I.2) Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques[10]

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 16h/j pendant [10].

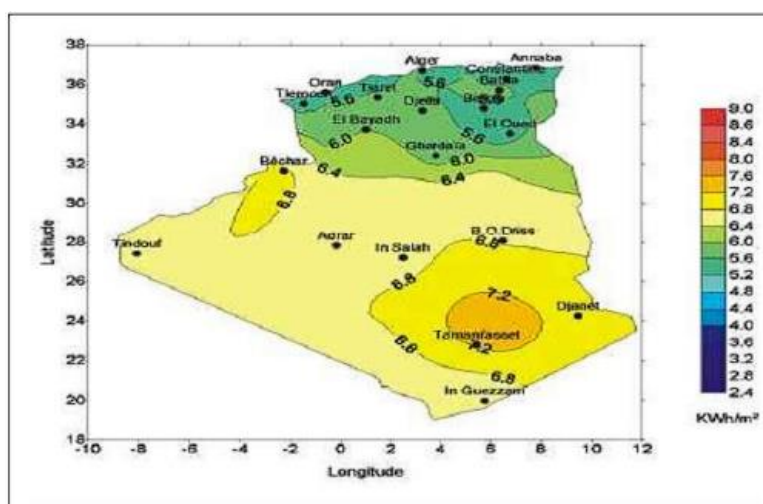


Figure (I.11) Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu[10].

En algérie, il existe un réseau de 271 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien (figure I.12)[11]. 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.

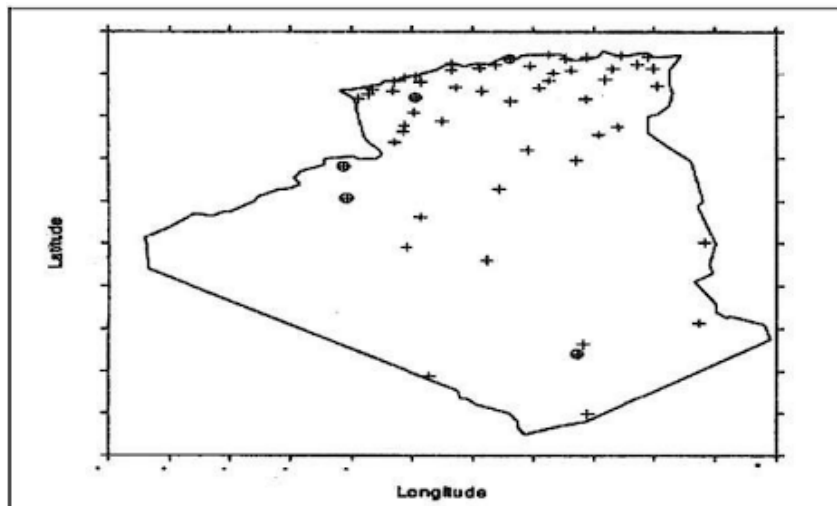


Figure (I.12) Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie.

I.7.2. Importance du gisement solaire Algérien

Le gisement solaire algérien revêt une grande importance en raison de plusieurs facteurs clés :

1. *Ressources solaires abondantes* : L'Algérie est située dans une région bénéficiant d'un ensoleillement important tout au long de l'année. Le pays bénéficie d'un climat désertique avec de longues heures d'ensoleillement quotidien, ce qui se traduit par un potentiel solaire élevé.
2. *Transition énergétique et réduction des émissions* : Le solaire est une source d'énergie propre et renouvelable, ce qui en fait une solution attractive pour la transition énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'Algérie, en exploitant son gisement solaire, peut diversifier son mix énergétique, réduire sa dépendance aux combustibles fossiles et contribuer à la lutte contre le changement climatique.
3. *Développement économique* : L'exploitation du gisement solaire peut stimuler le développement économique en Algérie. Cela permettrait de créer de nouveaux emplois dans l'industrie solaire, de favoriser l'innovation technologique et d'attirer des investissements nationaux et internationaux dans le secteur des énergies renouvelables.
4. *Accès à l'énergie* : L'Algérie est confrontée à des défis en matière d'accès à l'énergie dans certaines régions éloignées du pays. Le déploiement de l'énergie solaire peut contribuer à fournir une énergie propre et abordable à ces zones, améliorant ainsi la

qualité de vie des populations locales et favorisant le développement socio-économique.

5. *Exportation d'énergie* : L'Algérie dispose d'un potentiel pour exporter l'énergie solaire produite vers d'autres pays de la région. Les interconnexions énergétiques transfrontalières permettent d'échanger de l'électricité entre les pays voisins, ce qui peut générer des revenus supplémentaires pour l'Algérie et renforcer sa position en tant qu'acteur régional clé dans le secteur de l'énergie.

I.8. Les capteurs solaires

I.8.1. Définition

Les capteurs solaires, également appelés panneaux solaires, sont des dispositifs qui convertissent la lumière du soleil en électricité ou en chaleur utilisable. Ils sont largement utilisés pour exploiter l'énergie solaire et sont une composante clé des systèmes solaires photovoltaïques et thermiques.

I.8.2. Différents types de capteurs solaires

I.8.2.a. Capteurs solaires photovoltaïques :

Les capteurs solaires photovoltaïques convertissent la lumière du soleil directement en électricité. Ils sont composés de cellules solaires qui contiennent des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Lorsque la lumière du soleil frappe ces cellules, elle génère un courant électrique continu. Les panneaux solaires photovoltaïques sont utilisés pour alimenter des appareils électriques, des maisons, des entreprises et même des réseaux électriques complets.

I.8.2.b. Capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires thermiques utilisent l'énergie solaire pour chauffer un fluide, généralement de l'eau ou un fluide caloporteur, qui peut ensuite être utilisé pour le chauffage des bâtiments, l'eau chaude sanitaire ou le chauffage de piscines. Les capteurs solaires thermiques sont généralement constitués de tubes ou de plaques noires qui absorbent la chaleur du soleil et la transfèrent au fluide.

I.8.2.c. Concentrateurs solaires :

Les concentrateurs solaires utilisent des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière du soleil sur un point spécifique. Cette concentration permet d'augmenter l'intensité de la lumière solaire et de produire de la chaleur à des températures élevées. Les

concentrateurs solaires sont principalement utilisés dans les centrales solaires thermiques à concentration, où la chaleur générée est utilisée pour produire de la vapeur.

I.8.3. Les capteurs photovoltaïques

I.8.3.1. Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (f_{em}) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque .

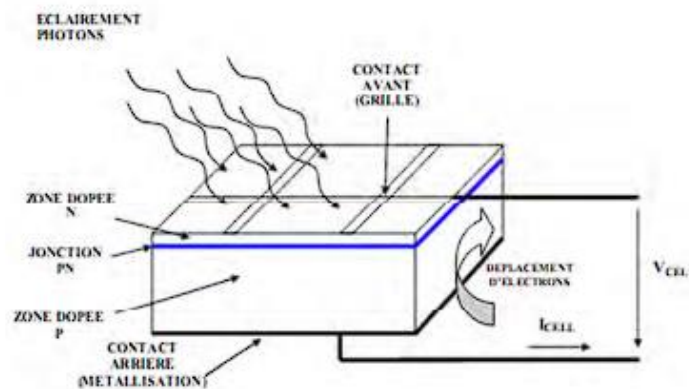


Figure (I.13) structure d'une cellule photovoltaïque utilisant

I.8.4. Capteurs solaire thermiques

I.8.4.1. Principe

Un collecteur solaire ou capteur solaire est utilisé pour extraire la chaleur du rayonnement du soleil. Ainsi, un collecteur fait toujours quelque chose de chaud. Au cœur d'un capteur solaire est un absorbeur solaire. Ce dernier absorbe le rayonnement du soleil et la convertit en chaleur (voir figure I.14). Les capteurs solaires sont utilisés pour chauffer l'eau

domestique, chauffage domestique, et produire de la chaleur à haute température, Les centrales thermiques peuvent même produire de l'électricité à partir de la chaleur à haute température.

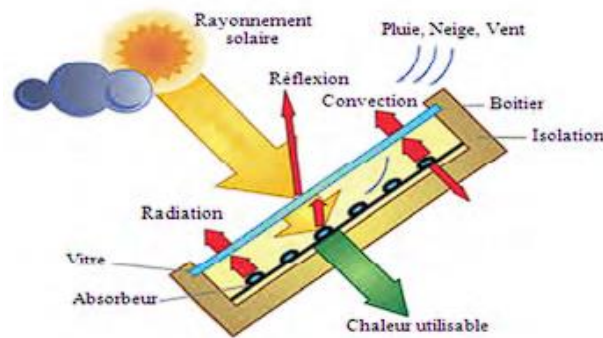


Figure (I.14) processus dans un capteur solaire plan

I.8.4.2. Différents types de capteurs solaires thermiques

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...).

Afin d'intercepter l'énergie provenant du rayonnement solaire, il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques, chacun avec ses propres caractéristiques et applications. Voici quelques-uns des types les plus courants. [12]

I.8.4.2.a. Capteurs solaires plans :

Ce sont les capteurs solaires thermiques les plus couramment utilisés. Ils se composent d'un absorbeur de chaleur (généralement une plaque métallique recouverte d'un revêtement sélectif) qui est exposé au rayonnement solaire. L'absorbeur chauffe et transfère la chaleur à un fluide (généralement de l'eau ou un fluide caloporteur) circulant à travers des tubes intégrés à l'absorbeur.

-Capteurs plans sans vitrage ni isolant

C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins performant. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur, Fig.I.15.

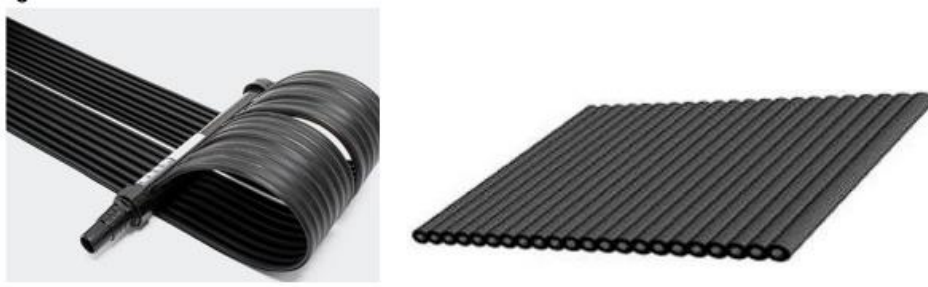


Figure (I.15) capteurs plans sans vitrage.

Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse températures (inférieure à 30°C). La typique intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surface plus grande, pour compenser la différence d'efficacité avec les capteurs plans vitrés, en particulier pendant l'hiver.

-Capteurs plans vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus. Ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air.

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau (Fig. I.16) sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel et ainsi que pour les piscines intérieures.

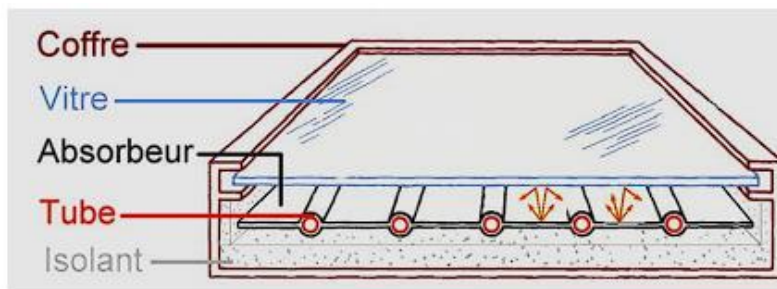


Figure (I.16) Vue éclatée d'un capteur plan vitré à Eau.

I.8.4.2.b. Capteurs à tubes sous vide

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures de l'ordre de 150°C avec des rendements corrects. Le vide créé à l'intérieur des tubes permet de réduire de manière importante les déperditions lors de la montée en température. Ils sont moins encombrants et

plus performants que les capteurs plans vitrés mais ils sont plus couteux et plus fragiles.

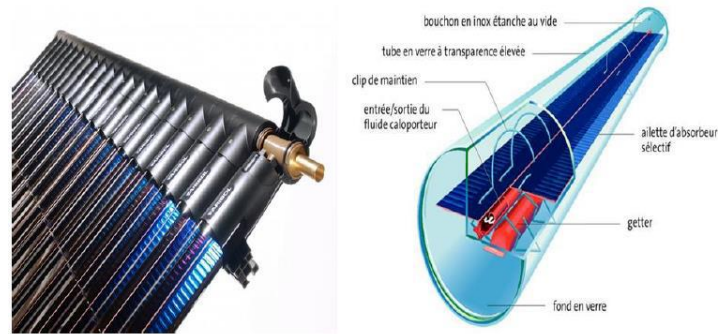


Figure (I.17) capteur à tubes sous vide

I.8.4.2.c. Capteurs solaires à concentration :

Les capteurs solaires à concentration utilisent des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière solaire sur un absorbeur plus petit. Cela permet d'atteindre des températures plus élevées. Ces capteurs sont souvent utilisés dans les centrales solaires thermiques à concentration, où la chaleur est utilisée pour produire de l'électricité à grande échelle.

I.8.4.2.d. Capteurs solaires hybrides :

Les capteurs solaires hybrides combinent la production d'électricité et de chaleur en utilisant à la fois des cellules photovoltaïques et des éléments pour récupérer la chaleur du rayonnement solaire. Ils sont capables de produire de l'électricité et d'utiliser la chaleur résiduelle pour des applications de chauffage ou de production d'eau chaude.

Ces différents types de capteurs solaires thermiques offrent des avantages et des inconvénients en termes de rendement, de coûts, de températures atteignables et d'applications spécifiques. Le choix du type de capteur solaire dépendra des besoins spécifiques du projet et des conditions environnementales.

I.8.4.3. Les capteur cylindro-parabolique

I.8.4.3.1. Définition

C'est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique. Le rayonnement solaire est concentré environ 100 fois sur des tubes linéaires, de couleur noire (absorbeurs) pour capter un maximum de rayonnement, contenant un fluide caloporteur, installés le long de la ligne focale des miroirs. [13]

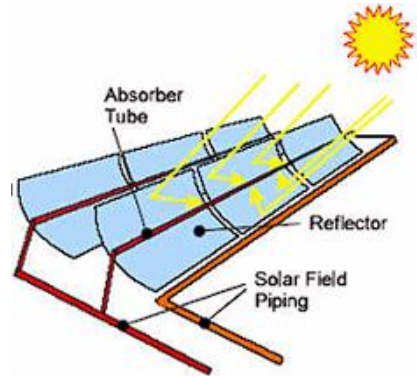


Figure (I.18) Schéma d'un capteur cylindro-parabolique.

I.8.4.3.2. Dimensionnement d'un capteur cylindro-parabolique

-Le Verre

Dans ce type de collecteur, le tube en verre est en pyrex avec une épaisseur de 3 mm, et un coefficient de transmission de 0,90. Le verre pyrex est un verre en borosilicate, formé de très nombreux microcristaux de borate de sodium très fins dans une matrice de silice pure, son coefficient de dilatation est pratiquement nul.

-Le réflecteur

Une tôle réfléchissante en Aluminium polie, collée sur une surface en tôle galvanisée de 2 mm d'épaisseur par une colle forte, dont le coefficient de réflexion est de l'ordre de 0.76 à 0,80 est utilisée.

Pour le miroir réfléchissant, le matériau le mieux recommandé est l'Aluminium pur qui possède un pouvoir réflecteur plus élevé que celui de l'argent, et à un coût moindre.

-L'absorbeur

Généralement c'est un tube en cuivre recouvert d'une couche mince de peinture noire matte dont l'absorptivité α_{ab} est comprise entre 0.92 et 0.95 et l'émissivité ϵ_{ab} est égale à 0.12 dans l'infrarouge. Afin d'augmenter la température du fluide caloporteur, il faut utiliser des capteurs isolés avec vitrage.

-Le fluide caloporteur

Chaque fluide caloporteur est choisi en fonction de ses propriétés physico-chimiques, telles que la viscosité, la capacité thermique volumique, la chaleur latente de vaporisation (ou de liquéfaction), en cas de changement de phase, la conductivité thermique, les propriétés anticorrosives, et de son coût. Ce choix dépend de l'application du niveau de température voulue. Il tiendra compte également des problèmes dus au changement de phase.

I.8.4.4. Les capteurs paraboliques

Les capteurs paraboliques sont basés sur la propriété optique bien connue du paraboloïde. En effet, tout rayon incident orthogonal au plan directeur se réfléchit sur le paraboloïde en direction du point focal, qui peut ainsi collecter tout le flux de chaleur récolté par le paraboloïde (à nouveau, au rendement de réflexion près). Le facteur de concentration est donc bien supérieur à celui d'un CCP (il peut atteindre 230°C).



Figure (I.19) Schéma d'un capteur parabolique.

I.9. Différents modes de transfert de chaleur dans capteur cylindro-parabolique [14]

Le transfert de chaleur dans le concentrateur cylindro-parabolique s'effectue par différents modes : conduction, convection et radiation, comme le montre la figure I.19 :

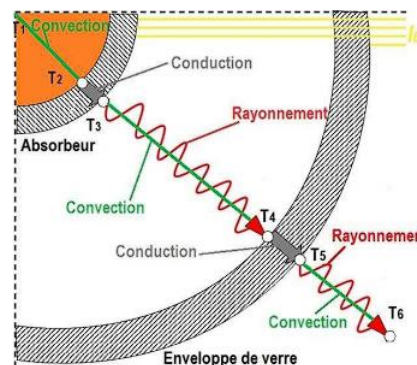


Figure (I.20) Modes du transfert thermique dans le récepteur solaire [14]

I.9.1. Conduction à travers l'absorbeur :

Le flux de chaleur par conduction à travers l'absorbeur est donné par la loi de Fourier pour deux cylindres concentriques par la relation:

$$\phi_{c,a} = \frac{2\pi\lambda_a L (T_{ae} - T_{ai})}{Ln(D_{ae}/D_{ai})} \quad (I.18)$$

Avec :

λ_a : la conductivité thermique de l'absorbeur

L : la longueur du récepteur

T_{ae} : la température extérieure de l'absorbeur

T_{ai} : la température intérieure de l'absorbeur

D_{ae} : le diamètre extérieur de l'absorbeur

D_{ai} : le diamètre intérieur de l'absorbeur

I.9.2. Conduction à travers l'absorbeur :

Le transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur se produit par convection forcée et le flux thermique peut être exprimé par la loi de Newton:

$$\phi_{c,af} = h_f \pi D_{ai} L (T_{ai} - T_{fm}) \quad (I.19)$$

Où T_{fm} est la température moyenne du fluide entre l'entrée et la sortie du tube absorbeur.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection du fluide est défini par:

$$h_f = \frac{Nu_f \lambda_f}{D_{ai}} \quad (I.20)$$

Où :

Nu_f : est le nombre de Nusselt du fluide caloporteur

λ_f : est la conductivité thermique du fluide caloporteur, évaluée à la température moyenne du fluide.

I.9.3. Le rayonnement à travers le verre :

Comme mentionné précédemment, le transfert de chaleur par rayonnement entre la surface externe de l'enveloppe en verre et le ciel est dû à la différence de température de ces deux milieux.

L'expression utilisée pour estimer le rayonnement entre l'enveloppe

en verre et le ciel est donnée par [15]:

$$\dot{q}'_{ray,ve-ciel} = \sigma \pi D_{ve} \varepsilon_{ve} (T_{ve}^4 - T_c^4) \quad (I.20)$$

Où ε_{ve} est l'émissivité du verre externe, T_c est la température du ciel.

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann qui est égale à $5.672 \times 10^{-8} \text{ W//m}^2 \cdot \text{K}^4$

I.10. Généralités sur les nano fluides

I.10.1. Définition :

Les nanofluides sont des suspensions colloïdales de nanoparticules solides dans un liquide. Les expériences menées récemment ont indiqué que les nanofluides ont une conductivité thermique sensiblement plus élevée que les fluides de bases. Parmi les nombreux avantages des nanofluides par rapport aux suspensions solides-liquides conventionnelles, il convient de mentionner que la surface spécifique est plus élevée, stabilité plus élevée de la suspension colloïdale, puissance de pompage inférieure requise pour atteindre un taux de transfert de chaleur équivalent. Ensuite, la réduction du colmatage des particules par rapport aux colloïdes congénitaux et un niveau de contrôle plus élevé de la thermodynamique et des propriétés de transport en faisant varier le matériau, la concentration, la taille et la forme des particules [15]. Bien que des tentatives ont été faites pour expliquer les raisons physiques de cette amélioration dans les nanofluides, il existe encore beaucoup d'inconvénients remarquables. Il y a au moins quatre raisons pour lesquelles une théorie définitive sur les nanofluides n'existe pas toujours [16].

- Le comportement thermique est trop différent des composites solide-solides ou des suspensions solides-liquides standards.

- Le transport thermique dans les nanofluides, en plus d'être étonnamment efficace par rapport aux suspensions solides-liquides standards, dépend des variables nontraditionnelles telles que la taille, la forme et la surface de la particule.

- La compréhension de la physique derrière les nanofluides nécessite une approche multidisciplinaire.

- Probablement, la difficulté la plus redoutable est liée à des problèmes multi scalaires. En fait, les nano fluides impliquent au moins quatre échelles : l'échelle moléculaire, la micro-échelle, la méso-échelle et la macro-échelle. La difficulté principale réside dans le fait de mettre en relation et d'optimiser l'interaction entre ces échelles.

I.10.2. Types des nanoparticules :

Actuellement plusieurs types de nanoparticules sont utilisés pour préparer des nanofluides, on les classe en quatre majeures catégories :

- *Les nanoparticules métalliques* comme « l'aluminium Al, le cuivre Cu, le fer Fe et l'argent Ag »
- *Les nanoparticules des oxydes céramiques* comme « le dioxyde de l'aluminium Al₂O₃, l'oxyde de cuivre CuO, le dioxyde de Titanium TiO₂, l'oxyde de zinc ZnO et le dioxyde de silicium SiO₂ »
- Les nanoparticules de carbure métallique comme le carbure de silicium métallique SiC.
- Les nanoparticules non-métalliques comme « le graphite C et le nanotube de carbone CNT ».

En outre, les fluides de base connus en littératures sont :

- L'eau,
- L'éthylène et le propylène glycol ;
- Les huiles et autres lubrifiants ;
- Le toluène ;
- Et les bio-fluides.

Le tableau (I.3) regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparés par différents groupes de recherche.

Table.I.3: Combinaison fluide de base/ nanoparticules disponibles en littérature.

	Nanoparticule et fluide de base	K ($W/m.k$)	ρ (kg/m^3)	C_p ($J/kg.k$)	μ ($Pa.s$)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80.2	7870	447	
	Ni	90.7	8900	444	
	Au	317	19.300	129	
	Ag	429	10.500	235	
	C(diamant)	2300	3500	509	
Oxyde métallique (solides)	SiO₂	1.38	2220	745	
	TiO₂	8.4	4157	710	
	Al₂O₃	63	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
Liquides non métallique	L'eau	0.613	1000	4183	0.0008513
	Ethylène-glycol (EG)	0.258	1132	2349	0.0157

I.10.3. Préparation des nanofluides:

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

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

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

A-La méthode en deux étapes :

Consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrason est souvent nécessaire afin de briser l'agglomérant. En outre, pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le pH. On peut également utiliser les forces de répulsion stérique à l'aide de molécules adsorbées ou greffées sur la surface.

B- La méthode en une seule étape :

Consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et plus la conductivité thermique du mélange est améliorée. Néanmoins, pour une famille de

nanofluides donnée, les résultats de la littérature présentent une dispersion assez forte. Cette dispersion peut être attribuée au mode de synthèse des nanofluides et/ou à la méthode de mesure.

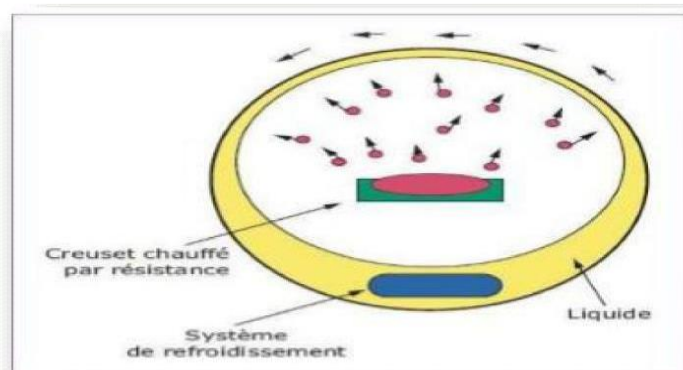


Figure (I.21) Procèdes de synthèse des nanofluides en une seule étape [17]

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

Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons **X** de forte puissance ,ainsi que des Micro ElectroMechanicalSystems[17].

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

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

I.10.4. Les applications des nano fluides :

Les dispersions de nanoparticules trouvent déjà de nombreux domaines d'applications pour leurs propriétés magnétiques (paliers magnétiques à ferrofluides, agents de contraste en

imagerie médicale), pour leurs propriétés électriques (dépôt conducteur électromouillage pour lentilles liquides), et de marquage de cellules ou de contrefaçon avec des nanoparticules fonctionnalisées. En thermique, les nanofluides peuvent être utilisés partout où des flux de chaleur importants doivent être évacués par des boucles liquides fermées : refroidissement de composants électriques et électroniques, radars, automobile...etc).

Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance, ainsi que des Microélectro Mechanical Systems [17]

I.10.5. Autres applications:

- 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 nucléaires.
- Transport (gestion de refroidissement / Véhicule moteur thermique).
- Autres applications (piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage, stockage thermique).

I.10.5. Les avantages et les inconvénients

I.10.5.1 Les avantages des nanofluides :

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

I.10.5.2 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.

I.10.6 Caractéristiques thermo-physiques des nanofluides

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nanofluide, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels. (Tableau I.3).

Les propriétés thermo physiques (conductivité thermique, viscosité dynamique etcinématique, capacité thermique massique, etc.) des solutions sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu, etc.) [18] .

I.10.6.1 Fraction volumique (φ)

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque les calculs des tous les autres propriétés se basés sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut défini la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules+fluide de base). La valeur de la fraction volumique est variée entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante

$$\varphi = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (I.21)$$

Où :

Vs et Vf sont respectivement le volume des nanoparticules et le volume du fluide de base[m³]

I.10.6.2. La masse volumique

La masse volumique des nanofluides est proportionnelle à la fraction volumique enparticules et augmente avec l'ajout des nanoparticules. Dans la littérature, et en l'absence de résultats expérimentaux, la masse volumique des nanofluides est souvent calculée à partir de loi de mélange dans laquelle le nano fluide est supposé homogène. Pak(1998)

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_s + (1 - \varphi) \rho_f \quad (I.22)$$

Avec:

ρ_{nf} : la masse volumique du nanofluide

ρ_f : la masse volumique de base fluide

ρ_s : la masse volumique des nanoparticules solides

I.10.6.3. La conductivité thermique :

La conductivité thermique, est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur. C'est une propriété très importante pour l'amélioration des performances thermiques d'un fluide caloporteur. La synthèse des nanofluides répond au besoin d'améliorer et d'amplifier la conductivité thermique des liquides. Il existe plusieurs modèles théoriques permettant d'estimer, sous certaines conditions, la conductivité thermique des suspensions. Nous présenterons dans cette partie les modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides [18].

-Modèle de Maxwell :

Maxwell fut le premier à dériver un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules Maxwell(1881)

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2\varphi(K_s - K_f)}{(K_s + 2K_f) - \varphi(K_s - K_f)} K_f \quad (I.23)$$

Où

K_{nf} : la conductivité thermique du nanofluide

K_f : la conductivité thermique du fluide de base

K_s : la conductivité thermique des particules solides

Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de

l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle.

-Modèle de Hamilton & Crosser :

Le modèle de Hamilton-Crosser (1962) est une extension du modèle de Maxwell, qui tient compte de la forme des particules. En effet, pour prendre en compte la non-sphéricité des particules (cas des NTC), ce modèle intègre un facteur géométrique appelé sphéricité, faisant référence à la géométrie sphérique. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de l'aire d'une sphère de même volume que la particule sur l'aire de cette même particule.

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_s - K_f)\varphi}{K_s + (n-1)K_f - \varphi(K_s - K_f)} K_f \quad (I.24)$$

n est un facteur de forme empirique donné par : $n = 3/\psi$

Ce modèle peut être utilisé lorsque la conductivité thermique des particules est au moins 100 fois plus élevée que celle du fluide de base [18].

-Modèle de Yu et Choi :

Yu et Choi (2003) ont proposé un modèle modifié plus complexe que le modèle de Hamilton-Crosser, qui tient compte de l'effet d'interface entre les particules et le fluide de base mais qui n'est valable que pour les particules de forme sphérique.

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f - 2(K_s - K_f)(1+B)^3\varphi}{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)(1+B)^3\varphi} K_f \quad (I.25)$$

Où B est le rapport de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

I.10.6.4. Viscosité dynamique des nanofluides :

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nanofluides mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique.

Ainsi, ces deux propriétés sont étroitement corrélées, et doivent être maîtrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluides dans des échangeurs. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'estimer ou de mesurer la viscosité dynamique des nanofluides et de quantifier l'importance des principaux paramètres qui l'influencent. Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la

viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides.

-Modèle d'Einstein:

D'une manière générale, les formules existantes dérivent du travail fondamental d'Einstein(1906). Basé sur l'hypothèse que l'énergie a une dépendance linéaire avec la viscosité, Einstein a déterminé l'énergie dissipée autour d'une seule particule dans un fluide en associant son énergie au travail réalisé pour la faire avancer relativement au fluide. A partir de ce résultat, il a déterminé l'expression décrivant une dépendance linéaire de la viscosité des suspensions dans un fluide avec la concentration.

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \quad (\text{I.26})$$

Où :

μ_{nf} la viscosité dynamique du nonofluide.

μ_f la viscosité dynamique du fluide de base.

La formule d'Einstein a depuis été vérifiée expérimentalement et est considérée satisfaisante pour des suspensions très diluées de particules sphériques (browniennes ou non browniennes), typiquement pour des concentrations volumiques inférieures à 1%. Il est à noter que ce modèle ne tient pas compte des effets de la taille des particules et des interactions inter particules.

-Modèle de Brinkman :

La formule de Brinkman(1952) complète le modèle d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4%.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (\text{I.27})$$

Cette relation décrit une évolution non linéaire de la viscosité dynamique avec la concentration volumique mais ne tient pas compte de la collision entre les particules. En effet, l'écoulement autour de chaque particule est influencé par la présence éventuelle d'autres particules à proximité et par les collisions entre particules.

Modèle de Batchelor

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + \eta\varphi + \kappa_h\varphi^2 + \dots)$$

(I.28)

I.10.6.5. Chaleur spécifique :

La conductivité thermique et la viscosité dynamique sont les deux propriétés thermophysiques les plus étudiées dans le cas des nanofluides. La chaleur spécifique des nanofluides, quant à elle, est très rarement étudiée, notamment sur le plan expérimental. La chaleur spécifique ou la capacité thermique massique est définie par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré Kelvin la température de l'unité de masse d'une substance. Cette grandeur est incorporée dans l'équation de l'énergie, et nécessite alors d'être déterminée d'une manière rigoureuse. La plupart des études effectuées dans la littérature utilise un des deux modèles définies par :

-Modèle du Pak and Cho(1998):

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_s \quad (I.29)$$

I.6.6.12.Modèle de Xuan (2000):

$$(\rho C_p)_{nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s}{(1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_s} \quad (I.30)$$

Pour déterminer la chaleur spécifique des nanofluides. Le premier modèle (I.29) est basé sur la loi de mélange d'une suspension homogène, tandis que le modèle de l'équation (I.30) est fondé sur l'hypothèse d'équilibre thermique entre les particules et le fluide de basev[18].

I.10.6.6. Coefficient d'expansion thermique :

La variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique appelé également coefficient de dilatation isobare

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (I.31)$$

Le calcul de la valeur de ce coefficient pour les nanofluides est déterminée par analogie avec la relation (I.12) qui exprime la masse volumique du nanofluide.

$$\beta_{nf} = \varphi\beta_s + (1 - \varphi)\rho\beta_f \quad (I.32)$$

CHAPTER II : FORMULATION MATHÉMATIQUE

Chapitre II

Formulation Mathematique

II-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les configurations étudiées, les hypothèses simplificatrices, ainsi que les équations de continuité et de quantité de mouvement couplées à l'équation d'énergie pour le fluide, qui régissent le phénomène de la convection thermique incompressible et stationnaire dans un capteur solaire cylindro-parabolique .

II-2 Les géométries du problème étudié

Le présent travail présente une étude numérique du récepteur d'un capteur cylindro-parabolique comme schématisé sur la figure (II.1). Le recepteur se constitue de deux tubes coaxiaux, dont l'un est métallique en cuivre est appelé un absorbeur de diamètre intérieur $D_{ai}=0.055m$ et de diamètre extérieur $D_{ae}=0.07m$ et l'autre est fait en verre de diamètre intérieur $D_{vi}=0.108$ et diamètre extérieur $D_{ve}=0.115m$, l'espace entre les deux rempli d'air. A l'intérieur de tube absorbeur circule un fluide caloporteur(eau). Les deux tubes soumit au rayonnement solaire direct et diffus en plus de rayonnement réfléchi et concentré par le miroir cylindro-parabolique. Le réflecteur est en Aluminium de longueur $L=4.06m$ et d'ouverture $D=5.76m$ à une distance focale $F_1=1.71m$ de l'absorbeur.

Les dimensions du capteur cylindro –parabolique sont données dans le tableau (II.1).

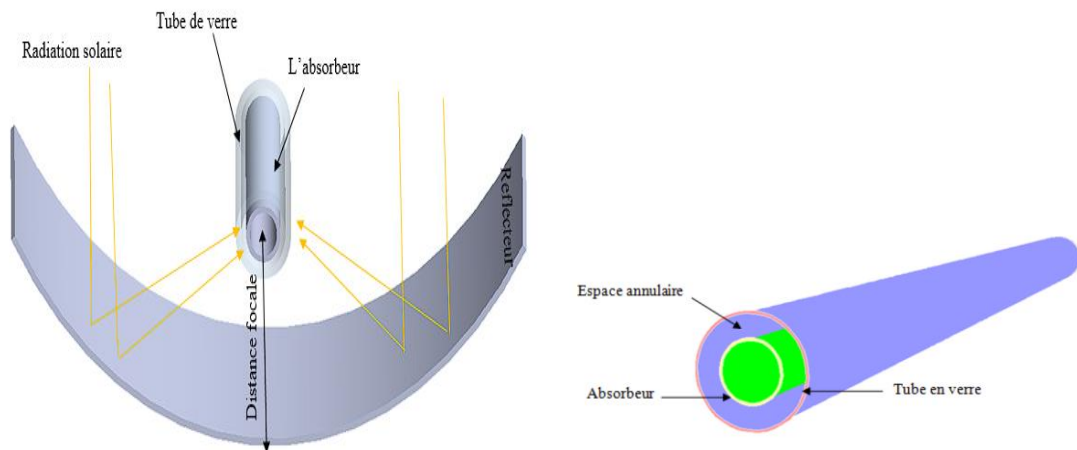


Figure II.1 : La configuration étudiée et les conditions aux limites

Tableau (II.1): dimensions du capteur cylindro-parabolique

Longueur du reflecteur (m)	4.06
Diamètre intérieur du verre (m)	0.108
Diamètre extérieur du verre (m)	0.115
Diamètre intérieur de l'absorbeur (m)	0.055
Diamètre extérieur de l'absorbeur (m)	0.07
Ouverture reflecteur (m)	5.75
Distance focale (m)	1.71

II.3 Hypothèses simplificatrices

La modélisation du système étudié repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'écoulement du fluide et le transfert de chaleur sont permanent ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$).
- Le régime est laminaire.
- Milieu continu.
- Ecoulement tridimensionnel (suivant les coordonnées x, y, z).
- Le fluide est newtonien et incompressible.
- Les propriétés physiques du fluide (ρ, C_p, μ, k) sont supposées constantes sauf pour la masse volumique dont l'approximation de Boussinesq étant adoptée, elle considère que

les variations de la masse volumique sont négligeable au niveau de tous les termes des équations de quantité de mouvement ($\rho=\rho_0$), sauf au niveau du terme gravité. La variation de ρ en fonction de la température est donnée comme suit :

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

T_0 : Température de référence.

ρ_0 : Masse volumique du fluide.

β : le coefficient de dilatation à pression constante

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)$$

II.4. Les équations gouvernantes du problème étudié

Après l'introduction des hypothèses données ci-dessus. On peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans cette étude comme suit :

II.4.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{II.1}$$

II.4.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement

Suivant x

$$\left[\frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[u \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[w \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right\} + g\beta(T-T_0) \quad \text{II.2}$$

Suivant y

$$\left[\frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[u \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[w \frac{\partial v}{\partial z} \right] \right\} \quad \text{II.3}$$

Suivant z

$$\left[\frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[u \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[w \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right\} \quad \text{II.4}$$

II.4.3. Equation de l'énergie :

$$\rho_0 C_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad \text{II.5}$$

Ou

λ : La conductivité thermique.

C_p : La chaleur spécifique à pression constante.

ρ : La masse volumique.

β : Le coefficient de dilatation isobare du fluide.

μ : Viscosité dynamique du fluide.

II.5. Modèle de radiation

Une des caractéristiques utiles d'ANSYS Fluent est le modèle de charge solaire. Cette capacité peut être utilisée pour calculer la charge de rayonnement effective en fonction de la position sur la surface terrestre (latitude et longitude), l'orientation du modèle par rapport au nord, l'heure du jour, la saison et les conditions établies pour un temps clair ou nuageux.

Ansys Fluent fournit cinq modèles de rayonnement qui nous permettent d'inclure le rayonnement avec ou sans milieu participant dans les simulations de transfert de chaleur, les modèles sont:

- Discrete Transfer Radiation Model (DTRM),
- P-1 Radiation model,
- Rosseland radiation model,
- Surface to surface radiation model (S2S),
- Discrete Ordinate radiation model (DO).

Le modèle de rayonnement de Rosseland présente deux avantages par rapport au modèle P-1. Puisqu'il ne résout pas une équation de transport supplémentaire pour le rayonnement incident (comme le fait le modèle P-1), le modèle Rosseland est plus rapide que

le modèle P-1 et nécessite moins de mémoire. Le modèle Rosseland ne peut être utilisé que pour les supports optiquement épais. Il est recommandé de l'utiliser lorsque l'épaisseur optique dépasse 3. Notez également que le modèle de Rosseland n'est pas disponible lorsque le solveur basé sur la densité est utilisé ; il est disponible uniquement avec le solveur basé sur la pression (pressure-based).

Pour toutes ces raisons on a choisit le modèle de rayonnement de Rosseland dans notre investigation numérique.

II.6. Equation de transfert radiatif

L'équation de transfert radiatif pour un milieu absorbant, émettant et diffusant à la position \vec{r} dans la direction \vec{s} est :

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega \quad \text{II.6}$$

I : l'intensité de la radiation (elle dépend de la direction et la position du vecteur) ;

\vec{r} : La position de vecteur ;

\vec{s} : la direction du vecteur ;

\vec{s}' : la direction du vecteur de diffusion ;

a : le coefficient d'absorption ;

s : la longueur du trajet ;

n : l'indice de réfraction ;

σ_s : le coefficient de diffusion ;

σ : La constante de Stefan-Boltzmann ($5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

Φ : la fonction de phase ;

T : la température locale ;

Ω : l'angle solide.

II.7. Les équations du modèle Rosseland

Le flux de rayonnement q_r est donné par l'équation suivante:

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad \text{II.7}$$

où

a est le coefficient d'absorption,

σ_s est le coefficient de diffusion,

G est le rayonnement incident,

C est le coefficient de la fonction de phase linéaire-anisotrope.

Après avoir introduit le paramètre :

$$\Gamma = \frac{1}{(3(a + \sigma_s) - C\sigma_s)} \quad \text{II.8}$$

L'équation (II.7) se simplifie à

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad \text{II.9}$$

L'équation de transport de G est :

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = S_G \quad \text{II.10}$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann et S_G est une source de rayonnement définie par l'utilisateur.

Ansys Fluent résout cette équation pour déterminer l'intensité du rayonnement local lorsque le modèle Rosseland est actif.

En combinant les Équations (II.9) et (II.10), on obtient l'équation suivante :

$$-\nabla \cdot q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad \text{II.11}$$

II.8. Conditions aux limites:

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable dépendante. Les conditions aux limites pour l'ensemble d'équations régissantes sont présentées ci-dessous :

❖ **L'entrée :**

Un débit massique variable (masse flow intlet) :
 \dot{m} , $T_0 = 298.16 K$.

$$\dot{m} = \rho \cdot u_0 \cdot A$$

$$Re = \frac{\rho \cdot u_0 \cdot Dai}{\mu} \Rightarrow u_0 = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot Dai}$$

$$A = \frac{\pi \cdot Dai^2}{4}$$

❖ **La sortie : (pressure outlet) :**

$$P = P_{atm} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

- ❖ Les interfaces parois –fluide sont couplées :
 (paroi interne du vitre et l'air) et (paroi interne de l'absorbeur et le fluide (eau))

$$k_s \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{paroi}} = k_f \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{paroi}}$$

- ❖ Pour la paroi extérieur du tube de verre, une condition au limite mixte est utilisée pour tenir compte à la fois du rayonnement et du transfert de chaleur par convection. Il y a un échange de chaleur par rayonnement entre cette surface et le ciel.

-Le flux convectif a été calculé en utilisant la loi de Newton :

$$\varphi = h \cdot S \cdot (T_p - T_\infty)$$

$$h = 4 \cdot V_v^{0.58} \cdot D_{ve}^{-0.42}$$

Ou V_v est la vitesse du vent et D_{ve} le diametre exterieure du tube de verre.

Pour la région de M'sila la vitesse moyenne annuelle du vent est de 4.5 m/s .

-Le flux solaire a été modélisé en utilisant (Solar load Model) pour la région de M'sila.

II.9. Calcul des Grandeurs Hydrodynamique et Thermique :

II.9.1. Nombre de Reynolds

Reynolds un ingénieur anglais spécialiste de l'hydrodynamique qui a introduit ce nombre qui porte son nom et qui est constamment utilisé dans les calculs. Il est fonction de trois paramètres : Le diamètre "D", la vitesse "u₀" de et de la viscosité cinématique du fluide "ν".

$$Re = \frac{u_0 D h}{\nu_f} \quad \text{II.12}$$

u₀ : vitesse d'entrée du fluide [m/s].

D_h : Diamètre hydraulique [m].

ν_f: viscosité cinématique du fluide [m²/s].

II.9.2. Coefficient d'échanges convectif h:

Le coefficient d'échanges thermique est un coefficient quantifiant le flux d'énergie traversant un milieu, par unité de surface, de volume ou de longueur. Il est exprimé en [W/m²K].

$$h = \frac{q_c}{A(T_w - T_m)} \quad \text{II.13}$$

q_c : Quantité de chaleur définie par l'expression suivante :

$$q_c = \dot{m} C_p (T_{\text{out}} - T_0) \quad \text{II.14}$$

T_{out} : Température moyenne de sortie [K].

T₀ : Température d'entrée [K].

ṁ : Débit massique [kg/s].

C_p : Capacité calorifique massique à pression constante.

A : surface d'échange thermique [m²].

$$T_{\text{out}} = \frac{\iint A T u \, dA}{\iint T u \, dA} \quad \text{II.15}$$

$$T_w = \frac{1}{A} \iint T dA \quad \text{II.16}$$

$$T_m = \frac{\iiint T u dV}{\iiint u dV} \quad \text{II.17}$$

T_w : Température moyenne de la surface d'échange.

T_m : Température moyenne de mélange basé sur la masse volumique.

II.9.3. Nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les transferts thermiques entre un fluide et une paroi, appelé convectif. Le nombre de Nusselt moyen a été défini comme suit :

$$Nu = \frac{h_m D_h}{k_f} \quad \text{II.18}$$

h_m : Coefficient de convection moyen [W/m^2K].

k_f : Conductivité thermique du fluide [$W/m K$].

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la géométrie étudiée, ainsi que les équations régissant notre problème, on a présenté aussi les conditions aux limites et les hypothèses simplificatrices. Pour la résolution des équations gouvernantes et la création de la géométrie et le maillage, on va utiliser deux logiciels Solidworks et Ansys fluent 18. Les étapes de l'utilisation de ces logiciels sont détaillées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III : PROCEDURE DE SIMULATION NUMERIQUE

CHAPITRE III

Procédure de Simulation Numérique

III.1.Introduction

Dans notre étude, nous avons utilisé deux logiciels, à savoir Ansys 18 et Solidworks, pour résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles dans une configuration tridimensionnelle. Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur ces deux logiciels, puis nous allons expliquer les différentes étapes principales de la création de la géométrie étudiée en utilisant Solid works et du maillage utilisé, ainsi que les étapes de simulation réalisées avec Ansy Fluent.

III.2.Présentation des logiciels AnsysFluent et Solidworks :

► Le logiciel Solid Works

Solidworks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) largement utilisé pour la modélisation 3D. Il offre des fonctionnalités avancées pour la création de géométries complexes, notamment la possibilité de créer des assemblages, d'effectuer des opérations booléennes et de générer des maillages pour des simulations ultérieures.

► Le logiciel Ansys

ANSYS est un logiciel de simulation informatique largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie et des sciences appliquées. Il est développé par l'entreprise ANSYS, Inc. et permet aux ingénieurs de modéliser, simuler et analyser le comportement physique de systèmes complexes.

ANSYS offre une large gamme d'outils de simulation pour différents domaines, tels que la mécanique des structures, la dynamique des fluides, l'électromagnétisme, l'acoustique, l'optique, la thermique, etc. Il permet aux ingénieurs de prédire le comportement d'un produit ou d'un système avant sa fabrication, ce qui permet d'économiser du temps et des ressources.

Le logiciel ANSYS utilise la méthode des éléments finis, une technique numérique pour résoudre des équations mathématiques complexes qui décrivent le comportement

physique d'un système. Il propose une interface graphique conviviale pour la création des modèles, la définition des propriétés des matériaux, la mise en place des conditions aux limites et des charges, et l'analyse des résultats.

ANSYS Fluent est un logiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD) largement utilisé, développé par ANSYS Inc. C'est un outil puissant pour la simulation et l'analyse des phénomènes d'écoulement des fluides et de transfert de chaleur. ANSYS Fluent est utilisé dans diverses industries, notamment l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie, la transformation chimique, et bien d'autres.

Voici quelques fonctionnalités clés et capacités d'ANSYS Fluent :

1. Simulation des écoulements de fluides : ANSYS Fluent vous permet de modéliser et de simuler un large éventail de scénarios d'écoulement de fluides, y compris les écoulements laminaire et turbulent, les écoulements compressibles et incompressibles, les écoulements multiphasiques, et bien d'autres.
2. Analyse des transferts de chaleur : Le logiciel vous permet d'analyser différents mécanismes de transfert de chaleur, tels que la conduction, la convection et le rayonnement. Il peut être utilisé pour étudier la répartition des températures, les taux de transfert de chaleur et les effets thermiques dans les systèmes.
3. Simulations multiphysiques : ANSYS Fluent prend en charge les simulations couplées avec d'autres phénomènes physiques, tels que l'interaction fluide-structure (FSI), le transfert de chaleur conjugué (CHT) et la modélisation de la combustion. Cette fonctionnalité permet une analyse plus complète des problèmes d'ingénierie complexes.
4. Outils de prétraitement : Le logiciel propose un ensemble complet d'outils de prétraitement pour la création de géométrie, le maillage et la configuration des paramètres de simulation. Il offre des fonctionnalités de modélisation 2D et 3D et prend en charge l'importation et l'exportation de différents formats de fichiers.
5. Technologie de solveur : ANSYS Fluent utilise des méthodes numériques avancées et des solveurs pour résoudre les équations gouvernant l'écoulement des fluides et le transfert de chaleur. Il comprend des options pour les simulations en régime permanent et transitoire, ainsi que la modélisation de la turbulence à l'aide de différents modèles de turbulence (par exemple, $k-\epsilon$, $k-\omega$, simulation des grandes échelles).
6. Post-traitement et visualisation : ANSYS Fluent offre une gamme d'outils de post-traitement pour analyser et visualiser les résultats de simulation. Il comprend des options pour

générer des tracés de contours, des tracés vectoriels, des animations et extraire des quantités spécifiques d'intérêt à partir des données de simulation.

Dans l'ensemble, ANSYS Fluent est un logiciel de CFD polyvalent qui aide les ingénieurs et les chercheurs à mieux comprendre le comportement des écoulements de fluides et des transferts de chaleur, à optimiser les conceptions et à prendre des décisions d'ingénierie éclairées.

III.3 Etapes principales de simulation :

- ✓ Conception de la géométrie en utilisant le logiciel SolidWorks.
- ✓ Importer la géométrie dans Ansys Fluent à partir de format de fichier STEP du logiciel SolidWorks.
- ✓ Mailler la géométrie et imposer les conditions aux limites appropriées pour les différentes surfaces du domaine.
- ✓ Configurez les modèles physiques et les options de résolution spécifiques à notre problème.
- ✓ Définissez les propriétés des fluides, telles que la viscosité, la densité, ... etc.
- ✓ Sélectionnez le type d'analyse (fluide incompressible, fluide laminaire, .. etc.)
- ✓ Définissez les paramètres de la simulation, tels que, les critères de convergence.
- ✓ Choisissez les schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle.
- ✓ Appliquez les conditions initiales pour les variables.
- ✓ Lancez la simulation dans Ansys Fluent.
- ✓ Suivez le processus itératif de convergence pour atteindre une solution stable.
- ✓ Surveillez les messages de convergence et ajustez les paramètres si nécessaire.
- Analyse des résultats :
 - ✓ Analysez les résultats de la simulation, tels que les contours et les champs de vitesse, de pression, de température, ...etc.
 - ✓ Identifiez les caractéristiques importantes du flux et les phénomènes fluides associés.
 - ✓ Visualisez et interprétez les résultats à l'aide d'outils de post-traitement dans Ansys Fluent.

III.4. Création de la géométrie sur solidworks:

Les figures ci-dessous représentent les étapes de conception effectuées sur logiciel Solidwork, commençons par la création des cercles et des deux arcs du parabole et de l'allongement en 3D puis l'exportation de la géométrie en fichier STEP pour la mailler dans Ansys fluent.

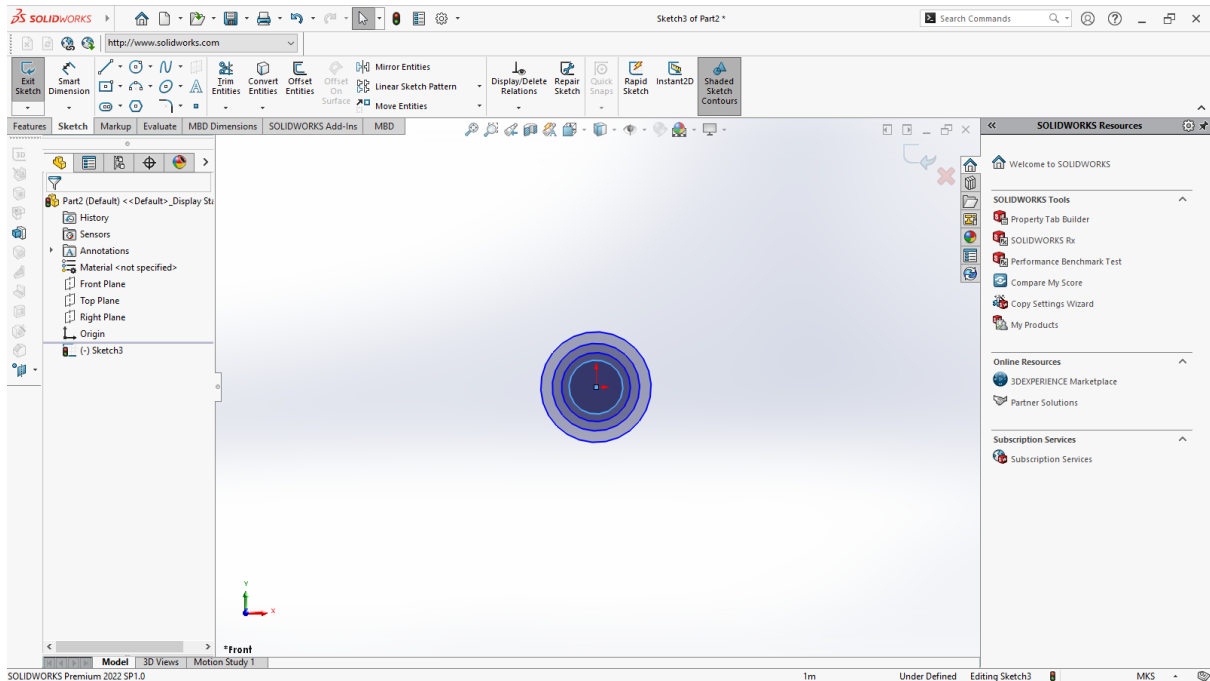


Figure III.1 Dessin de 4 cercles

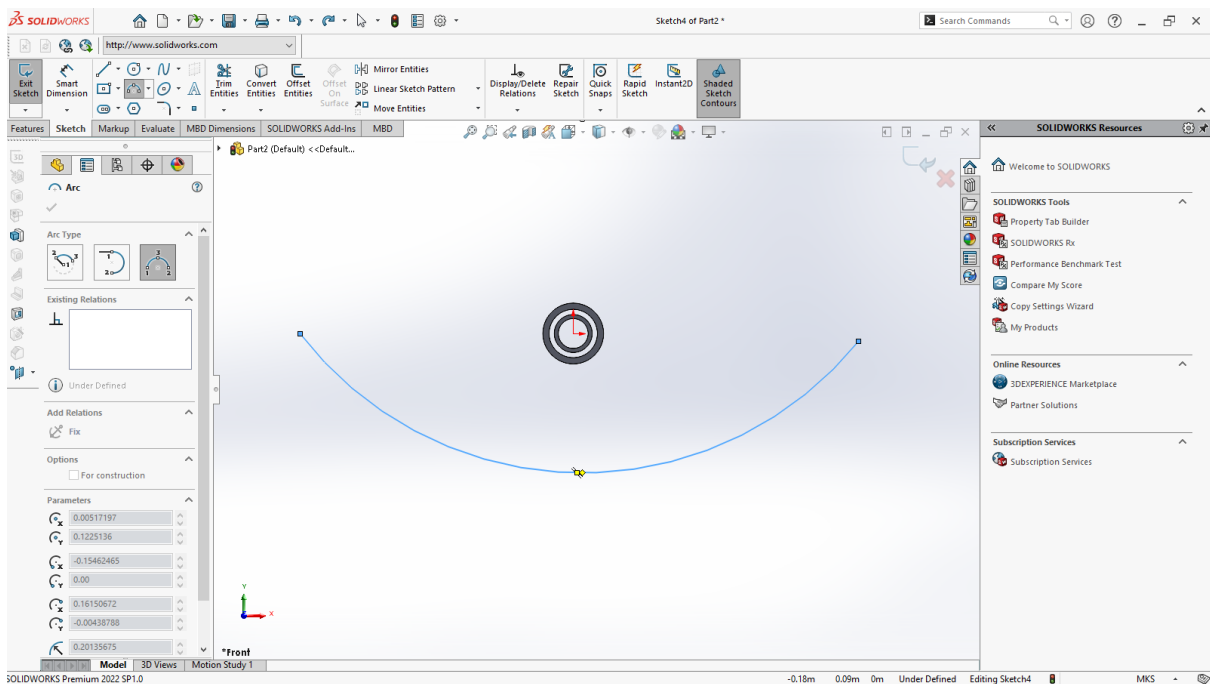


Figure III.2 Creation d'un arc

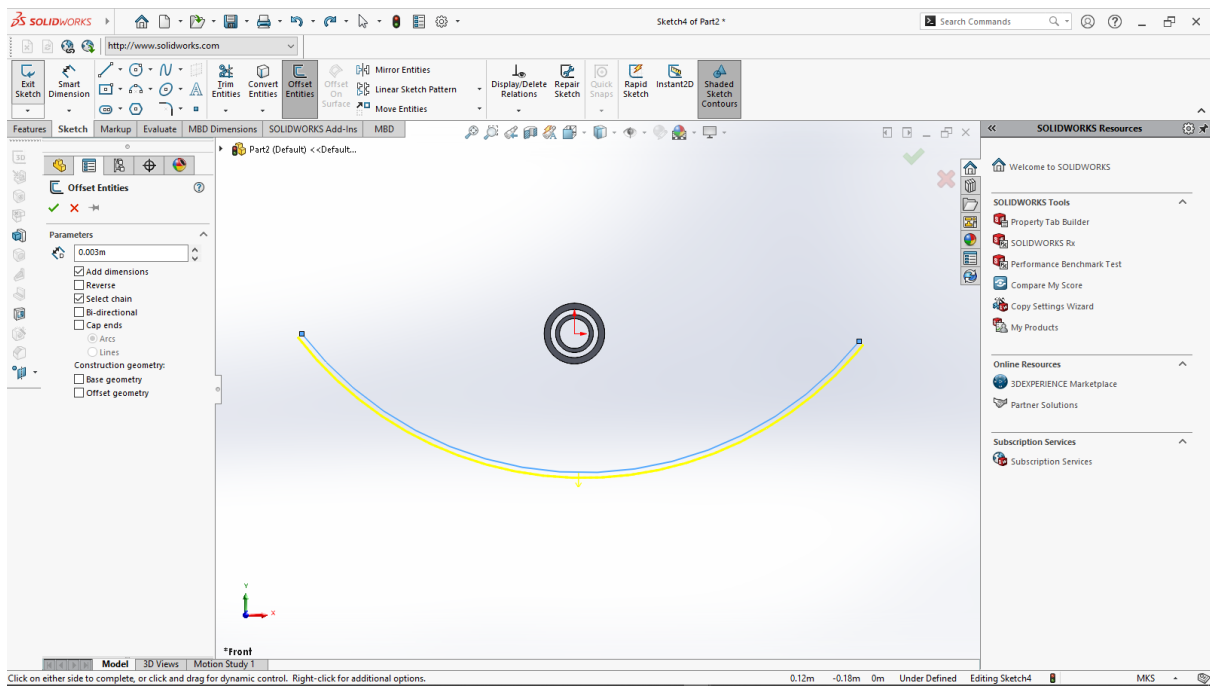


Figure III.3 Creation d'une copie de l'arc

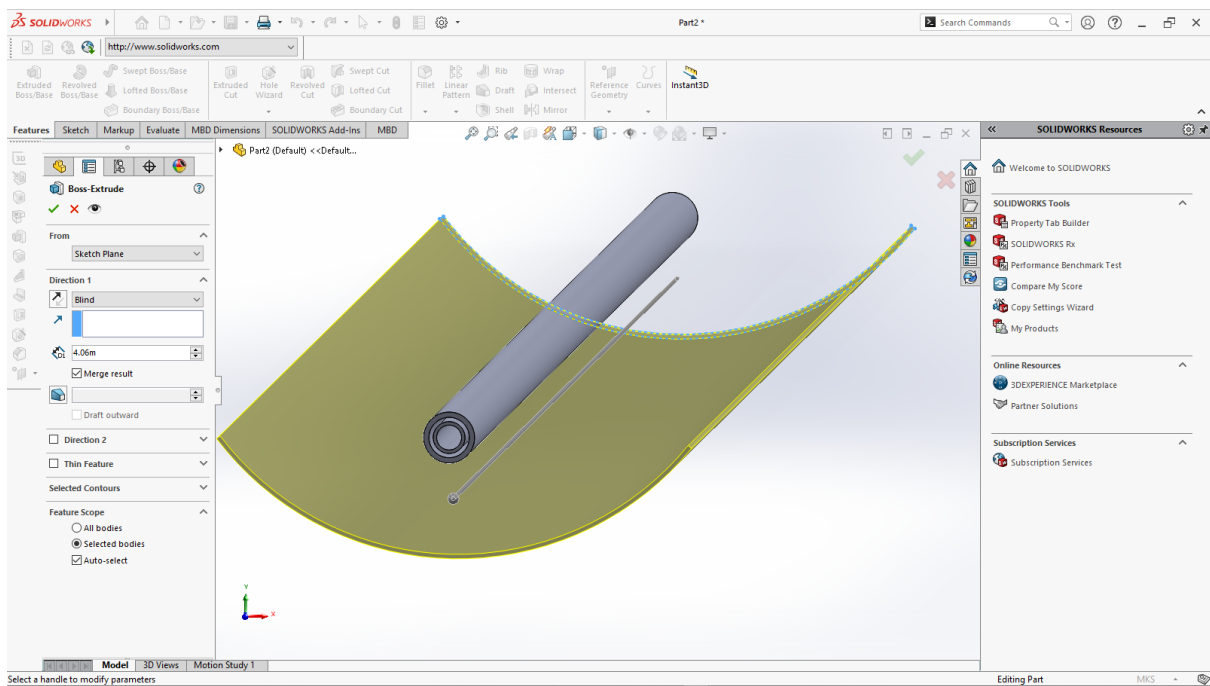


Figure III.4 Fonction extrude des surfaces

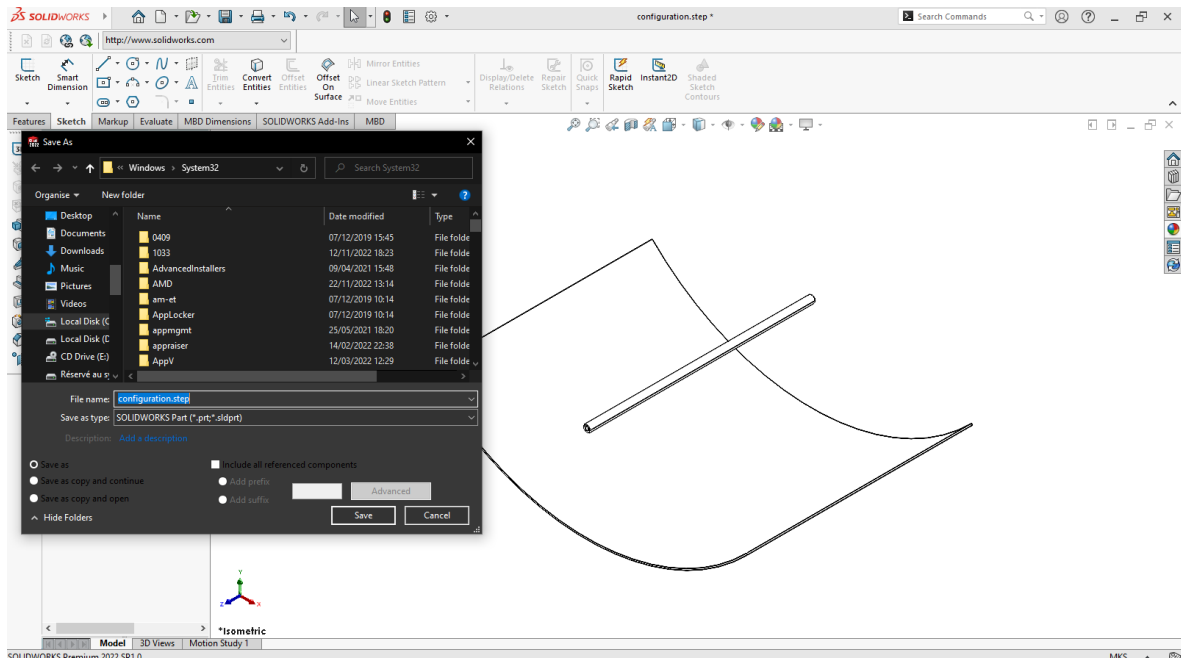


Figure III.5 Exportation de la géométrie en fichier STEP sur Solidworks

III.5. Etapes de simulation avec le logiciel Ansys fluent :

III.5.1. Vue globale de Ansys fluent :

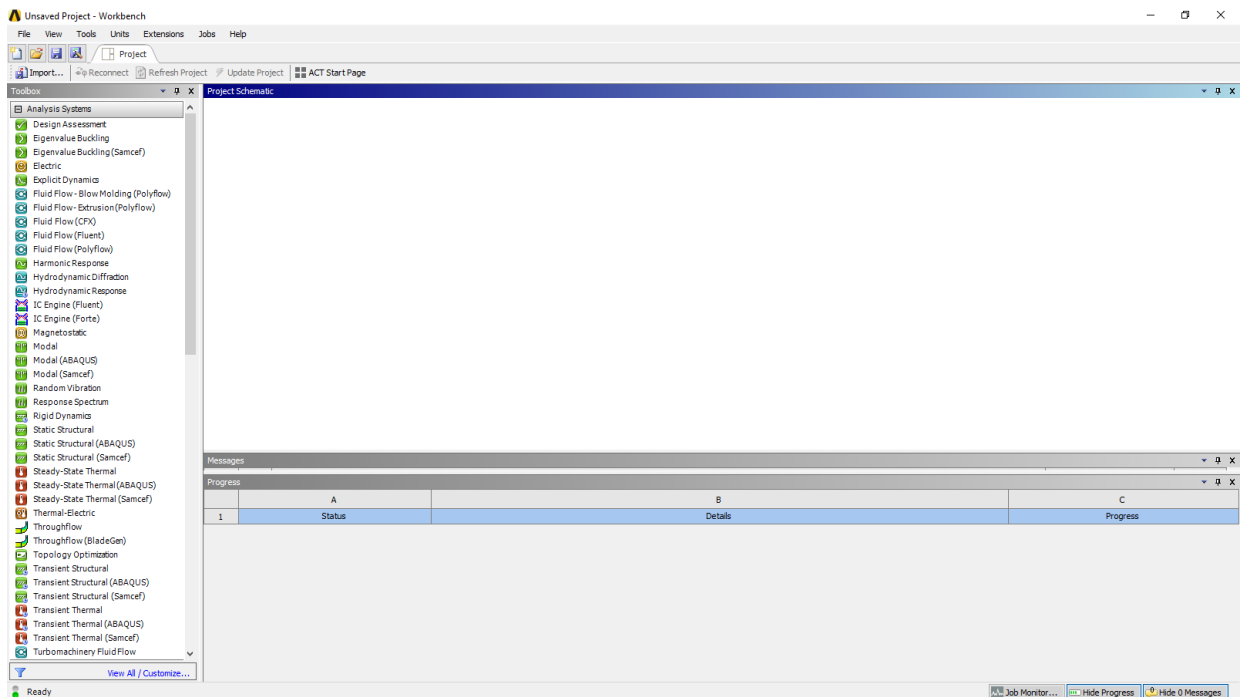


Figure III.6 Vue globale du logiciel Ansys

III.5.2. Insertion de Fluid Flow (Fluent):

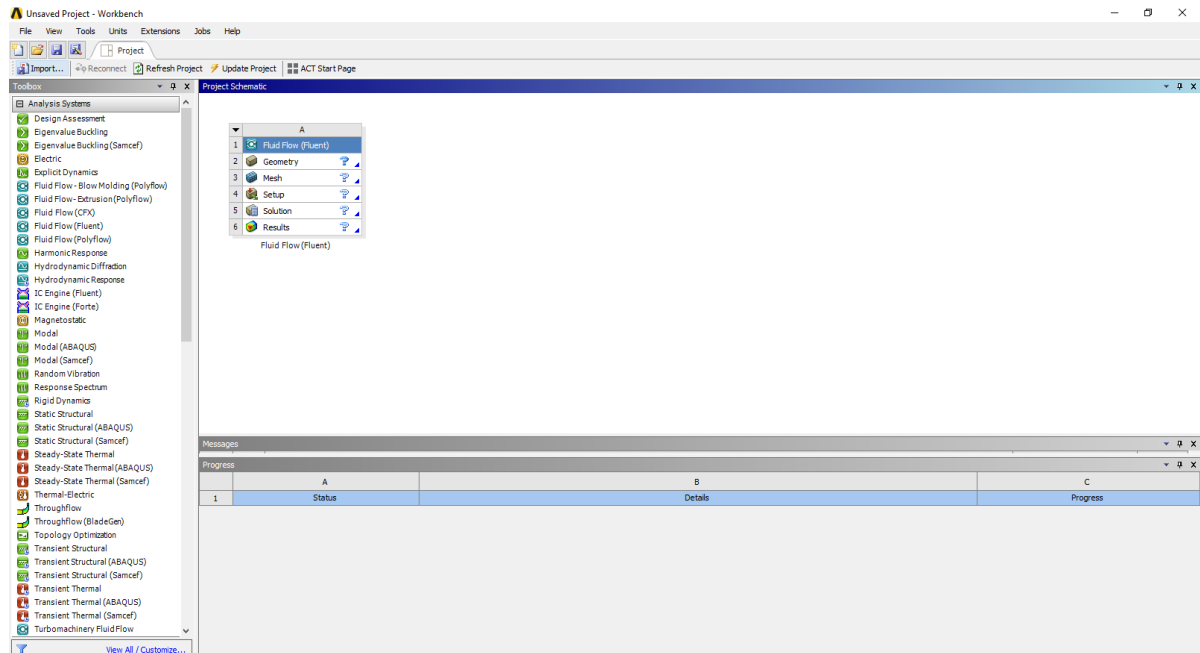


Figure III.7 Insertion de Fluid Flow (Fluent)

III.5.3. Importation de la géométrie:

Geometry → import → .STEP

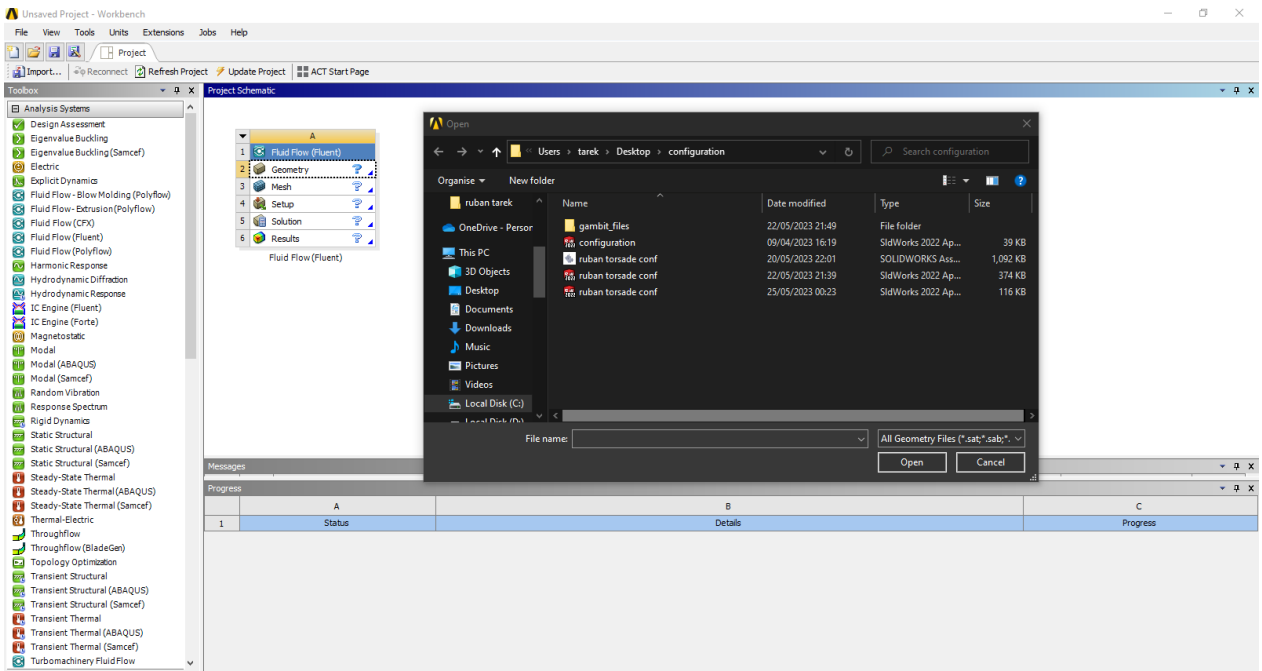


Figure III.8 Importation de la géométrie.

III.5.4. Maillage

- Maillage des lignes:

Mesh → Insert → Edge Sizing

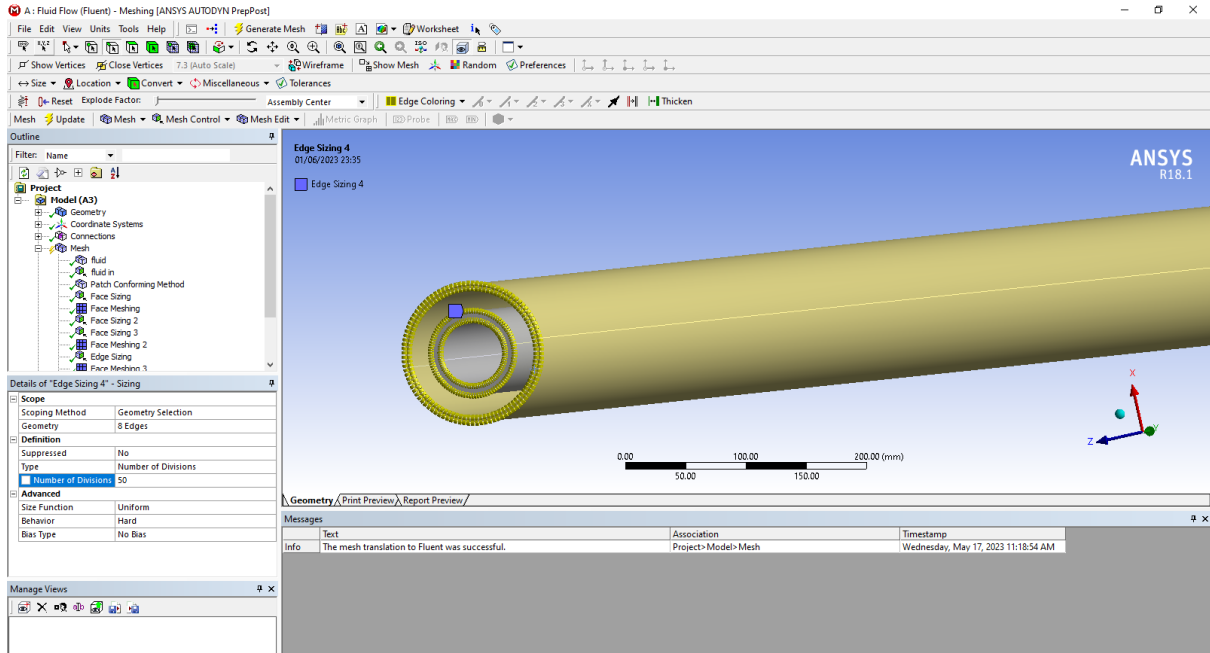


Figure III.9 Maillage des lignes.

- Maillage des surfaces:

Mesh → Insert → Face Sizing

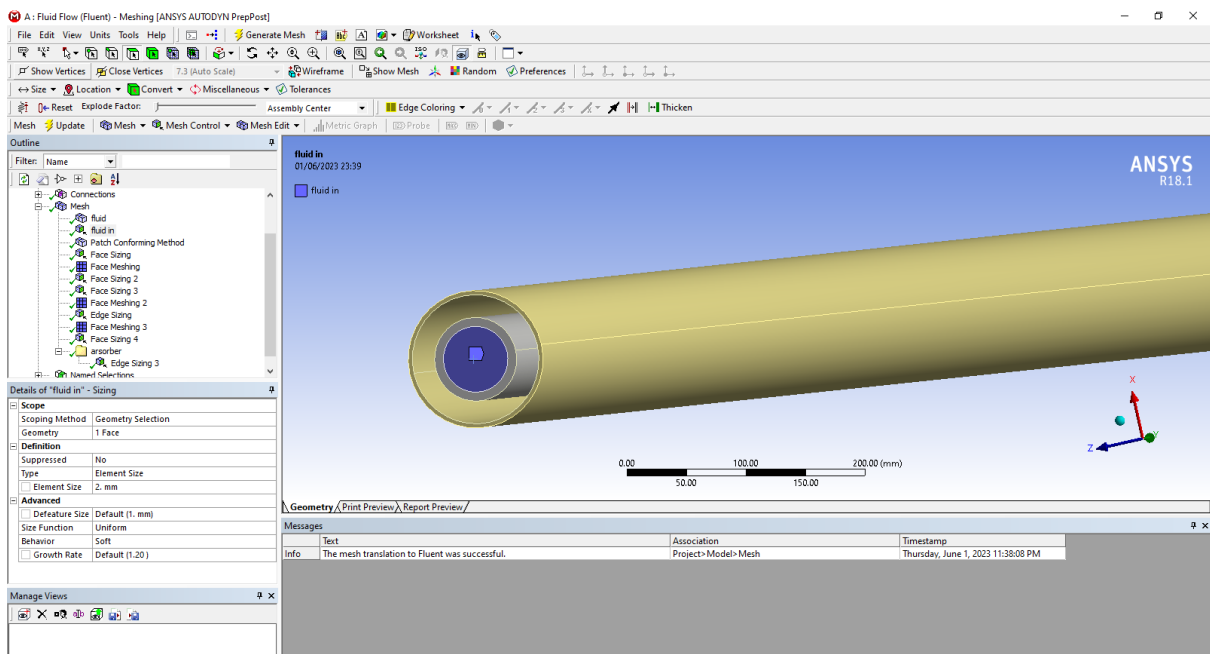


Figure III.10 Maillage des faces.

- Maillage des volumes :

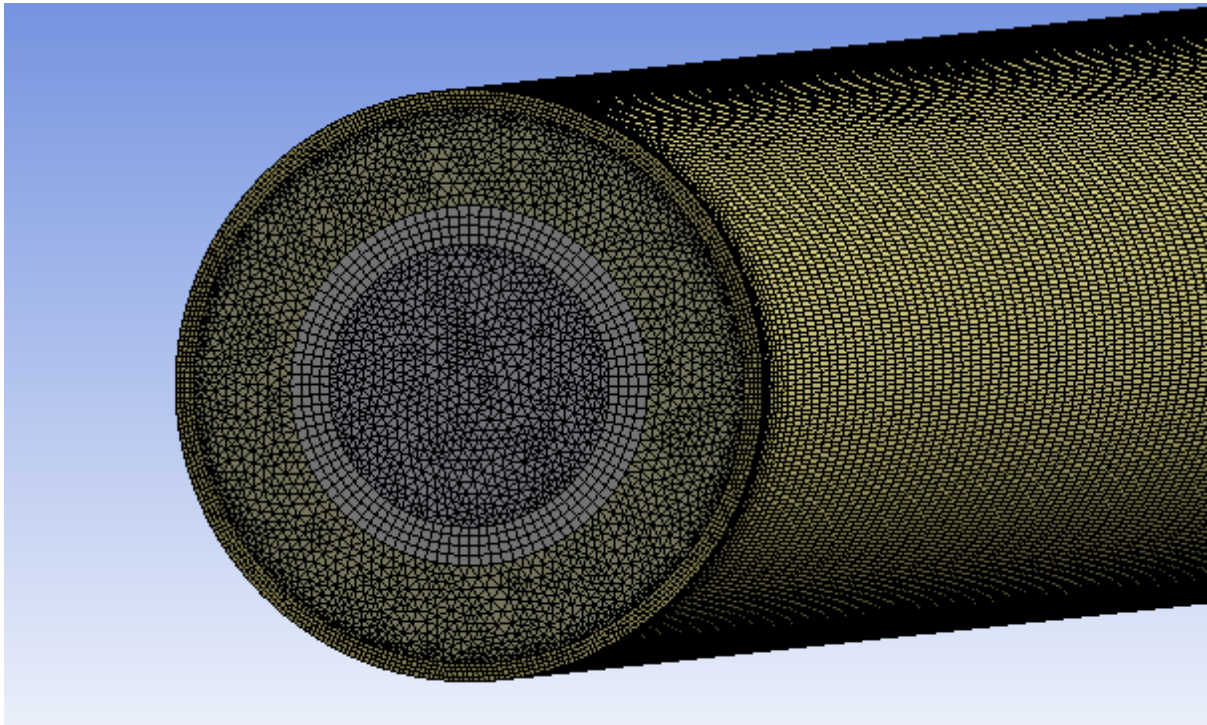


Figure III.11 Maillage des volumes

III.6. Les étapes de simulation sous Ansys Fluent:

III.6.1. Ouverture de la version fluent :

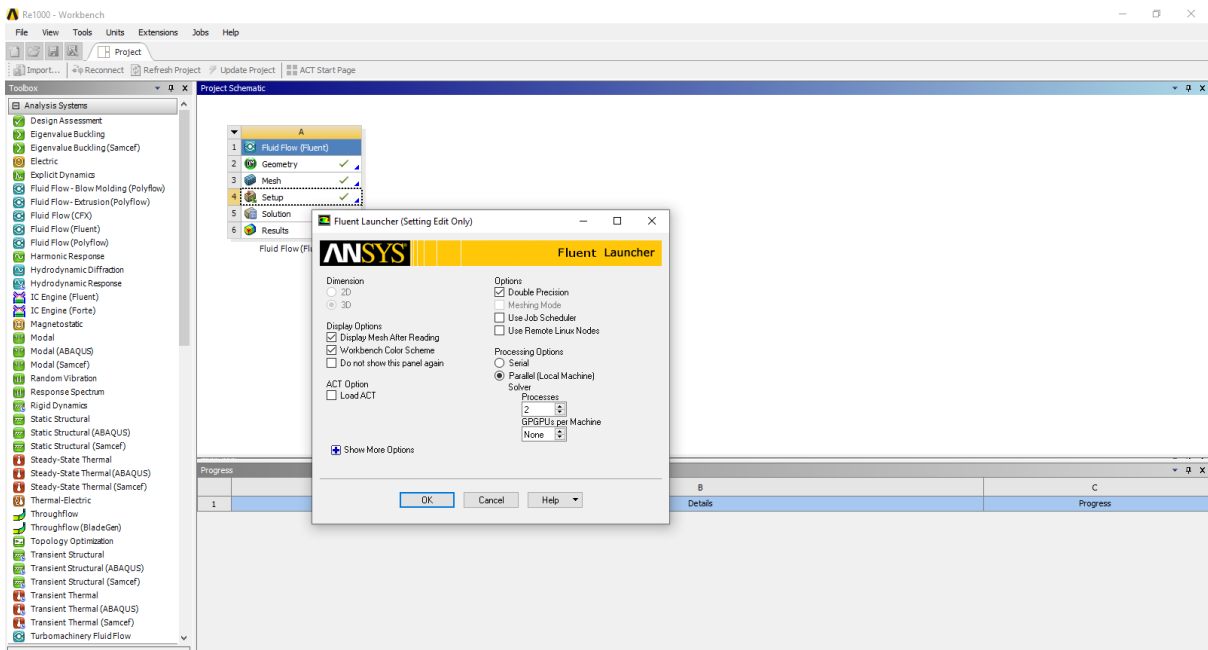


Figure III.12 Ouverture de la version fluent

III.6.2. Autorisation du transfert de chaleur :

Models → energy

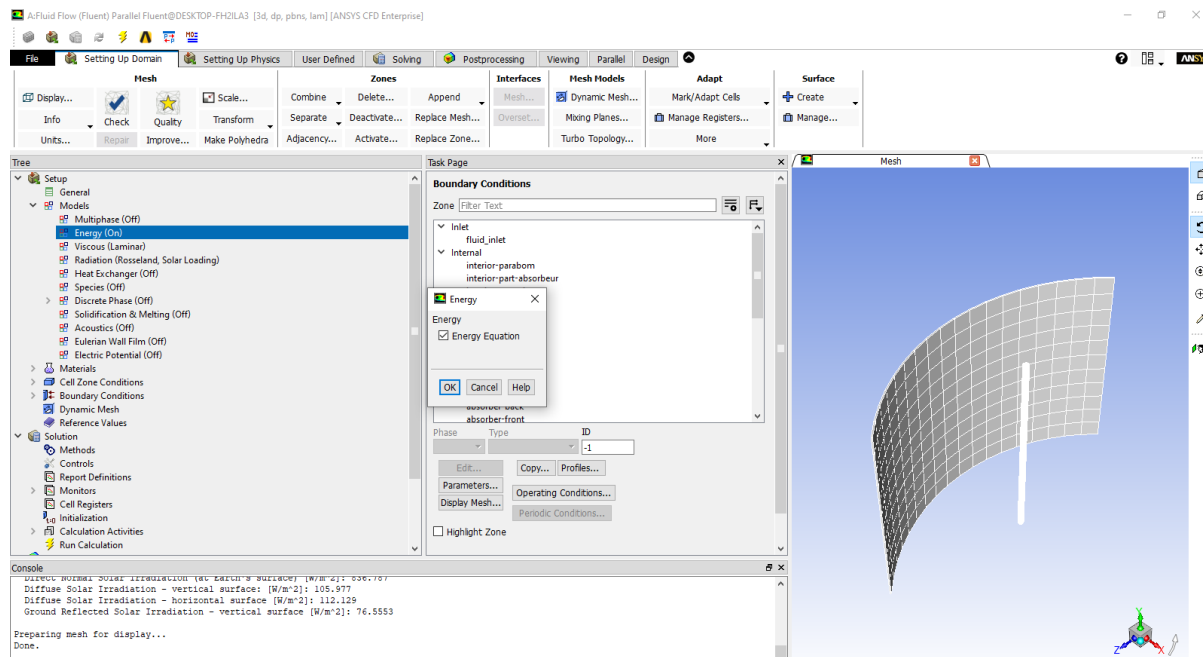


Figure III.13 Autorisation de l'équation d'énergie

III.6.3. Determination du type d'écoulement :

Models → viscous → laminaire

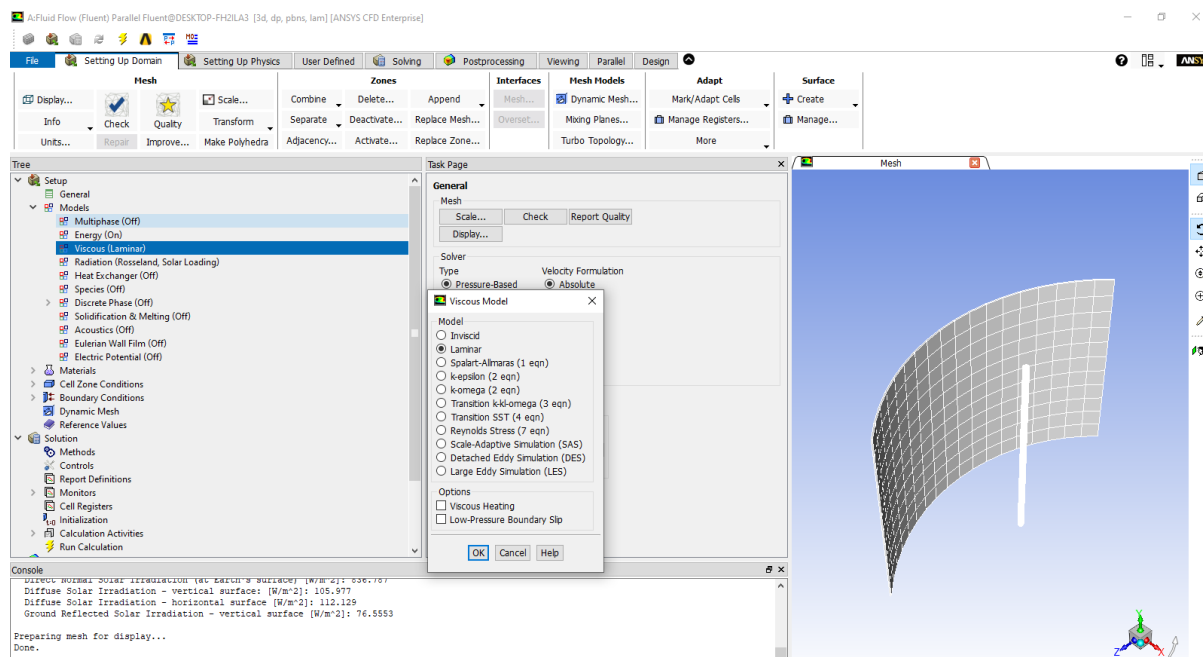


Figure III.14 Determination du type d'écoulement

III.6.4. Autorisation et choix du modèle de radiation :

Models → Radiation

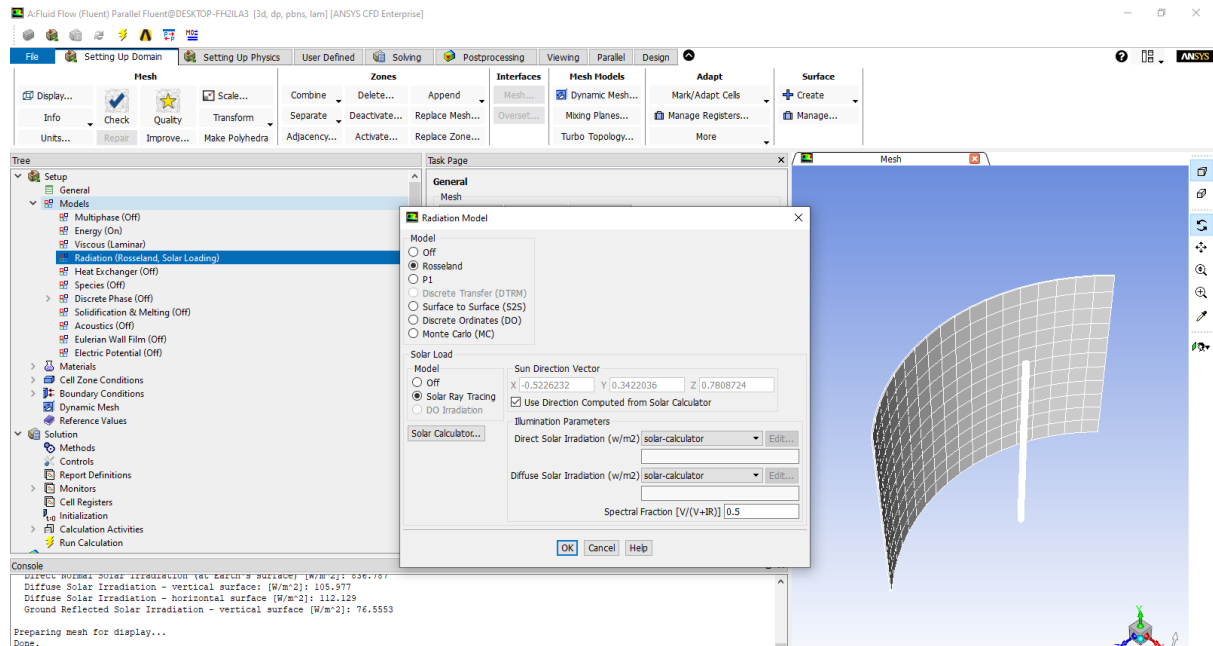


Figure III.15 Autorisation et choix du modèle de radiation

III.6.5. Définition des caractéristiques des matériaux:

Matériau → Fluide

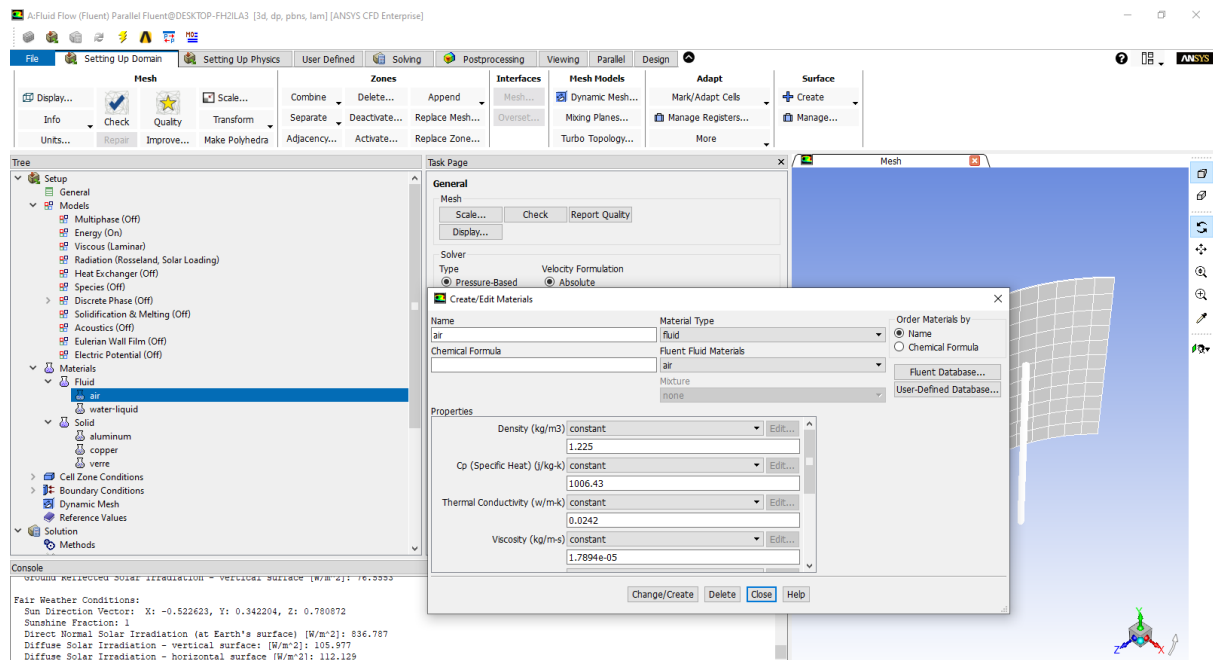


Figure III.16 Définition des caractéristiques du fluide

III.6.6. Définir des zones solide et fluide:

-Cell zone condition

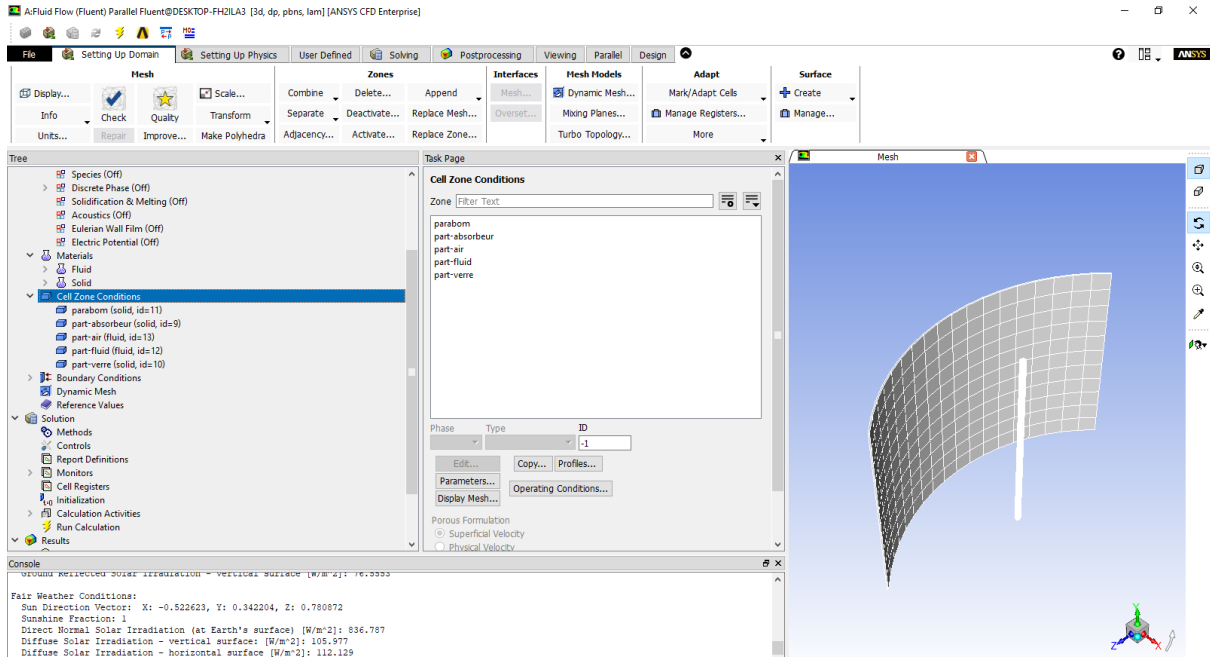


Figure III.17 Définition des zones solide et fluide

III.6.7. Imposer les conditions aux limites :

-Boundary conditions

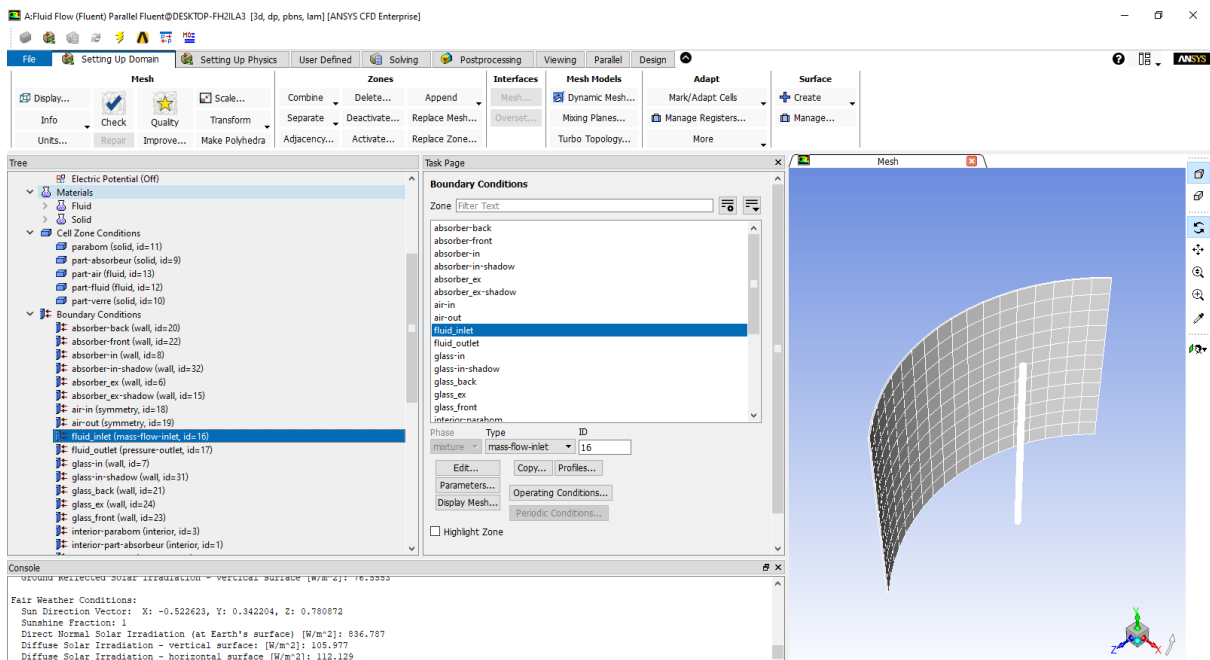


Figure.III.18 Définir les conditions aux limites imposées.

-Boundary condition → **fluide inlet**

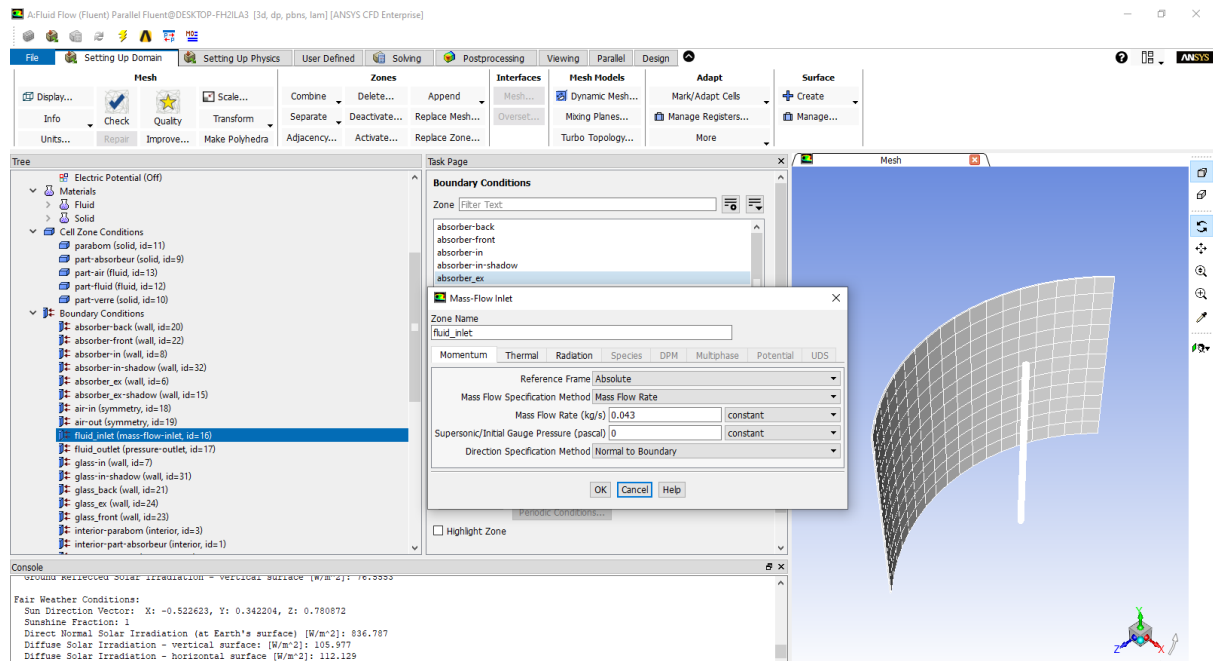


Figure III.19 Définir la condition du fluide inlet

III.6.8.Choix des shemas de discretisation :

Solution → **methods**

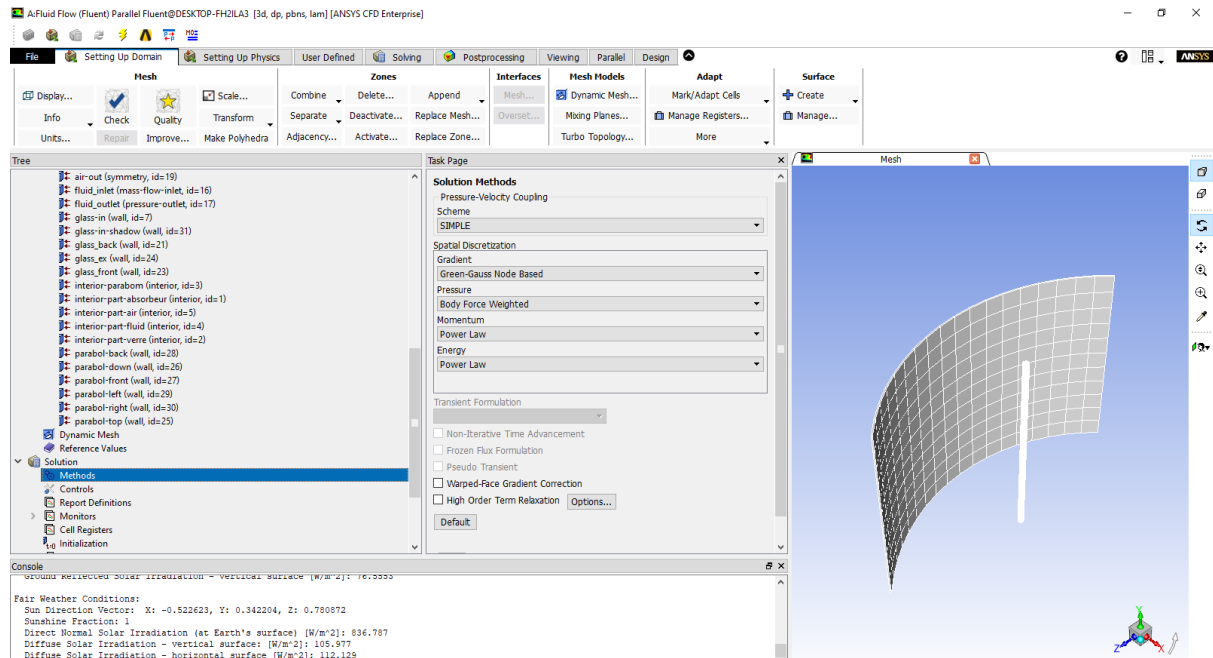


Figure.III.20 Choix des shemas de discretisation

III.6.9.L'initialisation:

Solution → initialisation

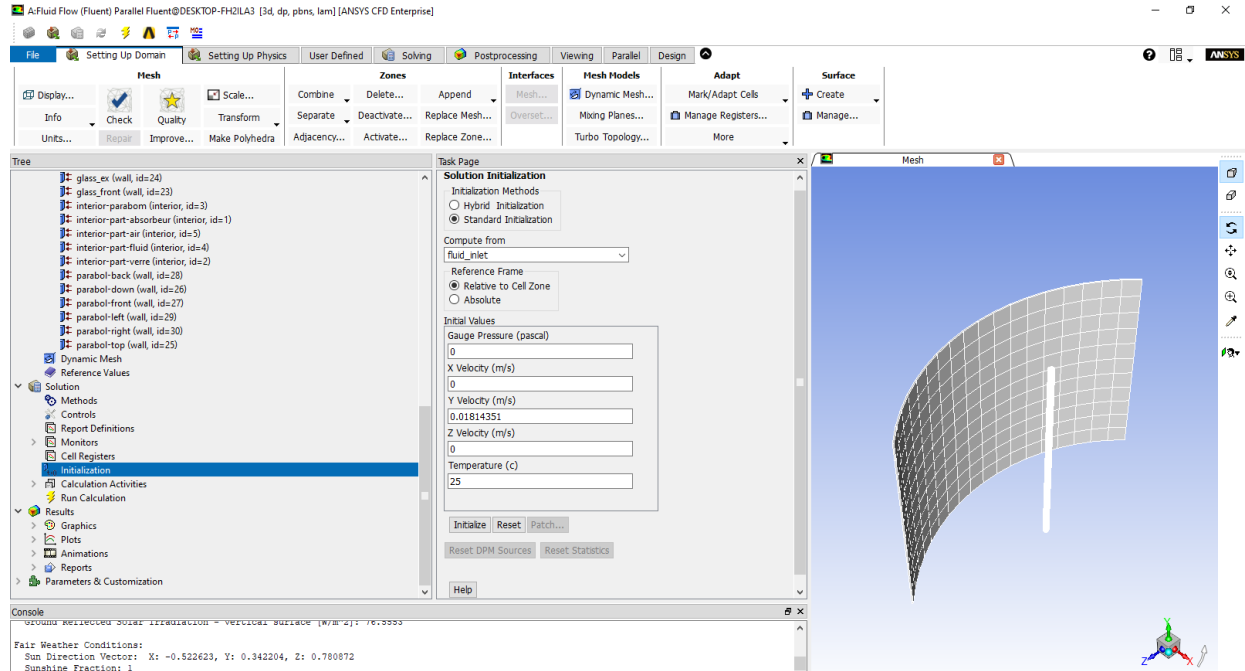


Figure.III.21 Initialisation de la solution.

III.6.10.Choix des résiduels :

Monitors → Residuals

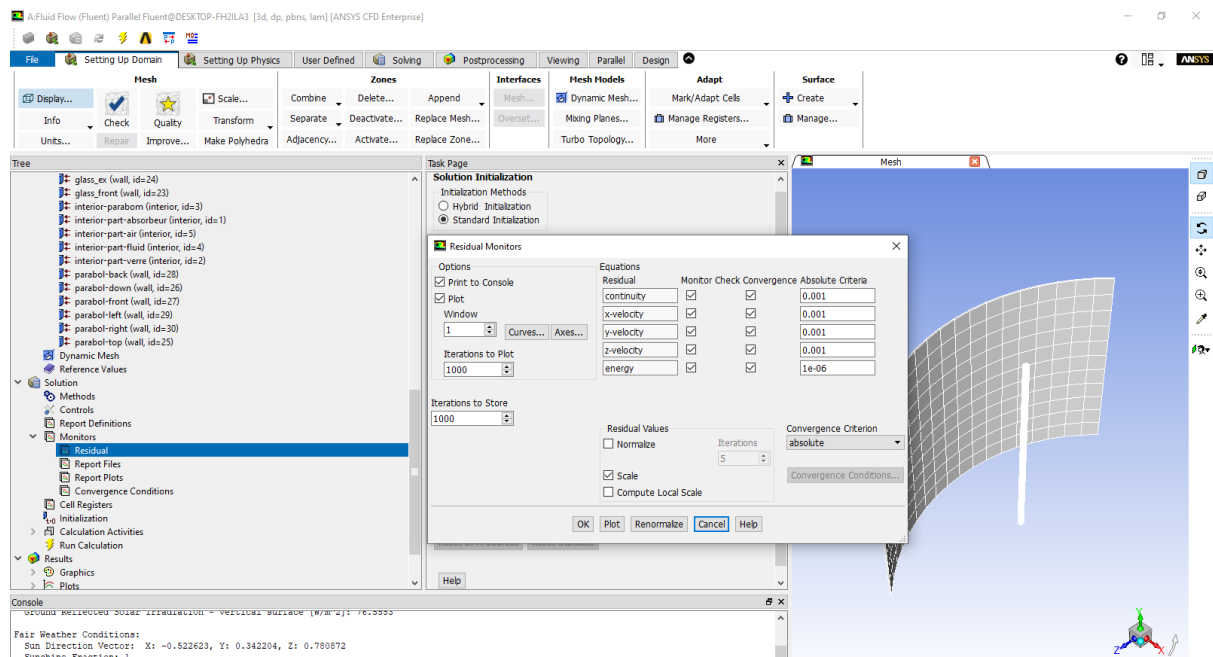


Figure III.22 Choix des résiduels

III.6.11.Lancement du calcul:

-Run calculation

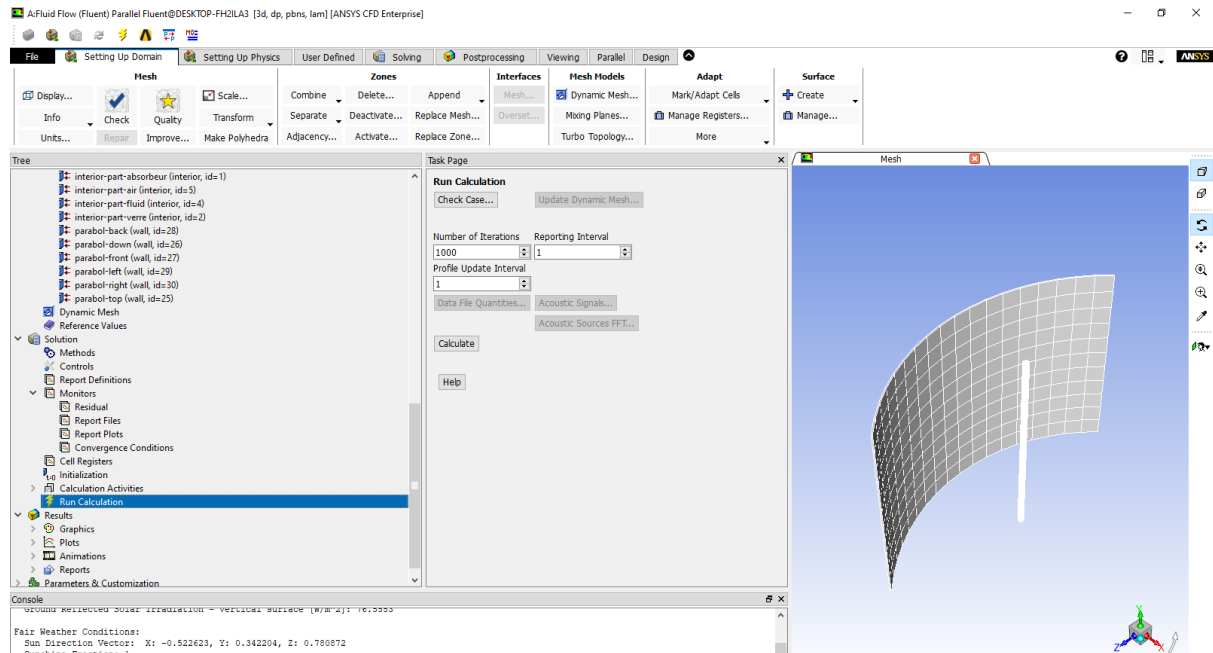


Figure.III.23 Lancement du calcul.

III.6.12.Convergence des calculs :

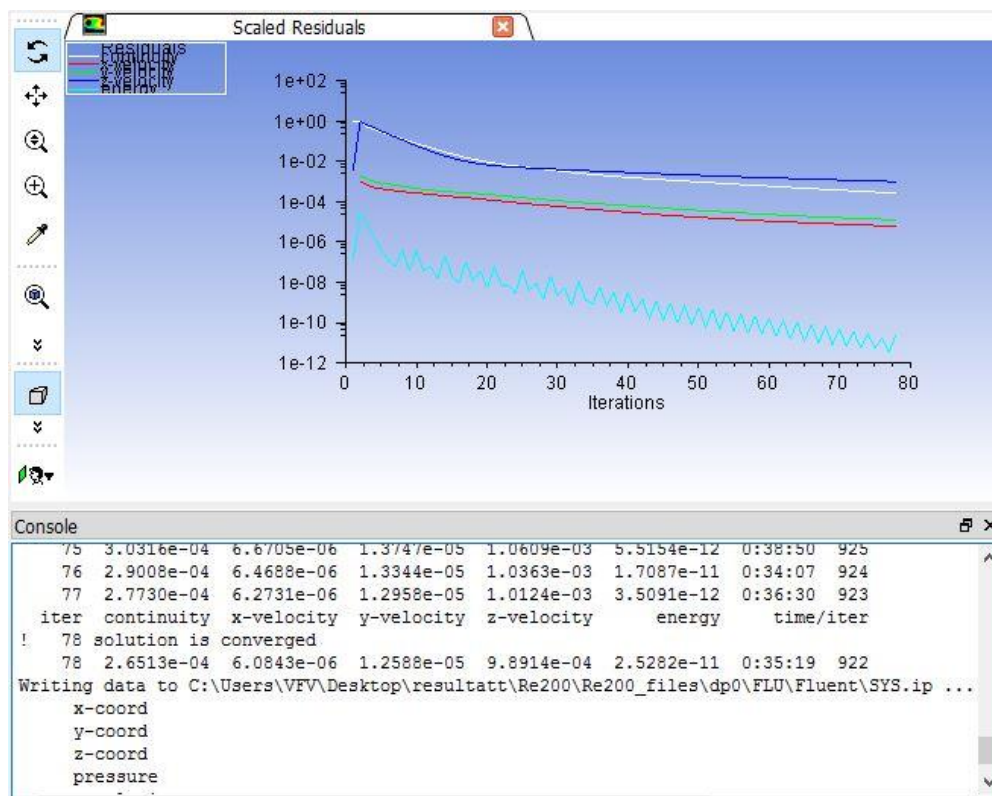
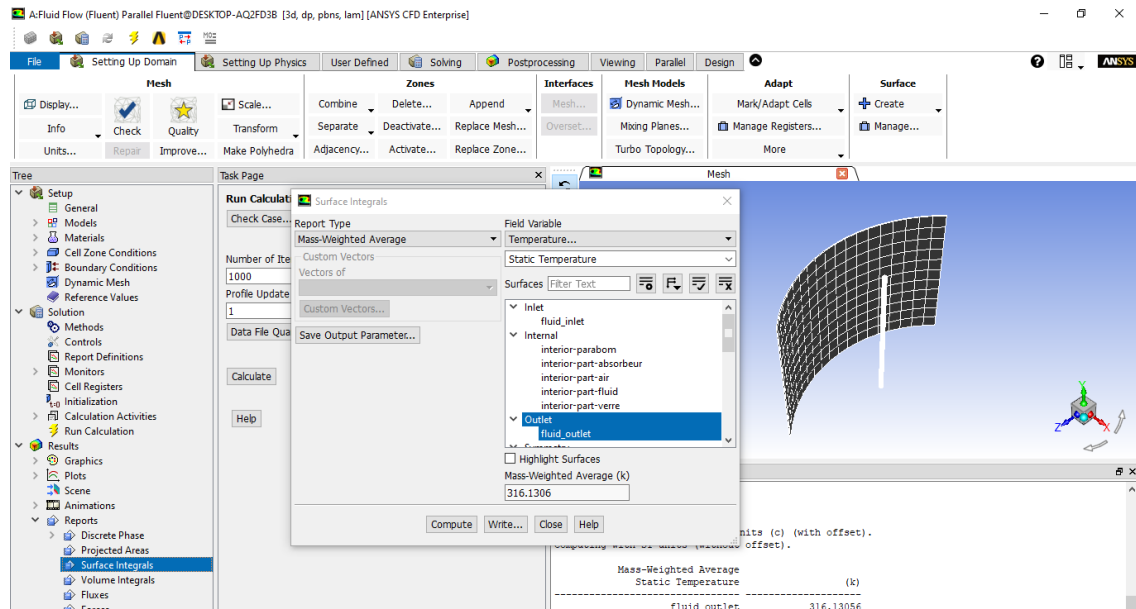


Figure.III.24 Convergence de calcul

III.6.13. Calcul de la température de sortie:

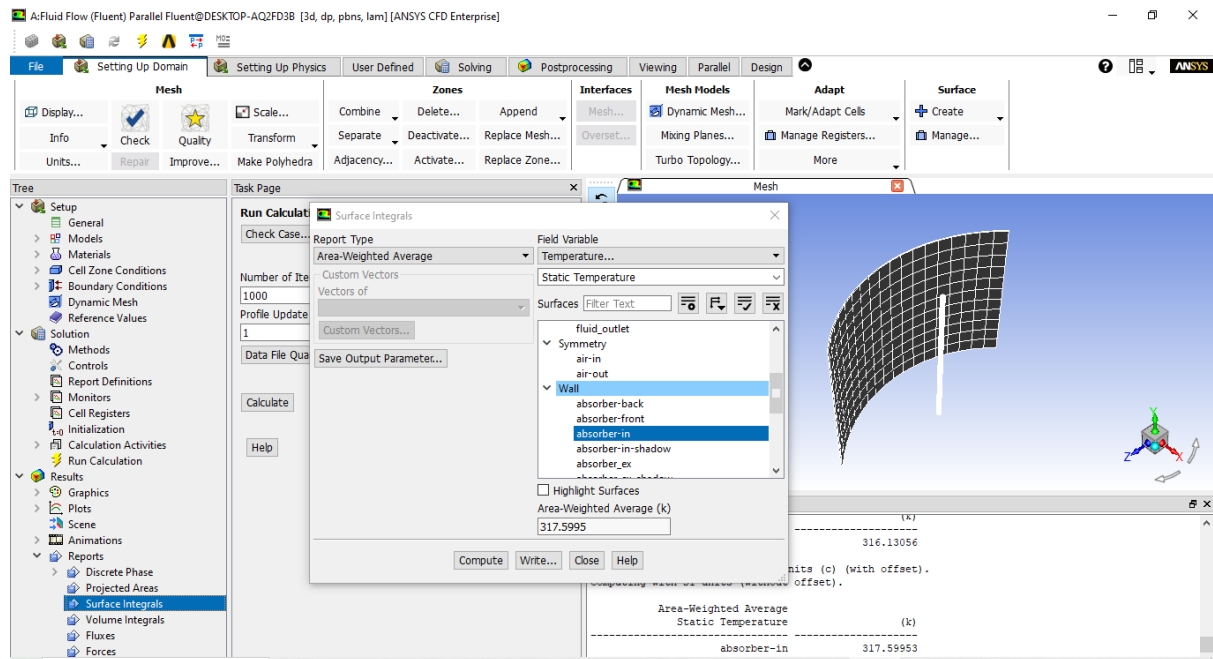
Report \rightarrow surface integral \rightarrow Mass-Weighted average



figureIII.25 calcul de la temperature de sortie

III.6.14. Calcul de la température de la paroi:

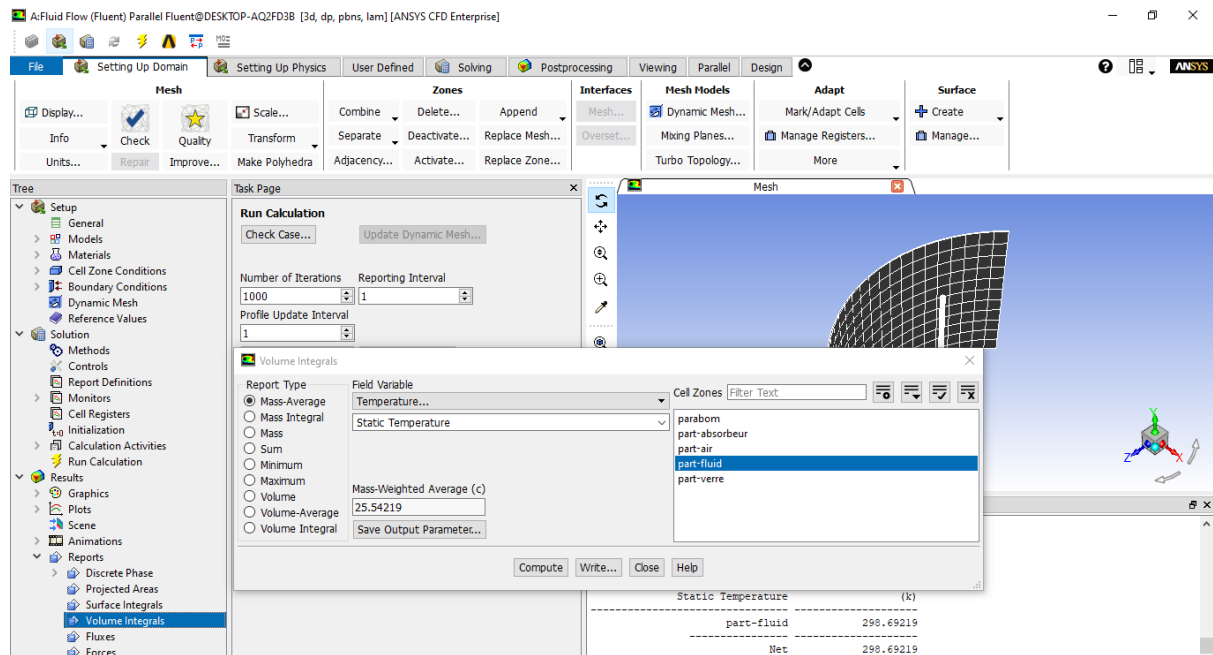
Report \rightarrow surface intgral \rightarrow Area Wheited Average



figureIII.26 Calcul de Temperature de la paroi

III.6.15. Calcul de la température moyenne:

Report \longrightarrow volume intgral \longrightarrow mass average



figureIII.27 Calcul de Temperature moyenne

III.6. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons exposé les différentes étapes d'utilisation du logiciel de création de la géométrie et le maillage en utilisant Solid works et Ansys et la résolution des équations algébriques issues de système physique en utilisant le Ansys Fluent. Les résultats de la simulation sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats de la simulation numérique obtenus à l'aide du code CFD (Ansys Fluent) relatives à la convection mixte laminaire stationnaire dans un capteur cylindro-parabolique dans les deux cas étudiés : avec l'eau pure et avec le nanofluide (CuO+eau) pour différentes concentrations $\phi = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$. Nos simulations numériques ont été effectuées pour des nombres de Reynolds qui varient entre 200 et 2000. Nous présentons pour chaque cas, les contours de température et de vitesse et les lignes de courant ainsi que la variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds

IV.2 Les paramètres utilisés :

❖ Les propriétés physiques des fluides utilisés

-L'eau pure :

- ◆ Masse volumique : $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$
- ◆ La capacité calorifique : $C_p = 4182 \text{ (J/kg K)}$
- ◆ La conductivité thermique : $\lambda = 0.6 \text{ (W/m K)}$
- ◆ La viscosité dynamique : $\mu = 0.001003 \text{ kg/m.s.}$

-L'air :

- ◆ Masse volumique : $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
- ◆ La capacité calorifique : $C_p = 1006.43 \text{ (J/kg K)}$
- ◆ La conductivité thermique : $\lambda = 0.0242 \text{ (W/m K)}$
- ◆ La viscosité dynamique : $\mu = 0.001003 \text{ kg/m.s.}$

Les propriétés physiques des matériaux utilisés

-Aluminium

- ◆ Density: $\rho = 2719 \text{ kg/m}^3$
- ◆ La capacité calorifique : $C_p = 871 \text{ (J/kg K)}$

♦ La conductivité thermique : $\lambda = 202.4$ (W/m K)

-Le Cuivre:

♦ Masse volumique : $\rho = 8978$ kg/m³

♦ La capacité calorifique : $C_p = 381$ (J/kg K)

♦ La conductivité thermique : $\lambda = 387$ (W/m K)

♦ l'absorbtion = 0.95

Verre :

♦ Masse volumique : $\rho = 2800$ kg/m³

♦ La capacité calorifique : $C_p = 750$ (J/kg K)

♦ La conductivité thermique : $\lambda = 0.7$ (W/m K)

♦ L'émissivité = 0.9

♦ L'absorbtion = 0.1

❖ **Les propriétés physiques de nano fluide (oxyde de cuivre CuO)**

Tableau VI : Les propriétés physiques du nanofluide (oxyde de cuivre CuO)

ϕ	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	μ (kg/m.s)	λ (W/m.K)
1%	1050.33	3959.7	0.00108	0.631
2%	1103.56	3761.7	0.0012	0.65
3%	1156,8	3417,8	0,00133	0.666
4%	1210.02	3581.8	0.00149	0.68

❖ **Les Données de la location :**

♦ Longitude : 4°14N

♦ Latitude : 35°18 E

♦ Décalage horaire de 1 heure

♦ Pour une date du 20 juin a 13h

IV.3. Resultats et Discussions

IV.3.1. Cas de l'eau pure :

IV.3.1.1. Contours de températures :

Les Figures (IV.1) à (IV.3) présentent les contours de température dans le fluide pour des nombres de Reynold $Re=600,1000$ et 2000 . On remarque que la température de l'eau diminue en augmentant le nombre de Reynolds. L'accroissement du nombre de Reynolds engendre une augmentation dans la vitesse d'entrée et par conséquent une augmentation du débit massique qui provoque une diminution dans la temperature. La répartition radiale de la température montre que la température est maximale sur la paroi interne du tube formant une couche limite thermique fine et elle diminue en allant vers le centre. On constate aussi que la temperature du fluide augmente progressivement en allant de l'entrée vers la sortie pour atteindre une valeur maximale à la sortie de l'absorbeur.

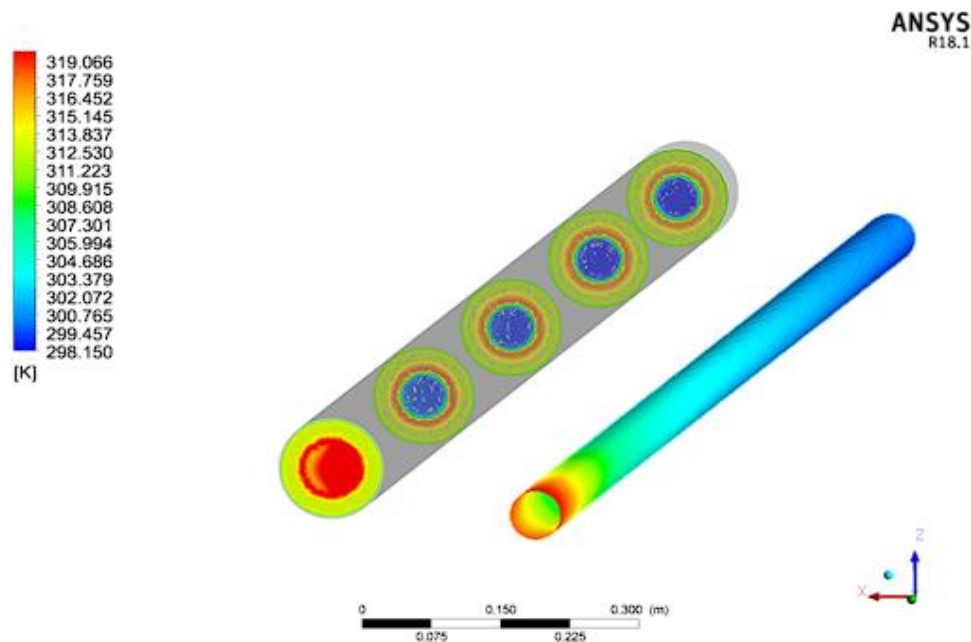


Figure IV.1 Les contours de température pour $Re=600$

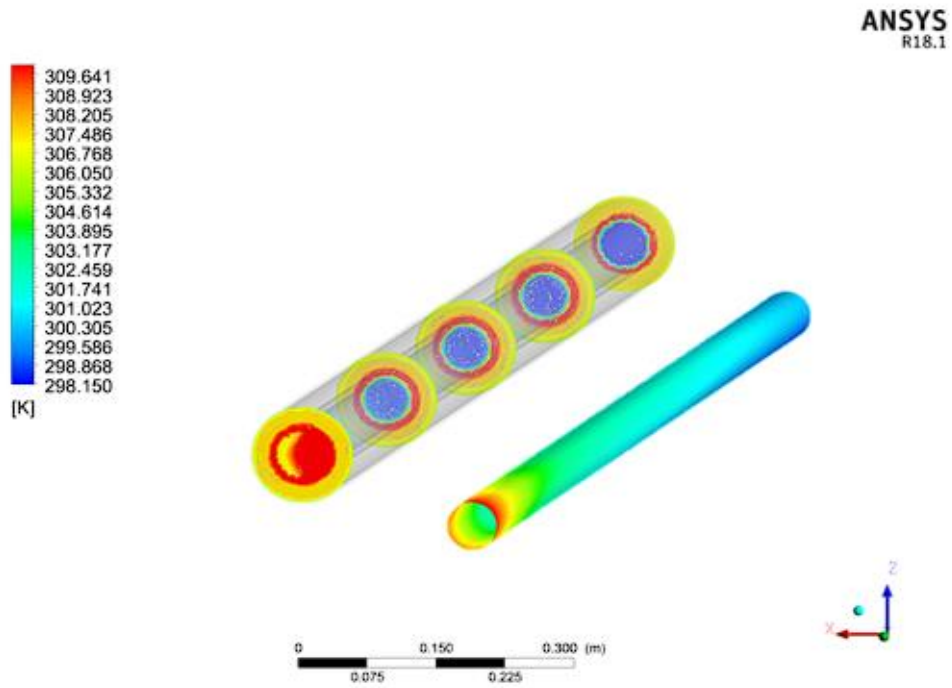


Figure IV.2 Les contours de température pour $Re=1000$

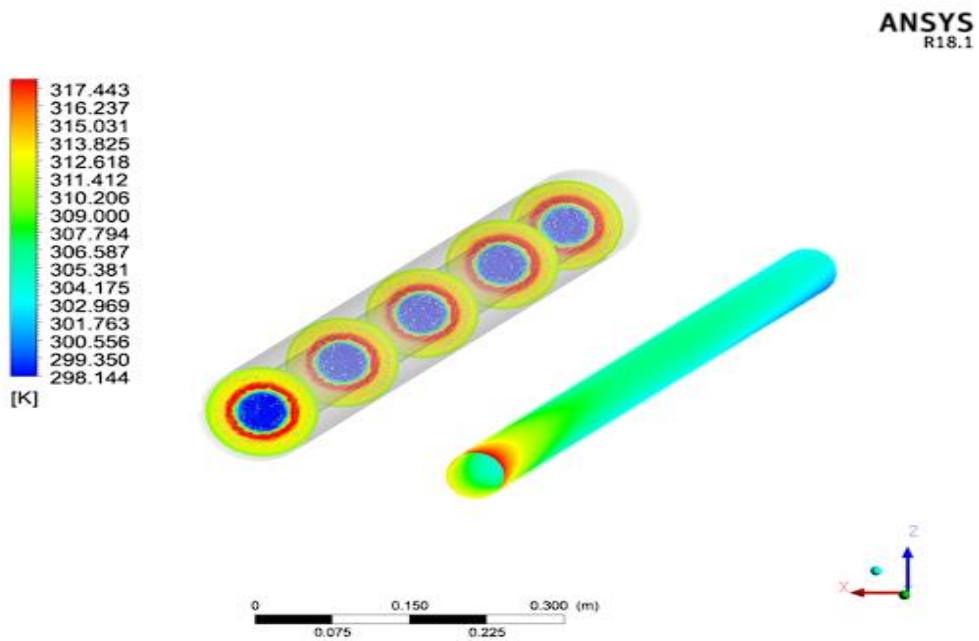


Figure IV.3 Les contours de température pour $Re=2000$

Les performances thermiques du capteur peuvent être aussi déterminées en calculant la variation de la différence de température $\bar{\Delta T}$ entre l'entrée et la sortie de l'absorbeur. La Figure IV.4 indique la variation de $\Delta T = T_{out} - T_{in}$. En général, les résultats montrent que ΔT diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

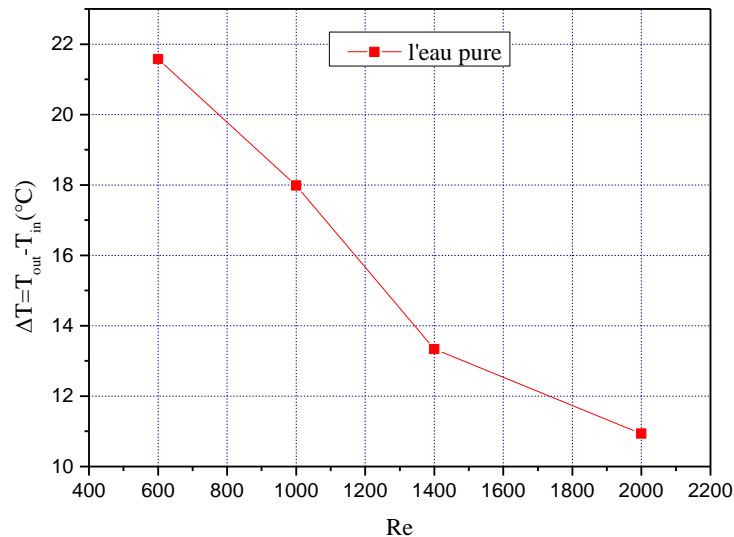


Figure IV.4 La différences des températures dans le cas de l'eau pure en fonction de Re

IV.3.1.2. Contours de vitesses :

Pour avoir des détails importants sur la structure de l'écoulement, les contours de vitesses sont présentés dans les Figures (IV.5) à (IV.7) pour un nombre de Reynolds $Re=600,1000$ et 2000 .

Les contours de vitesse commencent par un profil de vitesse uniforme à l'entrée de l'absorbeur, tandis qu'elles deviennent nulles sur la paroi du tube à cause de la condition de non glissement appliquée sur la surface interne de l'absorbeur et augmente en s'éloignant de la paroi pour atteindre des valeurs maximales.

On constate également que la vitesse d'écoulement augmente en allant de l'entrée vers la sortie de l'absorbeur à cause de l'augmentation de la température du fluide.

On peut noté aussi que la vitesse d'écoulement augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

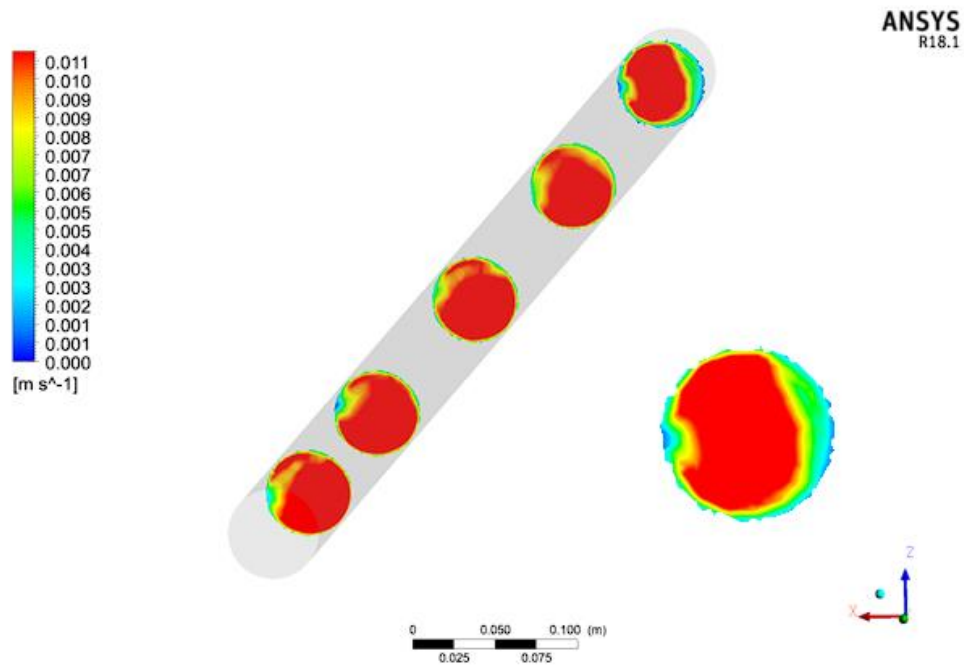


Figure IV.5 Les contours de vitesse dans Re=600

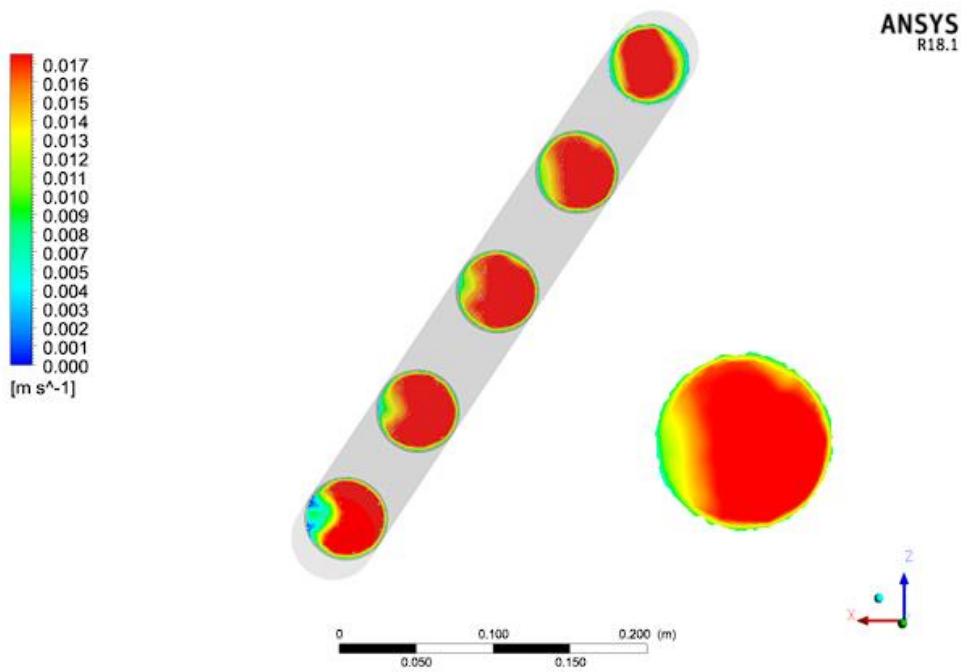


Figure IV.6 Les contours de vitesse dans Re=1000

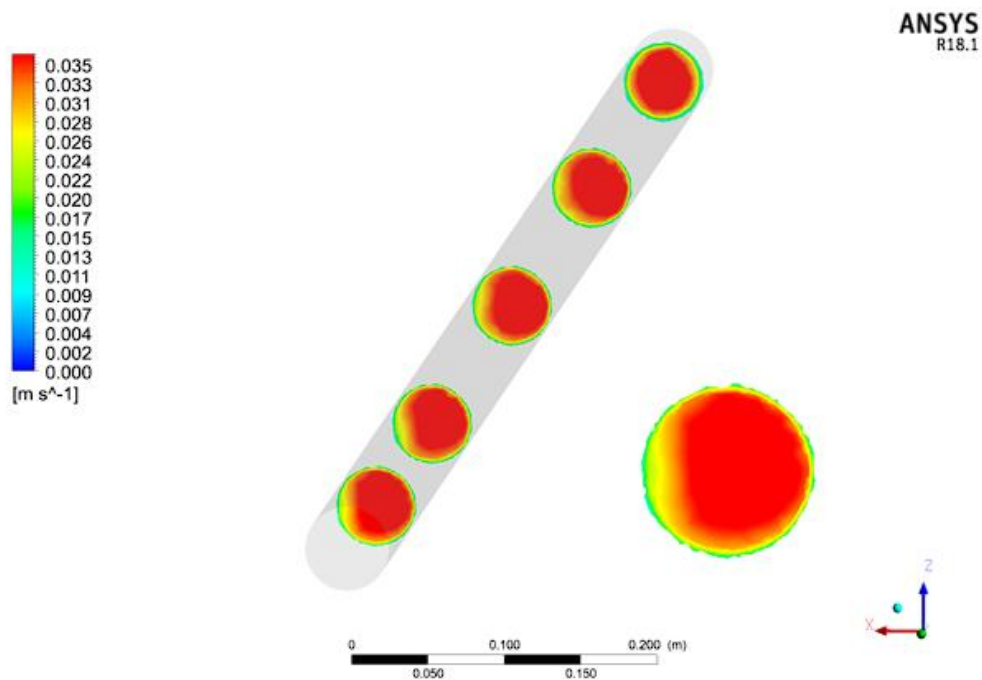


Figure IV.7 Les contours de vitesse dans $Re=2000$

IV.3.1.3. Variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre du Reynolds

Le nombre de Nusselt est le rapport du flux de chaleur convectif et le flux de chaleur conductif, il est calculé à partir de l'équation (II.18) et ses résultats sont présentés sur la figure (IV.8).

Cette figure montre l'évolution du nombre de Nusselt d'eau en fonction du nombre Reynolds Re dans l'absorbeur. On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'accroissement de Re car l'augmentation de Reynolds et par conséquent la vitesse d'entrée favorise le transfert convectif entre le fluide et la paroi ce qui provoque une augmentation du nombre de Nusselt.

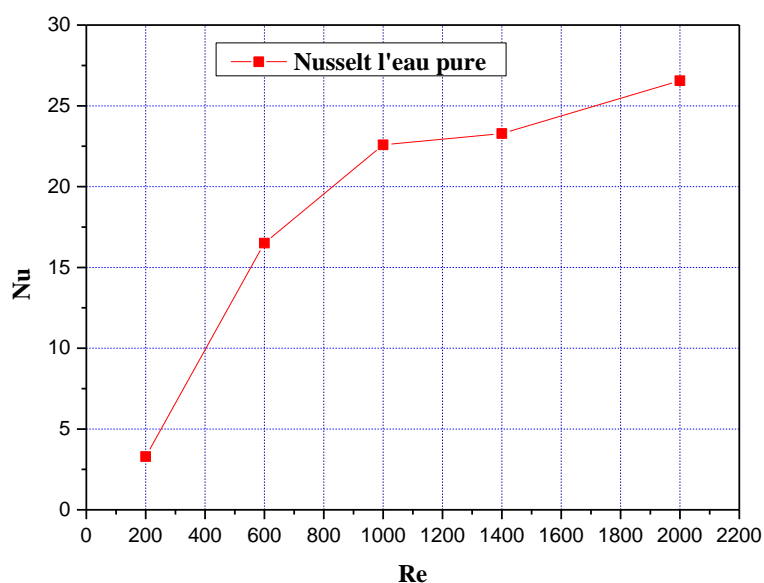


Figure IV.8 Variation du nombre de Nusselt de l'eau en fonction de Re.

IV.3.1.4. Variation du coefficient de convection h

La figure IV.9 représente la variation du coefficient de convection en fonction du nombre de Reynolds. Nous constatons que le coefficient de convection h augmente avec l'accroissement du nombre de Reynolds.

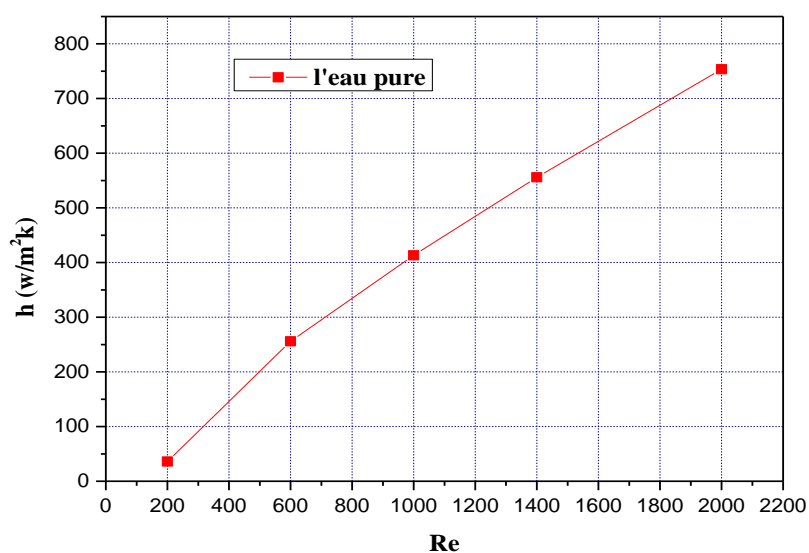


Figure IV.9 Variation du coefficient de convection en fonction de Re de l'eau

IV.3.2. Cas du nanofluide (CuO+eau):

IV.3.2.1 Contours de température :

Les Figures (IV.10) à (IV.12) présentent les contours de température pour le nanofluide (CuO+eau) pour un nombre Reynold $Re=1000$ et pour des concentrations $\phi= 1\%, 2\%$ et 4% .

On a remarqué que la température de nanofluide est meilleure à celle de l'eau pure, l'ajout des nanoparticules à l'eau améliore d'une façon significative le transfert de chaleur convectif et améliore la température du nanofluide à la sortie de l'absorbeur.

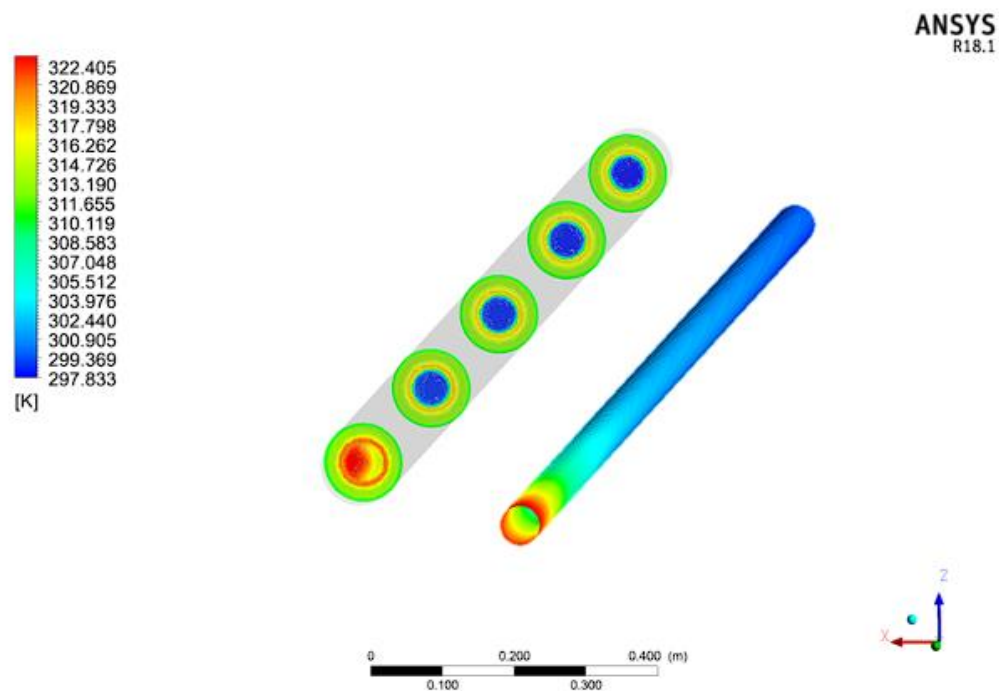


Fig IV.10 Les contours de température pour une concentration $\phi= 1\%$ ($Re=1000$)

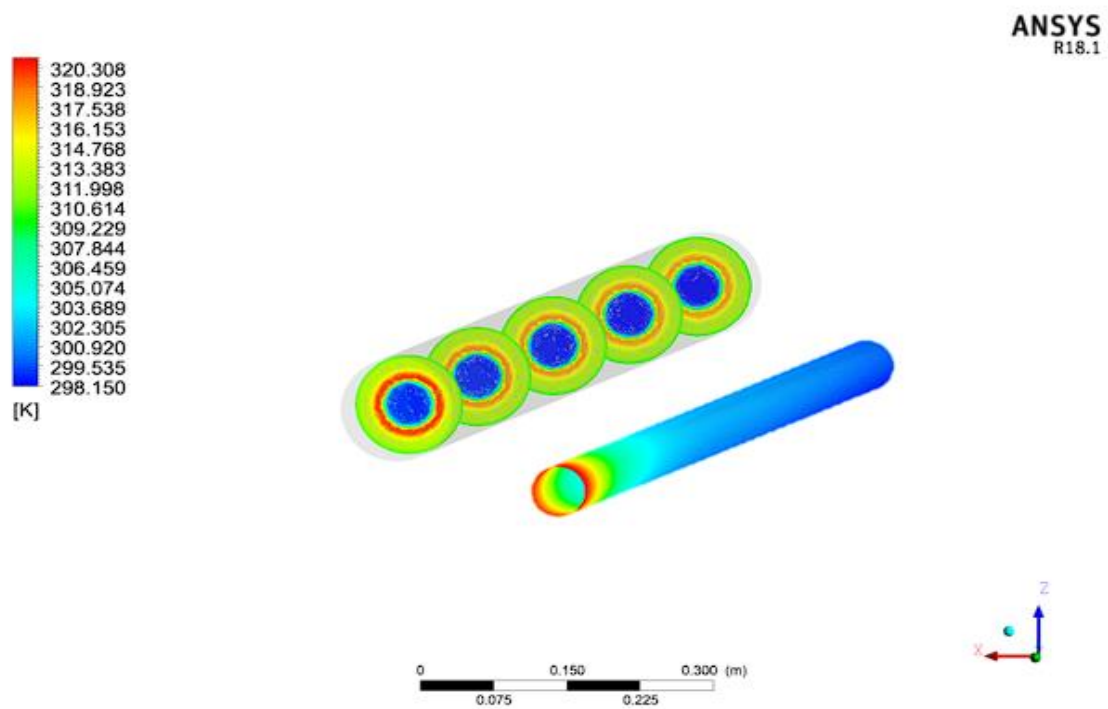


Fig IV.11 Les contours de température pour une concentration $\phi= 2\%$ ($Re=1000$)

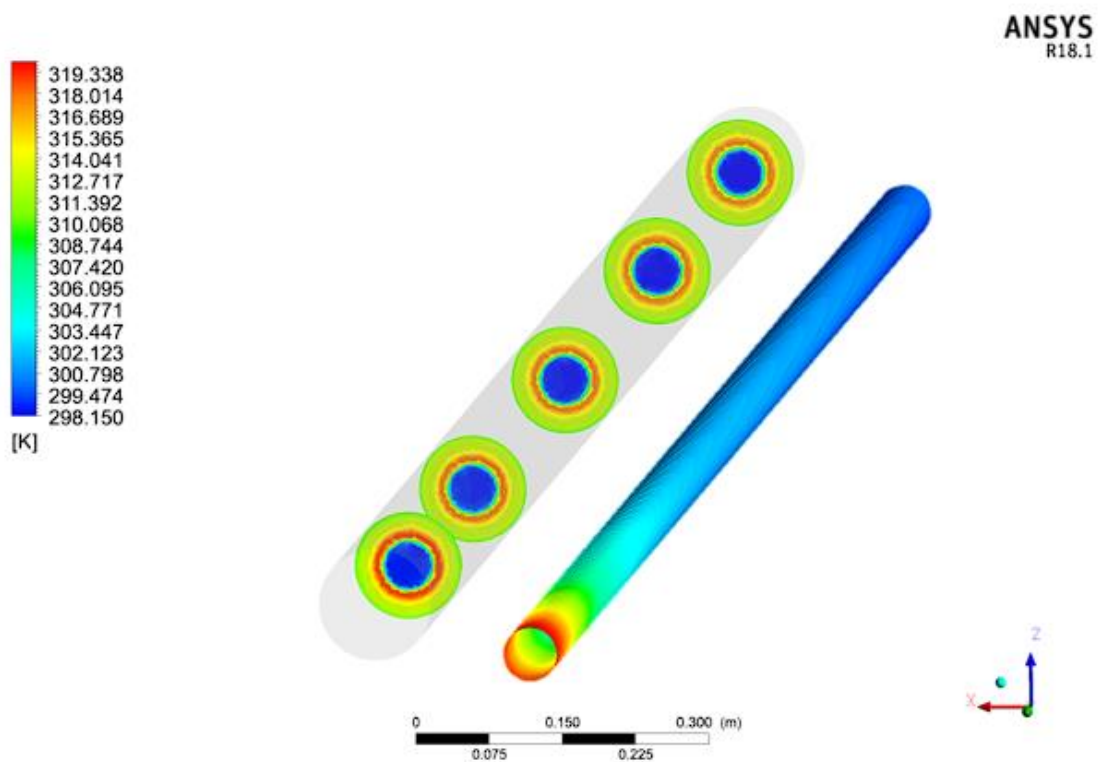


Fig IV.12 Les contours de température pour une concentration $\phi= 4\%$ ($Re=1000$)

La Figure IV.13 indique une comparaison de la variation de $\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{in}}$ dans l'eau pure et le nanofluide (CuO+eau) pour différentes concentrations ϕ . Les résultats montrent que ΔT diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. La différence de température dans le nanofluide est supérieure à celle de l'eau pure et le nanofluide avec $\phi=1\%$ atteint des valeurs maximales de ΔT .

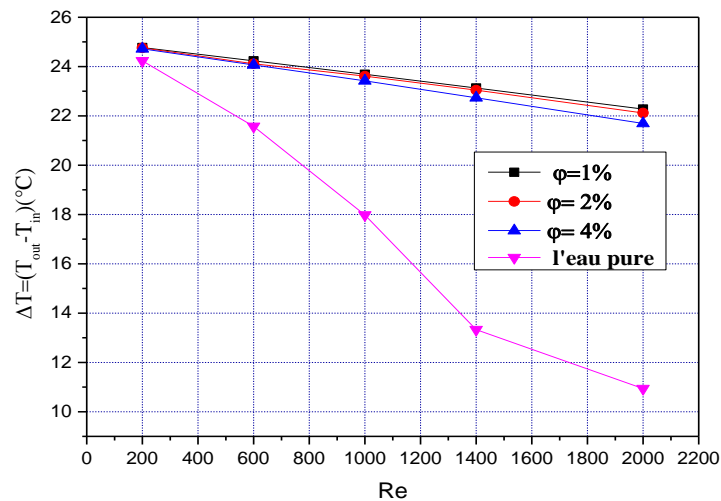


Fig IV.13 La différence de températures dans les deux cas en fonction de Re

IV.3.2.2 Contours de vitesses et les lignes de courant :

Les Figures (IV.14) à (IV.16) présentent les contours de vitesse dans le nanofluide pour un nombre de Reynolds $Re=1000$ et pour les différentes concentrations $\phi=1\%$, 2% et 4% .

On remarque que la vitesse d'écoulement de nanofluide est meilleure à celle de l'eau pure. L'ajout des nanoparticules à l'eau engendre une amélioration dans la température et par conséquent une accélération de l'écoulement.

On peut noter aussi que la vitesse est nulle près de la surface de l'absorbeur et augmente en s'éloignant de la paroi pour atteindre des valeurs maximales au centre.

On remarque également que la vitesse d'écoulement augmente avec l'augmentation de la concentration.

Les Figures (IV.17) à (IV.19) montrent la variation des lignes de courant dans le tube de l'absorbeur pour un nombre de Reynolds $Re = 1000$ et pour différentes concentrations $\varphi=1\%$, 2% et 4%

On constate que l'écoulement est sous forme de lignes parallèles (filets fluide) car l'écoulement est laminaire.

Nous pouvons remarqué aussi que les lignes de courant depend de la vitesse d'écoulement, l'augmentation du nombre de Reynolds provoque une augmentation de la vitesse d'écoulement et par consequent un accroissement dans les valeurs des lignes du courant.

On peut noter également que les lignes de courant diminue avec l'augmentation du concentration de nanofluide.

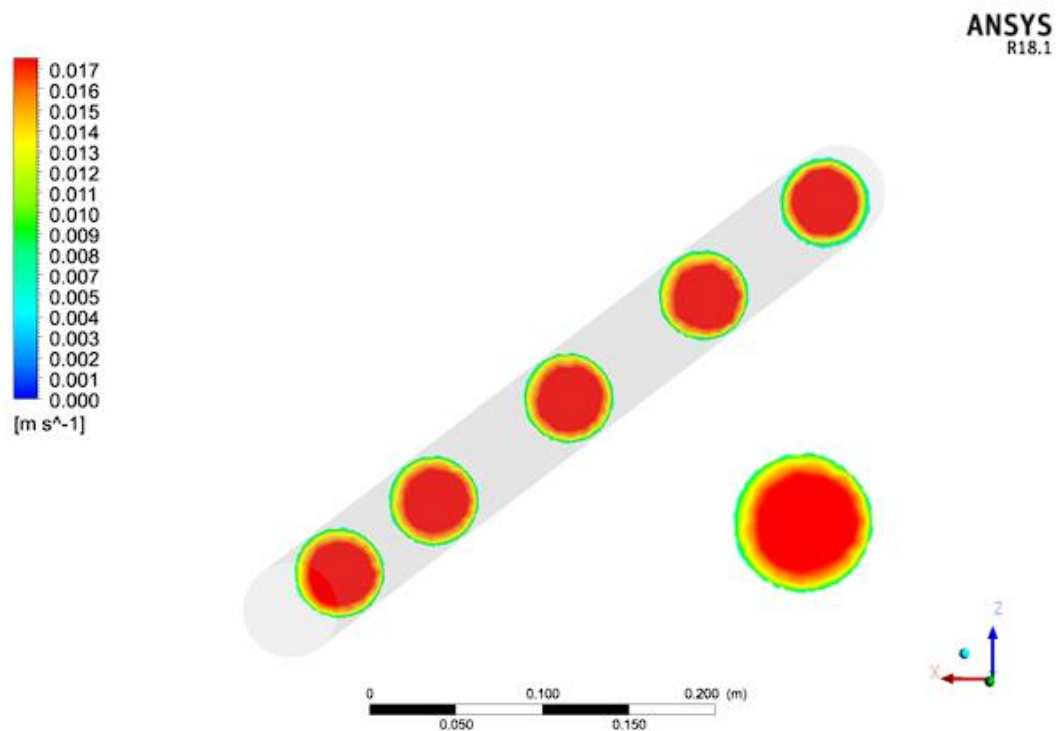


Fig IV.14 Les contours de la vitesse pour une concentration $\varphi=1\%$ ($Re=1000$)

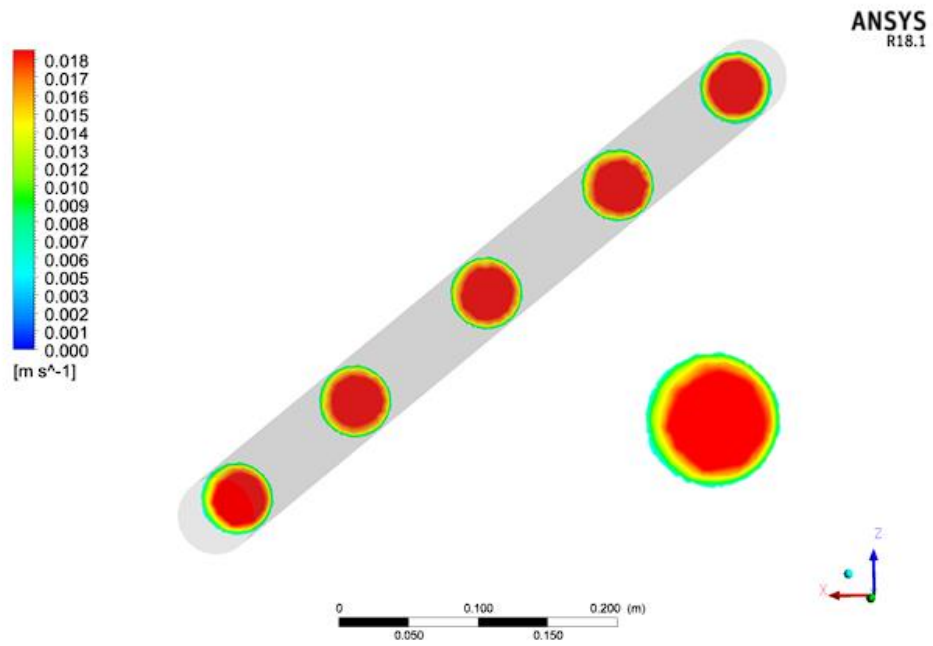


Fig IV.15 Les contours de la vitesse pour une concentration $\phi=2\%$ ($Re=1000$)

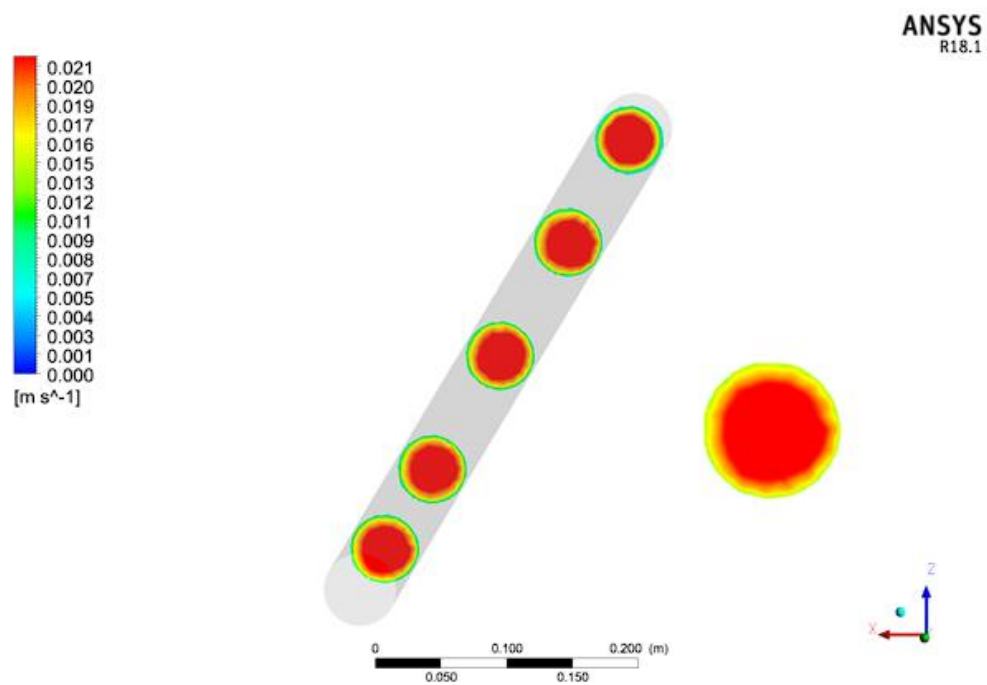


Fig IV.16 Les contours de la vitesse pour une concentration $\phi=4\%$ ($Re=1000$)



Fig IV.17 Lignes de courant pour une concentration $\phi=1\%$ ($Re=1000$)

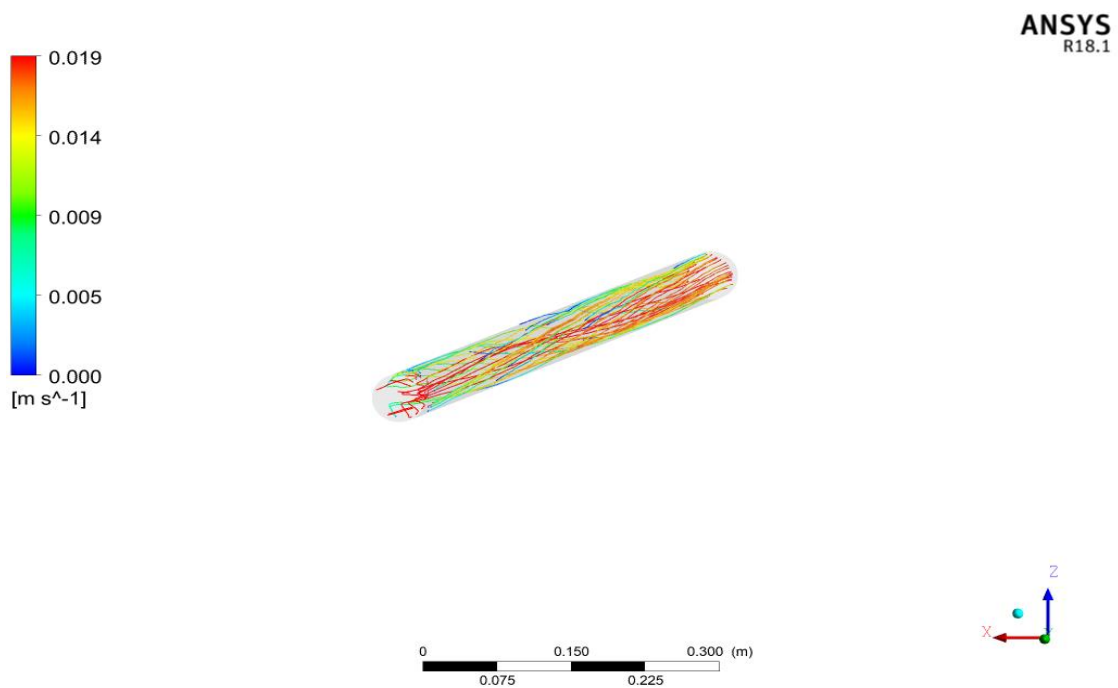


Fig IV.18 Lignes de courant pour une concentration $\phi=2\%$ ($Re=1000$)

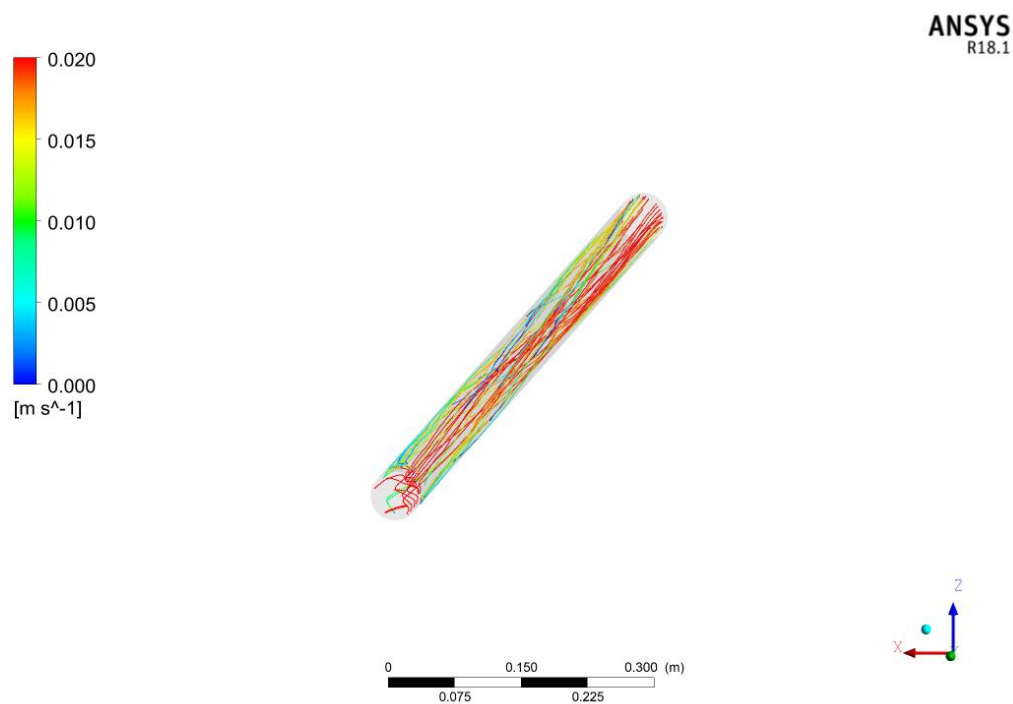


Fig IV.19 Lignes de courant pour une concentration $\phi=4\%$ ($Re=1000$)

IV.3.2.3. Variation du nombre de Nusselt et le coefficient de convection h en fonction du nombre de Reynolds et la concentration ϕ

La figure IV.20 représente la variation du nombre de Nusselt en fonction de la concentration ϕ pour un nombre de Reynolds $Re=1000$. On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules dans l'eau.

La figure IV.21 montre une série de résultats permettant de déterminer l'évolution du nombre de Nusselt du nanofluide (CuO) en fonction du nombre de Reynolds et la concentration $\phi=1\%$, 2% , 3% et 4% .

On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds et la concentration

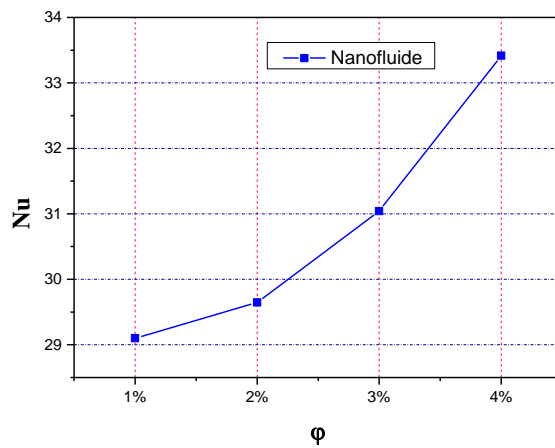


Fig IV.20 Variation du nombre de Nusselt en fonction de la concentration ϕ ($Re=1000$)

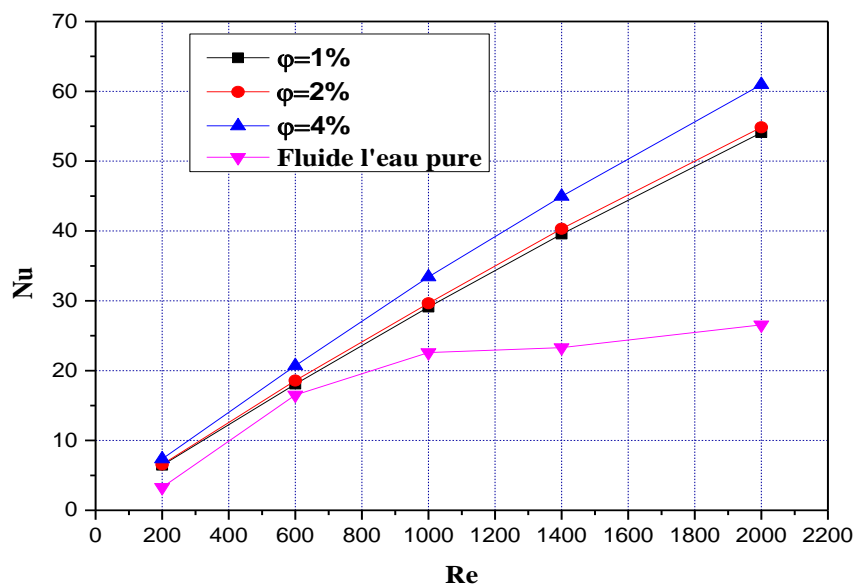


Fig IV.21 Variation du nombre de Nusselt de l'eau pure et le nanofluid en fonction de la concentration ϕ et le nombre de Reynolds Re

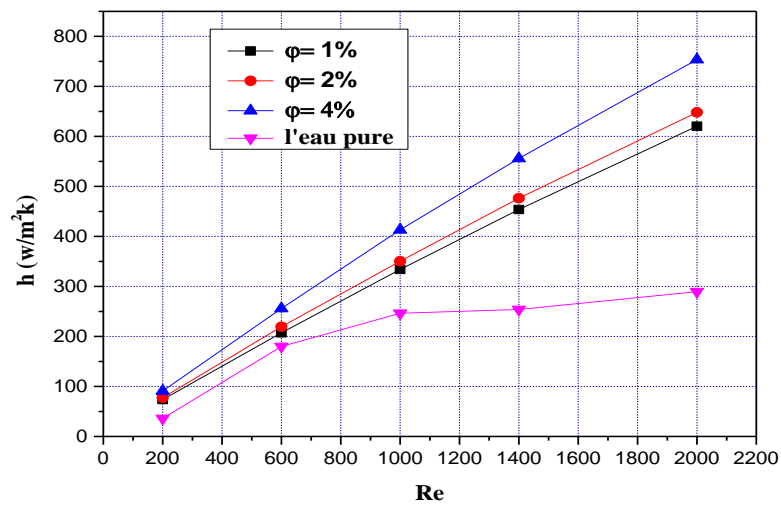


Fig IV.22 Variation du coefficient de convection h de l'eau pure et le nanofluide en fonction de la concentration ϕ et le nombre de Reynolds Re

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les résultats numériques d'un écoulement avec transfert de chaleur dans un capteur cylindro-parabolique pour l'eau pure et le nanofluide (CuO+eau).

Nos simulations ont été réalisées pour une variation des paramètres indépendantes, tels que le nombre de Nusselt $Re=200-2000$ les concentrations $\phi=1\%, 2\%, 3\%, 4\%$.

Les résultats montrent une augmentation de la température et le nombre de Nusselt de nanofluide par rapport à l'eau pure. L'utilisation des nanofluides comme fluide caloporteur améliore les performances thermiques du capteur cylindro-parabolique.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons simulé numériquement les performances thermique et hydrodynamique d'un écoulement dans le collecteur d'un capteur cylindro-parabolique rempli de l'eau pure et de nanofluide (CuO+eau) avec différentes concentrations et pour différents nombre de Reynolds.

Les équations régissant notre problème physique sont les équations de continuité, de quantité de mouvement, couplées à l'équation de l'énergie. La méthode choisie pour la résolution de ces équations est la méthode des volumes finis adoptée par le code commercialisé **Ansys Fluent R1 2018**

Après la conception et le maillage de la géométrie en utilisant le logiciel **solidworks 2021**, la configuration est exportée vers **Ansys Fluent R1 2018** pour la simulation.

Des simulations numériques ont été effectuées pour des nombres de Reynolds qui varie entre 200 et 2000 pour l'eau pure et pour le nanofluide (CuO+eau) a différents concentration $\phi=1\%$, 2% , 3% et 4% .

Les résultats numériques trouvés montrent que la température de sortie dans le collecteur avec le nanofluide est meilleure à celle de l'eau pure et cette température diminue en augmentant le nombre de Reynolds.

Le nombre de Nusselt dans le nanofluide est supérieur à celui de l'eau pure et il diminue avec l'augmentation de Re.

A la fin de notre étude on peut conclure que les propriétés thermophysiques du fluide caloporteur ont une influence considérable sur les performances thermiques du capteur solaire.

Références Bibliographiques

- [1] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] C, Vauge. Introduction générale sur les différentes énergies renouvelables, Techniques de l'Ingénieur, B263. (1982).
- [3] O, Sotehi. Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire; thèse de magistère, Université de Constantine. (2009).
- [4] **J, A, Duffie; W, A, Beckman.** Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).
- [5] **Majid Ghassemi,** Alma Cota, Robert Foster «Solar Energy:Renewable Energy and the Environment» 2010.
- [6] http://www.neufplanetes.org/systeme_solaire/earth.html juin 2011.
- [7] Y. N'goran, Contribution à la modélisation du gisement solaire. Thèse de doctorat, Université de Cocody Abidjan (2005).
- [8] Beikacern, Fezzioui Naima, Energie solaire et capteur solaires Centre Universitaire de Béchar 2001.
- [9] M. CAPDEROUX,«Atlas solaire de l'Algerie, Modelestheoriques et experimentaux», tome1, Volume (1.2), Office des publications Universitaires,Alger (1987).
- [10] A. Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni. Evaluation du potentiel énergétique solaire Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).
- [11] S. Benkacialia et K. Gairaa Etude expérimentale du trouble atmosphérique sur le site de Ghardaïa Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 649 – 654.
- [12] MAATALLAH FATIHA. KANBESSE AICHA BOUCHRA. Simulation numérique dun capteur solaire plan
- [13] M^{lle} HOUCHE Mezhoura et M^{lle} KAOUDJT Hayat Etude comparative de la performance d'un capteur solaire cylindro-parabolique à stockage d'énergie avec et sans vitrage.
- [14] LAARABA ADEL. Amélioration des échanges thermiques dans l'absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique.
- [15] Saidur, R. Leong, K. Y, Mohammad, H A.—A review on application sand challenges of nanofluids. RenewSustEnergRev.2011; 15, no.3: 1646–1668.
- [16] Das, SK. Choi, S U S. Yu, W.Pradeep, T. Nanofluids: Science and Technology.Hoboken, NJ: John Wiley& Sons, 2007.

[17] RIBIERO João-Paulo, Dossier Technique de l'ingenieur, nm5115, Nano fluides pour les applications thermiques, 2009.

[18] RIKI Saad Saoud et MEKEFES Abdelbasset Etude numerique de l'effet des nanoparticules sur le transfert de chaleur dans une cavite remplie de nanofluidE

Résumé

Dans ce mémoire nous avons étudié numériquement l'amélioration du transfert dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans deux cas l'eau pure et le nanofluid(eau+CuO). Les équations gouvernantes de continuité, de quantité de mouvement, couplées à l'équation d'énergie sont résolues par la méthode des volumes finis adopté par le logiciel commercialisé AnsysFluent 18. La configuration étudiée est créée en utilisant le logiciel SolidWorks et mailler et simuler en utilisant le logiciel Ansys18. Des simulations numériques ont été effectuées pour différentes nombre de Reynold qui varie entre 200 et 2000 et pour des concentrations $\phi = 1\%$, 2% , 3% et 4% . Les résultats numériques trouvés montrent que la température de sortie dans le collecteur avec le nanofluid est meilleure à celle de l'eau pure et cette température diminue en augmentant le nombre de Reynolds. Le nombre de Nusselt dans le nanofluid est supérieur à celui de l'eau pure et il diminue avec l'augmentation de Re.

تلخيص

في هذه الأطروحة درسنا عدديًا تحسين النقل في مجمّع شمسي أسطواني مكافئ في حالتين ماء نقي وموائع نانوية (ماء + CuO) يتم حل المعادلات التي تحكم الاستمرارية ، والزخم ، إلى جانب معادلة الطاقة من خلال طريقة الحجم المحدود المعتمدة من قبل البرنامج المسوق AnsysFluent 18. يتم إنشاء التكوين المدروس باستخدام برنامج SolidWorks والشبكة والمحاكاة باستخدام برنامج Ansys18. تم إجراء محاكاة عددية لأرقام رينولد المختلفة والتي تتراوح بين 200 و 2000 وللتراكيز $\phi = 1\%$ ، 2% ، 3% و 4% . أظهرت النتائج العددية أن درجة حرارة المخرج في المجمع مع السائل النانوي أفضل من درجة حرارة الماء النقي وتتنقص درجة الحرارة هذه بزيادة رقم رينولدز. رقم نسلت في المائع النانوي أعلى من رقم الماء النقي ويتناقص مع زيادة Re.

Abstract

In this thesis we have numerically studied the improvement of the transfer in a cylindro-parabolic solar collector in two cases pure water and nanofluid (water + CuO). The governing equations of continuity, momentum, coupled with the energy equation are solved by the finite volume method adopted by the marketed software AnsysFluent 18. The studied configuration is created using the SolidWorks software and mesh and simulate in using Ansys18 software. Numerical simulations were carried out for different Reynold numbers which vary between 200 and 2000 and for concentrations $\phi = 1\%$, 2% , 3% and 4% . The numerical results found show that the outlet temperature in the collector with the nanofluid is better than that of pure water and this temperature decreases by increasing the Reynolds number. The Nusselt number in the nanofluid is higher than that of pure water and it decreases with increasing Re.