

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Projet de Fin d'Études
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Conversion Thermique

*Optimisation des échanges de chaleur en écoulement de
Nanofluides dans les récepteurs solaires destinés aux
concentrateurs cylindro-paraboliques*

Réalisé par :
Mr. Mohamed Oussama Gareb

Proposé et encadré par :
MCB.S.Lечеheb

Année universitaire 2019/2020

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Projet de Fin d'Études
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Conversion Thermique

*Optimisation des échanges de chaleur en écoulement de
Nanofluides dans les récepteurs solaires destinés aux
concentrateurs cylindro-paraboliques*

Réalisé par :
Mr. Mohamed Oussama Gareb

Proposé et encadré par :
MCB.S.Lечеheb

Devant le jury

Mustafa Merzouk
Melouka Benyamina
Sabrina Lecheheb

Prof.
MCB
MCB

Président
Examinatrice
Promotrice

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à « **Allah** » tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné pour terminer ce travail.

Nous remercions notre promoteur **M^{me} Sabrina Lecheheb.**

Pour sa collaboration et pour son orientation avec nous.

Nous adressons nos remerciements à tous les orienteurs, tous ceux qui d'une façon ou d'une autre ont fait part de leur aide Nous exprimons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Merci

Dédicace

À tous ceux que j'aime profondément :
À mes chers parents
À mes frères, et mes sœurs

Enfin A tous mes amis et tous mes enseignants du département des énergies renouvelables et l'équipe de concentration solaire du CDER- Benaknoute sans exception, et toute la promotion 2019/2020.

Résumé :

Il s'agit d'une étude numérique de la convection forcée lors d'un écoulement laminaire permanent et stationnaire à travers l'absorbeur du concentrateur cylindro-parabolique, un absorbeur lisse de forme cylindrique d'une longueur de 3 m. Les calculs sont effectués pour différents cas de fluide caloporteurs, le cas de l'huile synthétique Terminol VP-1 comme fluide de base et les nanoparticules considérées sont respectivement, l'oxyde d'Aluminium AL_2O_3 (l'Alumine) et le cuivre Cu. Les fluides caloporteurs sont supposés newtoniens. En utilisant la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations différentielles aux dérivées partielles régissant l'écoulement (l'équation de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie). Les champs dynamique et thermique sont obtenus pour différentes concentrations de nanoparticules (0.05, et 0.1). L'analyse des propriétés thermophysiques des nanofluides, de l'évolution de la température et du taux d'amélioration de transfert de chaleur a été réalisée. Les résultats obtenus montrent que le transfert de chaleur est meilleur lorsque la concentration des nanoparticules dans le fluide de base est plus importante. Aussi, on a déduit que le nanofluide permettant un meilleur transfert de chaleur est celui du cuivre Cu suivi par l'oxyde l'alumine AL_2O_3 .

Mots clés : Absorbeur solaire, transfert de chaleur, convection forcée, nanofluides, l'oxyde d'aluminium, le cuivre.

ملخص :

هذه دراسة عددية للحمل القسري أثناء التدفق الصفحي الدائم والثابت عبر أنبوب أسطوانى (جهاز امتصاص الحوض المكافئ). يتم إجراء الحسابات لحالة زيت الصناعى terminol 1-VP باعتباراه السائل الأساسى وجسيمات الألومنيوم النانوية AL_2O_3 والنحاس Cu. يُفترض أن تكون سوائى نقل الحرارة نيوتونية. باستخدام طريقة الحجم المحدود لتقدير معادلات النموذج الرياضى (معادلة الاستمرارية والزخم والطاقة). يتم الحصول على المجالات الديناميكية والحرارية لتركيزات مختلفة من الجسيمات النانوية (0.05 ، و 0.1). تم إجراء تحليل لتغير درجة الحرارة ومعدل تحسين انتقال الحرارة. أظهرت النتائج التى تم الحصول عليها أن انتقال الحرارة يكون أفضل إذا زاد تركيز الجسيمات النانوية ، وقد وجد أن السائل الذى يسمح بنقل الحرارة بشكل أفضل هو المائع النانوى الذى يحتوى على جزيئات النانو النحاس متبوعًا بأكسيد الألومنيوم. (الألومينا)

الكلمات المفتاحية : امتصاص الطاقة الشمسية, نقل الحرارة, الحمل القسري , السوائى النانوية , أكسيد الألومنيوم , النحاس

Abstract

This is a numerical study of forced convection during a permanent and steady laminar flow through the absorber of the parabolic-through concentrator, a cylindrical-shaped smooth absorber of 3m long. The calculations are carried out for different cases of heat transfer fluids, the case of the synthetic oil Terminol VP-1 as base fluid and the considered nanoparticles are respectively, Aluminum Oxide AL2O3 (Alumina) and copper Cu. Heat transfer fluids are assumed to be Newtonian. Using the finite volume method to discretize the partial differential equations governing the flow (the equation of continuity, momentum and energy). The dynamic and thermal fields are obtained for different concentrations of nanoparticles (0.05, and 0.1). The analysis of the nanofluids thermophysical properties, the temperature evolution and the rate of heat transfer improvement was performed. The obtained results show that the heat transfer is better when the concentration of nanoparticles in the base fluid is greater. Also, it was deduced that the nanofluid allowing better heat transfer is the Copper Cu followed by the Alumina, AL_2O_3 .

Keywords: Solar absorber, heat transfer, Forced convection, Nanofluids, Aluminum Oxide, Copper.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités et revue bibliographique	
I.1. Introduction	3
I.2. les énergies renouvelables	3
I.3. Les nanoparticules et les fluides porteurs	6
I.4. Production des nanofluides et nanoparticules	8
I.5. Les études effectuées sur les nanofluides	8
I.6. Revue bibliographique	10
I.6.1. Les nanoparticules métalliques.....	10
I.6.2. Les nanoparticules non métalliques.....	11
I.6.3. Les nanoparticules d'oxyde métallique.....	12
I.7. Les effets influent sur les propriétés thermophysiques des nanofluides.....	19
I.7.1. Effet de la concentration volumique de particules.....	19
I.7.2. Effet du type de la nanoparticule.....	20
I.7.3. Effet de la température.....	20
I.8. Domaines d'applications des nanofluides.....	21
I.8.1. Refroidissement des systèmes thermiques.....	21
I.8.2. Refroidissement des systèmes électroniques.....	22
I.8.3. Refroidissement des systèmes militaires.....	22
I.8.4. Refroidissement des systèmes spatiaux.....	22
I.8.5. Refroidissement des systèmes nucléaires.....	22
I.8.6. La biomédecine.....	22
I.8.7. D'autres applications.....	23
I.9. Les concentrateurs solaire cylindro-paraboliques.....	23
I.10. Les composants d'un concentrateur cylindro-parabolique.....	24
II.11. Les trois modes de transfert thermique.....	26
II.11.1. Conduction thermique.....	26
II.11.2. Convection thermique.....	27
II.11.3. Rayonnement thermique.....	28
I.12. Conclusion.....	28

Chapitre II : Modélisation Mathématique et procédure numérique

II.1. Introduction	27
II.2. Formulation mathématique du problème d'écoulement du nanofluide.....	27
II.2.1. Equations générales de transport.....	27
II.2.2. Hypothèses simplificatrices.....	29
II.2.3. Les équations gouvernant l'écoulement.....	29
II.3. Principe du code CFD	31
II.4. Présentation du Gambit et du Fluent	31
II.4.1. GAMBIT 2.4.6	31
II.4.2. Présentation du logiciel de calcul « FLUENT 2019 R3 »	31
II.5. Procédures de résolution	33
II.5.1. Création de la géométrie.....	33
II.5.2. Création du maillage.....	34
II.5.3. Les conditions aux limites.....	36
II.6. les lois de mélange	37
II.6.1. La masse volumique	37
II.6.2. La chaleur spécifique.....	37
II.6.3. la viscosité.....	38
II.6.4. la conductivité thermique.....	38
II.7. caractéristiques thermophysiques.....	38
II.7.1. Les caractéristiques thermophysiques de nanoparticule l'oxyde d'aluminium..	39
II.7.2. Les caractéristiques thermophysiques de nanoparticule l'oxyde de cuivre.....	39
II.7.3. Les caractéristiques thermophysiques de liquides de base (terminol VP-1).....	39
II.7.4. Les caractéristiques thermophysiques des nanofluides.....	39
II.8. Les paramètres à étudier.....	41
II.8.1. Nombre de Reynolds.....	41
II.8.2. Le flux de chaleur.....	43
II.8.3. L'efficacité du collecteur.....	43
II.9. Régimes d'écoulement.....	44
II.10. Calcul du flux de chaleur	45
II.11. Conclusion.....	50

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	51
III.2. Propriétés Thermo-physiques du fluide caloporteur en fonction de la fraction volumique.....	52
III.3. L'effet de la géométrie.....	55
III.4. Effet du Nanofluide ou nanoparticules.....	58
III.5. Effet de la fraction volumique.....	60
III.6. Conclusion.....	65
Conclusion générale.....	66

La liste des figures

Chapitre I : Généralités et revue bibliographique

Figure I.1 : Principales Technologies de Concentration Solaire.....	6
Figure I.2 : Nombre de publications pour les dernières années.....	9
Figure I.3 : Comparaison des données expérimentales de la conductivité thermique pour différent types de nanofluide.....	18
Figure I.4 : Effet de la concentration volumique sur la conductivité thermique du nanofluide (Al ₂ O ₃ / l'eau) pour différents chercheurs.....	19
Figure I.5 : Effet des types de particules sur la conductivité thermique des nanofluides.....	20
Figure I.6: Effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides à base d'eau: (a) pour Al ₂ O ₃ , (b) pour CuO.....	21
Figure I.7 : Photographie de deux installations utilisant des capteurs cylindro-parabolique.....	24
Figure I.8 : structure de tube absorbeur.....	25
Figure II.9 : Phénomène de conduction dans un mur.....	27
Figure I.10 : Phénomène de convection dans un liquide.....	27

Chapitre II : Modélisation Mathématique et procédure numérique

Figure II.1 : Domaine d'étude.....	29
Figure II.2 : Interface du logiciel ANSYS-Fluent 2019 R3 d'un calcul parallèle avec 4 processeurs.....	33
Figure II.3 : Présentation de la géométrie par GAMBIT en 3D.....	34
Figure II.4 : Présentation de nanofluide par GAMBIT en 3D.....	34
Figure II.5 : Maillage par GAMBIT 3D pour le tube de diamètre 35 mm et la longueur de 3mètre.....	35
Figure II.6 : Les conditions aux limites de système.....	36
Figure II.7 : Fenêtre de wizard.....	47
Figure II.8 : la variation de DNI en fonction de temps pendant une année.....	48

Figure II.9 : la variation de DNI en fonction de temps pendant le mois d'août.....48

Figure II.10 : la variation de DNI en fonction de temps dans la journée 28 août.....49

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1 : Variation de la densité des nanofluides (l'oxyde d'aluminium et le cuivre) en fonction de la fraction volumique.....52

Figure III.2 : Evolution de la conductivité thermique dans les nanofluides (l'oxyde d'aluminium et le cuivre) en fonction de la fraction volumique53

Figure III.3 : Variation de la chaleur spécifique dans les nanofluides (l'oxyde d'aluminium et le cuivre) en fonction de la fraction volumique.....53

Figure III.4 : Variation de la température totale du nanofluide Al_2O_3 à 5% dans les deux tubes (diamètre égal à 28 et égal à 35 mm) en fonction de la position axiale.....57

Figure III.5 : Variation de la température totale du nanofluide Cu à 5% dans les deux tubes (diamètre égal à 28 et égal à 35 mm) en fonction de la position axiale.....58

Figure III.6 : Evolution axiale de la température totale pour différents nanofluides (l'alumine et cuivre) à une concentration des nanoparticules égale à 5%.....59

Figure III.7 : Evolution axiale de la température totale pour différents nanofluides (l'alumine et cuivre) à une concentration des nanoparticules égale à 10%.....59

Figure III.8 : Evolution axiale de la température totale pour les différentes concentrations des nanoparticules (l'alumine) dans le tube de diamètre 28 mm.....60

Figure III.9 : Evolution axiale de taux d'amélioration du transfert de chaleur pour les différentes concentrations des nanoparticules (l'alumine) dans le tube de diamètre 28 mm...61

Figure III.10 : Evolution axiale de la température totale pour les différentes concentrations des nanoparticules (le cuivre) dans le tube de diamètre 28 mm.....61

Figure III.11 : Evolution axiale de taux d'amélioration du transfert de chaleur pour les différentes concentrations des nanoparticules (le cuivre) dans le tube de diamètre 28 mm....62

Figure III.12 : Evolution axiale de la température totale pour les différentes concentrations des nanoparticules (l'alumine) dans le tube de diamètre 35 mm.....62

Figure III.13 : Evolution axiale de taux d'amélioration du transfert de chaleur pour les différentes concentrations des nanoparticules (l'alumine) dans le tube de diamètre 35mm...63

Figure III.14 : Evolution axiale de la température totale pour les différentes concentrations des nanoparticules (le cuivre) dans le tube de diamètre 35 mm.....63

Figure III.15 : Evolution axiale de taux d'amélioration du transfert de chaleur pour les différentes concentrations des nanoparticules (le cuivre) dans le tube de diamètre 35 mm...64

La Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités et revue bibliographique

Tableau I.1 : Les propriétés thermophysiques de différents matériaux.....	7
Tableau I.2 : Nombre de travaux publiés sur les nanofluides dans la base de données de SCOPUS.....	9

Chapitre II : Modélisation Mathématique et procédure numérique

Tableau II.1 : Expressions du coefficient de diffusion et du terme source.....	30
Tableau II.2 : nombre de cellules, mailles, et de nœuds dans chaque tube.....	36
Tableau II.3 : Propriétés thermophysiques des nanoparticules l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).....	39
Tableau II.4 : Propriétés thermophysiques des nanoparticules le cuivre (Cu).....	39
Tableau II.5 : Propriétés thermophysiques de liquides de base (terminol VP-1).....	39
Tableau II.6 : Propriétés Thermophysiques du Nanofluide (Allumine Al_2O_3 + Terminol VP1) en fonction de la fraction volumique.....	40
Tableau II.7 : Propriétés Thermophysiques du Nanofluide (Cuivre Cu + Terminol VP-1) en fonction de la fraction volumique.....	40
Tableau II.8 : Le nombre de Reynolds dans les deux tubes avec les différentes fractions volumiques.....	45
Tableau II.9 : Le flux de chaleur dans la journée 28 août.....	49

Nomenclature

Symboles latins :

k : Conductivité thermique ($\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$)

Nu : Nombre de Nusselt = $\frac{hD}{k}$

P : Pression dimensionnelle (Pa)

Pr : Nombre de Prandtl = ν/α

Ra : Nombre de Rayleigh $\frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}$

T : Température dimensionnelle ($^{\circ}\text{C}$)

L : Longueur de la conduite (m)

Cp : La chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

R_{Φ} : La somme absolue des résidus correspondant à la variable.

$F_{in,\Phi}$: Le flux total à l'entrée de la variable (w)

Re : Nombre de Reynolds

w : La vitesse caractéristique du nanofluide (m.s^{-1})

\dot{m} : Débit massique (kg.s^{-1})

S : La surface de tube (m^2)

\dot{V} : Débit volumique ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)

V : Le volume (m^3)

m : La masse (kg)

t : Le temps (s)

\dot{Q} : Flux de chaleur (W)

Δh : L'enthalpie (KJ/mol)

DNI : Direct normal irradiation (flux solaire) (W.m^{-2})

F_i : Représente les forces du volume.

\dot{q} : Terme de la source de chaleur.

Symboles Grecs :

\emptyset : Fonction généralisée

μ : viscosité dynamique du fluide caloporteur ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

ρ : La masse volumique du nanofluide (kg.m^{-3})

φ : Masse volumique (kg.s^{-1})

\emptyset_i : Diamètre du tube récepteur (m)

ϑ : La viscosité cinématique du nanofluide ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

α : Diffusivité thermique.

Γ_φ : Coefficient de la diffusivité.

S_φ : Terme source.

Indice :

f : Fluide

nf : Nanofluide

s : Nanoparticule

Abréviation :

CNT : Carbon Nanotubes.

MWCNT : Multi – wall Carbon Nanotubes.

CCP : Concentrateur Cylindro Parabolique.

PTR : Parabolic Through Receiver.

HR : Réflecteur à Homogénéisation.

MCRT : Monte Carlo Ray Tracing.

SEGS : Solar Electric Generating System.

CFD : Computational Fluid Dynamics.

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur.

SIMPLE: Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations.

Introduction générale

Introduction générale

Le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies. Bien qu'il se manifeste sous diverses formes le rayonnement, la conduction et la convection, cette dernière est la plus visée dans certains domaines bien spécifiques tels que le refroidissement des processeurs, des composants électroniques, les radiateurs et les échangeurs de chaleurs,... etc.

L'intensité du transfert de chaleur dépend principalement des propriétés thermophysiques des fluides caloporteur telles que : la conductivité, la capacité thermique, la viscosité,...etc. Depuis quelques années un nouveau type de fluides est en train d'émerger : le nanofluide. Le nanofluide est un fluide caloporteur tel que l'eau, l'eau glycolée, l'huile à qui l'on rajoute des nanoparticules de métal (Al, Cu, Ag, Au, etc.) ou d'oxyde métallique ou non métallique (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2), et autre (formes allotropiques du carbone). Dans des quantités relativement faibles, ces nanofluides pourraient augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas des fluides conventionnels en modifiant de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur ou fluide de base.

Cette amélioration du transfert de chaleur fait donc des nanofluides, une nouvelle technologie prometteuse dans le cadre des transferts thermiques, permettant d'améliorer les performances de divers échangeurs de chaleurs et récepteur solaires.

Ainsi on s'intéresse dans ce travail, au transfert thermique par convection forcée, dans l'absorbeur d'un concentrateur cylindro-parabolique. En utilisant plusieurs fluides caloporteurs, le fluide de base est l'huile synthétique Terminol VP-1, les nanoparticules utilisées sont : l'Oxyde d'Aluminium Al_2O_3 , et le Cuivre Cu.

Cette présente étude est subdivisée en trois chapitres, organisée de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation d'une revue bibliographique des principaux travaux publiés dans le domaine du transfert thermique utilisant des nanofluides. On présente leur définition, leur préparation ainsi que certaines de leurs applications.
- Au deuxième chapitre, on construit à l'aide du Gambit les différentes géométries des tubes absorbeurs que nous étudierons par la suite. Puis, on établit une étude mathématique pour

saisir les données qu'on utilisera pour étudier les nanofluides dans les différents tubes absorbeurs solaires à l'aide du Fluent.

- Dans le troisième chapitre, on exploite les différents résultats obtenus afin d'établir les caractéristiques de l'insertion de chaque nanofluide dans chacun des tubes, et par là on pourra déduire le nanofluide qui permet d'améliorer et d'intensifier l'échange de chaleur en écoulement de nanofluide dans les récepteurs solaires destinés aux concentrateurs cylindro-paraboliques.

En fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE. I

Généralités et revue bibliographique

I. Généralités et revue bibliographique

I.1. Introduction

Durant ces dernières années, plusieurs systèmes énergétiques ont été développés dans le domaine industriel produisant un flux de chaleur très élevé, là où les fluides caloporteurs (eau, éthylène glycol et l'huile) sont moins efficaces. L'idée d'améliorer les propriétés thermo-physiques des fluides, est d'introduire des particules solides de très bonnes caractéristiques thermiques et de taille nanométrique au sein du fluide de base. Cette nouvelle génération de fluides porte le nom de « Nanofluides ». Ce terme a été introduit par Choi [1] au niveau du laboratoire d'Argonne en U.S. American 1995 et reste couramment utilisé pour caractériser ce type de suspension colloïdale.

I.2. Rappel sur les Energies renouvelables

Plus de 90 % de l'énergie utilisée aujourd'hui sur terre provient des combustibles fossiles, mais ces derniers posent de plus en plus de problèmes sur terre. La question de leur remplacement se pose et est inévitable. Mais comment les remplacer ? L'homme cherche aujourd'hui à remplacer les sources d'énergies à cause des multiples pollutions occasionnées et de leurs impacts sur l'environnement, mais aussi (et surtout) à cause du coût de plus en plus important pour l'achat, l'extraction et l'utilisation de ces sources d'énergies.

L'alimentation en énergie future passe certainement par les énergies renouvelables qui sont encore pour certains au stade expérimental et pour d'autres qui connaissent un essor actuellement (comme l'énergie solaire) grâce aux économies engendrées et à leur absence d'impact sur l'environnement.

Ces énergies sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie des marées, les biogaz, les biocarburants et la géothermie.

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil.

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire est ainsi à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité.
- le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Le solaire dit «thermodynamique» est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité.

Un système solaire à concentration thermodynamique exploite le rayonnement du Soleil en orientant, au moyen de miroirs, les flux de photons. Ce système thermique concentré permet d'atteindre des niveaux de température bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques classiques non concentrés.

Alors que les chauffe-eau domestiques produisent une eau à une cinquantaine de degrés, il est possible, par la concentration, de chauffer des fluides à des températures de l'ordre de 250 à 1000°C. Il devient alors envisageable de les utiliser dans des processus industriels comme la génération d'électricité (on parle parfois « d'électricité solaire thermodynamique »). D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides chauds sont possibles comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou encore la génération d'hydrogène.

Le principe de la concentration de l'irradiation solaire est connu depuis l'Antiquité, comme l'illustre le mythe des « miroirs ardents » d'Archimède. Le plus souvent grâce à des miroirs réfléchissants ou des loupes, un système à concentration réoriente le rayonnement solaire collecté par une surface donnée sur une cible de dimension plus réduite : le démarrage d'un feu de feuilles mortes avec une loupe utilise ce principe.

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et enfin les concentrateurs paraboliques Dish-Stirling.

Il y a deux différents types de système de concentration solaire :

- Systèmes de concentration ponctuelle
 - Centrales à tour
 - Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling
- Systèmes de concentration linéaire

Le rayonnement solaire est concentré sur un ou plusieurs tube(s) absorbeur(s) installé(s) le long de la ligne focale des miroirs. Ce tube contient un fluide caloporteur porté à une température de l'ordre de 250 à 500°C.

Il existe deux types de centrales solaires thermodynamiques dans systèmes de concentration linéaire

- Centrales solaires à miroirs de Fresnel
- Centrales à miroirs cylindro-paraboliques

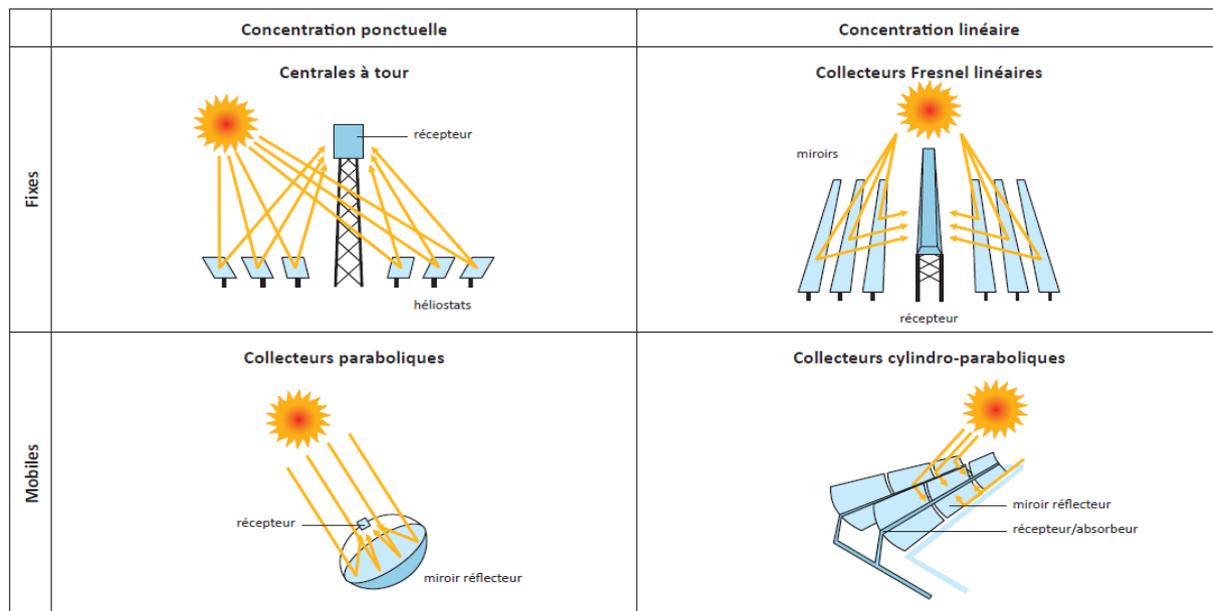


Figure I.1 : Principales Technologies de Concentration Solaire.

Centrales à miroirs cylindro-paraboliques: c'est la technologie la plus répandue aujourd'hui. Le foyer d'une parabole est un point, celui d'un miroir cylindro-parabolique est un axe, sur lequel est placé un tube absorbeur (le récepteur) de couleur noire, pour capter un maximum de rayonnement. Dans ce tube circule le fluide caloporteur, qui se réchauffe jusqu'à une température d'environ 500°C et qui est ensuite centralisé et transporté jusqu'au bloc de génération électrique. L'ensemble miroir cylindro-parabolique/récepteur suit le mouvement du Soleil.

I.3. Les nanoparticules et les fluides porteurs

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1-100nm), les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué, et sont très étudiées actuellement.

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont :

- Les nanoparticules des oxydes métalliques :
 - 1- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).
 - 2- L'oxyde de cuivre (CuO).
 - 3- L'oxyde de silicium (SiO_2).
 - 4- L'oxyde de Titane (TiO_2).

- Les nanoparticules métalliques :
 - 1- L'aluminium (Al).
 - 2- Le cuivre (Cu).
 - 3- L'or (Au).
 - 4- L'argent (Ag).
- Les nanoparticules non métalliques :
 - 1- Les nanotubes de carbone (CNT).
 - 2- Le diamant (C).
- Les liquides de base les plus utilisés sont :
 - 1- L'eau.
 - 2- L'éthylène glycol (EG).
 - 3- Les huiles.
 - 4- Les fluides de réfrigération (R12, R22...).

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nanofluides, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels (voir tableau I-1).

Tableau I.1 : Les propriétés thermophysiques de différents matériaux.

	Nanoparticule et fluide de base	K (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	Cp (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)	SiO ₂	1,38	2220	745	
	TiO ₂	8,4	4157	710	
	Al ₂ O ₃	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
liquides non métallique	L'eau	0,613	1000	4183	0,0008513
	Ethylene-glycol (EG)	0,258	1132	2349	0,0157

I.4. Production des nanofluides et nanoparticules

Les expériences effectuées sur les fluides caloporteurs avec des particules de taille micrométrique (10^{-6} m) ont montré que certains problèmes pouvaient être engendrés par l'utilisation de ces derniers tel que le problème de sédimentation des particules, l'augmentation de perte de charges etc... tandis que pour des particules de l'ordre du nanomètre (10^{-9} m), ces problèmes sont pratiquement insignifiants.

Tout en supposant que la suspension est stable et durable, l'agglomération de particules est négligeable, aucun changement chimique du fluide, la préparation des nanofluides peut se faire par l'une des méthodes :

- 1- La méthode à une seule étape : basée sur la vaporisation d'un matériau solide sous vide, puis condensation directe de sa vapeur dans le liquide.
- 2- La méthode à deux étapes : elle consiste d'abord à la fabrication d'une nanopoudre sèche, puis le mélange et la dispersion de celle-ci dans le liquide.

Ces procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste toutefois élevé (variant de 80\$ pour les 100g de CuO à 535\$ pour les 25g d'argent par exemple).

I.5. Les études effectuées sur les nanofluides

Compte tenu de l'importance accordée aux nanofluides, plusieurs études effectuées sur leurs propriétés physiques telles que le coefficient de transfert thermique et la viscosité dynamique ont prouvés que les nanofluides sont très différents par rapport au fluide de base et présentaient de meilleures caractéristiques thermophysiques. En effet, l'adjonction des particules métalliques dans un fluide de base a mis en évidence une amélioration des capacités thermiques de celui-ci.

Dans leurs premiers travaux, Choi et col [2] ont constaté que l'addition d'une petite quantité de nanoparticule (concentration volumique $\phi < 1\%$) donnait une augmentation, presque le double pour le coefficient de transfert de chaleur. D'autre part, Das et col [3] ont déterminé que l'augmentation de la conductivité thermique est presque de 25% par rapport à celui du fluide de base pour les différentes nanoparticules et les différentes concentrations volumiques ($0.5 < \phi < 4\%$). D'autres travaux effectués pour caractériser le comportement du nanofluide sont résumés dans la figure I-2 et le tableau I-2. La figure I-2 présente le nombre

de publications de chaque année, et le tableau I-2 présente aussi le nombre de publications de chaque année pour les différents domaines d'utilisation du nanofluides.

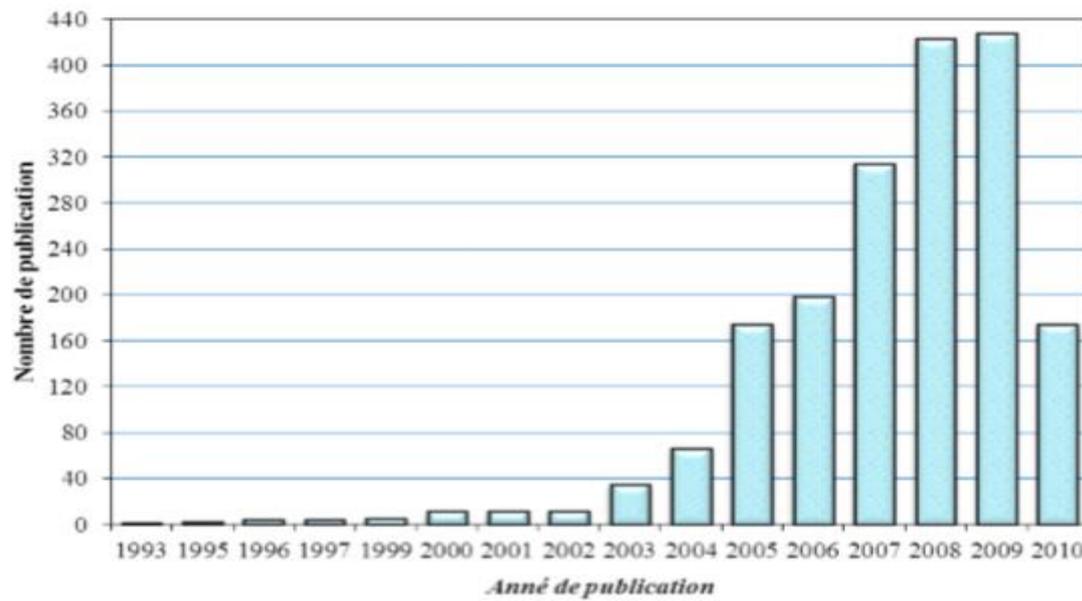


Figure I.2 : Nombre de publications pour les dernières années.

Tableau I.2 : Nombre de travaux publiés sur les nanofluides dans la base de données de SCOPUS.

Année	Nombres de publications		
	Dynamique des nanofluides	transfert de chaleur dans les nanofluides	Les propriétés des nanofluides
1993	1	0	0
1995	1	1	0
1996	2	2	0
1997	2	1	1
1999	2	2	1
2000	4	4	3
2001	5	2	2
2002	5	2	2
2003	19	9	6
2004	35	23	8
2005	90	50	34
2006	124	62	32
2007	175	89	50
2008	225	107	91
2009	222	109	96
2010	95	54	25
Total	1007	516	351

I.6. Revue bibliographique

Les premiers travaux traitant le transfert de chaleur en présence des nanoparticules ont pratiquement commencé en 1995 avec l'étude de Choi [1], qui ont permis plus tard de déterminer les propriétés thermophysiques des nanofluides. Par la suite de nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées par plusieurs chercheurs pour comprendre et analyser le comportement thermo-hydrauliques des nanofluides. Ces études peuvent être classées en trois catégories selon le type de matière de la nanoparticule:

- 1- Les nanoparticules métalliques.
- 2- Les nanoparticules d'oxyde métalliques.
- 3- Les nanoparticules non métalliques.

I.6.1. Les nanoparticules métalliques

Xuan et Li [4,5] ont réalisé un système expérimental pour étudier le coefficient du transfert de chaleur convectif et le coefficient de frottement des nanofluides pour des écoulements laminaire et turbulent à travers un tube horizontal. Ils ont utilisé l'eau déminéralisée comme fluide de base avec une dispersion de nanoparticules de Cuivre (le diamètre de la nanoparticule $d_{np} \leq 100\text{nm}$) pour différentes fractions volumiques (0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.5 et 2%) en faisant varier le nombre de Reynolds entre 800 et 25.000 et en imposant un flux thermique sur la paroi.

Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient du transfert de chaleur convectif «h» de nanofluide varie en fonction de la vitesse d'écoulement et la fraction volumique. Le nombre de Nusselt augmente de 60% pour une concentration volumique $\phi=2\%$, par rapport à l'eau pure. D'autre part, ils ont trouvé que l'équation de Dittus-Boelter [6] était non valide pour la prédiction du nombre de Nusselt pour les diverses fractions volumiques.

A partir de leurs données expérimentales, ils ont proposé de nouvelles corrélations pour la prédiction du coefficient du transfert de chaleur convectif pour un écoulement d'un nanofluide à travers un tube. Ces corrélations sont établies sous la forme suivante :

- 1- Pour un écoulement laminaire

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = 0.4328(1 + 11.285\text{Ø}^{0.754}\text{Pe}_d^{0.333}) \text{Ra}_{\text{nf}}^{0.333}\text{Pr}_{\text{nf}}^{0.4} \quad (\text{I.1})$$

- 2- Pour un écoulement turbulent

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = 0.0059(1 + 7.6286\text{Ø}^{0.6886}\text{Pe}_d^{0.001}) \text{Ra}_{\text{nf}}^{0.9238}\text{Pr}_{\text{nf}}^{0.4} \quad (\text{I.2})$$

De leur côté, Lee et Choi [7] ont étudié le transfert de chaleur dans des canaux parallèles en utilisant un nanofluide non spécifié, ils ont observé une réduction de 50% de la résistance thermique. Xuan et Li [5] ont étudié expérimentalement les caractéristiques d'écoulement et du transfert de chaleur par convection pour le nanofluide (Cu-eau) dans un tube droit avec un flux de chaleur pariétal constant. Les résultats ont montré que le nanofluide donne une amélioration substantielle du taux du transfert de chaleur comparé à l'eau pure.

Chien et col [8] ont effectué une étude de l'écoulement du nanofluide d'or de diamètre 17 nm à travers une conduite miniature chauffée, en forme de disque avec un diamètre de 9 mm et une hauteur de 2 mm, le fluide de base est l'eau. Les résultats ont montré que la résistance thermique de la conduite diminue sensiblement avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules. De leur côté Tsai et col [9] ont utilisé les solutions des nanoparticules d'or de différentes tailles (2-35 nm et 15-75 nm), préparées par la réduction de HAuCl_4 avec du citrate tri-sodique et l'acide tannique. Une grande diminution de la résistance thermique du caloduc nano-fluidique par rapport à l'eau déminéralisée a été observée. En effet, la résistance thermique du caloduc circulaire s'est étendue de 0.17 à 0.215 K/W avec les différentes solutions.

I.6.2. Les nanoparticules non métalliques

Dans leur article, Wen et Ding [10] ont étudié l'effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides pour les nanotubes MWCNT (Multi-wall Carbon Nanotubes) de 20 à 60 nm de diamètre et quelques dizaines μm de longueur dispersés dans l'eau. Pour des températures inférieures à 30°C , une dépendance approximativement linéaire de la conductivité thermique et la température. De leur côté, Ding et Col [11] ont montré que la conductivité thermique effective augmente avec la température. Ils ont constaté que l'amélioration de la conductivité thermique est légèrement plus grande que celle rapportée par Assael et Col[12], Xie et Col[13], et Wen et Ding[14], mais beaucoup plus inférieure à celle citée par Choi et Col[2]. De la même manière, Liu et Col[46] ont mesuré la conductivité thermique des nanofluides contenant les nanotubes de carbone (CNT) dispersé dans l'éthylène-glycol et dans l'huile synthétique de moteur. Ils ont trouvé que la conductivité thermique augmente jusqu'à 12.4% pour une fraction volumique $\varphi=1.0\%$ de CNT dans l'éthylène glycol et de 30% dans l'huile synthétiques de moteur pour une concentration volumique $\varphi=2\%$.

Hwang et Col [15] ont comparé la conductivité thermique de quatre types de nanofluides tels que les nanotubes de carbone multi paroi (MWCNT) dans l'eau, du CuO dans l'eau, SiO₂ dans l'eau, et de CuO dans de l'éthylène-glycol. Ils ont constaté que la conductivité thermique du nanofluide de MWCNT a été augmentée jusqu'à 11,3% pour une concentration volumique de 1%, qui est relativement plus élevée que celle obtenue par les autres groupes de nanofluides.

I.6.3. Les nanoparticules d'oxyde métalliques

Murshed et col [16] ont étudié en convection forcée l'écoulement d'un nanofluide dans une conduite cylindrique. Ce dernier contenant des nanoparticules de TiO₂ de formes nanotube de diamètre de 10 nm et 40 nm de longueur et sphériques de 15 nm de diamètre où l'eau déminéralisée comme fluide de base. Ils ont montré que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la concentration volumique ϕ , et ils ont trouvé également que pour une concentration volumique $\phi = 5\%$ l'amélioration de la conductivité thermique effective est d'environ de 33% pour les nanotubes et de 30% pour les nanoparticules sphériques. Ils ont alors constaté que la dimension et la forme de la particule ont une influence importante sur la conductivité thermique des nanofluides.

D'autre part Wen et Ding [17] ont effectué une étude expérimentale d'un nanofluide dans un écoulement en convection naturelle, entre deux disques horizontaux dont l'un des deux chauffé uniformément. Les nanoparticules d'oxyde de Titanium (TiO₂) de 30 et 40 nm de diamètre sont dispersés dans de l'eau distillée à travers le mécanisme de stabilisation électrostatique et à l'aide d'un homogénéisateur. Ils ont montré qu'il y avait une diminution systématique du coefficient du transfert de chaleur avec l'augmentation de la concentration volumique ϕ .

De leur côté, Vajjha S et col [18] ont mené des études expérimentales pour déterminer la conductivité thermique de trois nanofluides contenant différent nanoparticules (Al₂O₃, CuO et ZnO) dispersées dans un mélange de deux fluides de base, 60% d'éthylène glycol et 40% d'eau. La concentration volumique des particules a été testée jusqu'à 10% et l'intervalle de température était de 298 à 363K. Ils ont montré que la conductivité thermique du nanofluide augmente en fonction de la concentration volumique et de la température. Par contre, l'augmentation du diamètre des nanoparticules fait diminuer la conductivité thermique et ils ont montré que la corrélation proposée par Hamilton-Crosser [19] n'est pas valable et ne peut représenter correctement la variation de la conductivité thermique en fonction de la

température. Par l'utilisation de l'ensemble des données expérimentales, Vajjha et col ont amélioré le modèle de Koo et Kleinstreuer [20], en fournissant de nouvelles corrélations qui sont :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f - \phi(k_f - k_p)} + 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f C_f \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p D}} f(T, \phi) \quad (I.3)$$

$$f(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} + 3.917 \times 10^{-3}) \left(\frac{T}{T_0} \right) + (-3.0669 \times 10^{-2} - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (I.4)$$

Ces corrélations donnent une prévision précise de la conductivité thermique des différents nanofluides.

Yurong et col [21] ont effectué des études expérimentales et numériques sur le transfert de chaleur en convection de nanofluide (TiO_2) à travers un tube droit en régime laminaire. Ils ont étudié l'effet de la concentration des nanoparticules, le nombre de Reynolds, pour différentes tailles des nanoparticules sur l'écoulement et le transfert de chaleur en convection. Les résultats ont montré que l'amélioration du transfert de chaleur a été significative dans la région d'entrée, et la température du nanofluide est beaucoup plus basse pour le nombre de Reynolds de 1500 que le nombre de Reynolds de 900 car le coefficient du transfert de chaleur est plus grand à un nombre de Reynolds plus élevé.

Jian Qu et col [22] ont réalisé une étude expérimentale pour améliorer la performance thermique d'un caloduc d'oscillation (OHP), chargé d'eau déminéralisée et de nanoparticules Al_2O_3 de forme sphérique de 56 nm de diamètre. Pour des fractions massiques de 0.1%, 0.3%, 0.6%, 0.9% et à 1.2%.

Ces travaux ont montré que la performance thermique de l'OHP a été améliorée après l'addition des nanoparticules, qui sont également donné une diminution maximale de la résistance thermique.

Lee et Col [23] ont introduit les nanoparticules CuO et Al_2O_3 de différents diamètres (18.6 et 23.6 nm, 24.4 et 38.4 nm) dans deux fluides de base : l'eau et éthylène-glycol (EG). Ils ont obtenu quatre combinaisons de nanofluides (CuO /eau, CuO /EG, Al_2O_3 /eau et en fin Al_2O_3 /EG). Ils ont constaté que les nanofluides ont des conductivités thermiques sensiblement plus élevées que les fluides de base. Le nanofluide (CuO/EG) a montré qu'il y avait une augmentation de la conductivité thermique de plus de 20% pour une fraction volumique 4%. D'autre part ils ont prouvé que malgré la taille de la particule de CuO plus petite que celle

d' Al_2O_3 , les nanofluides (eau/CuO, EG/CuO) ont montré une meilleure amélioration de la conductivité thermique par rapport au nanofluide (eau/ Al_2O_3 , EG/ Al_2O_3).

Wang et Col [24] ont mesuré la conductivité thermique effective des nanofluides par une technique équilibrée de plat-parallèle. Dans les fluides de base (l'eau, éthylène-glycol (EG), l'huile de pompe à vide et l'huile de moteur), les nanoparticules d' Al_2O_3 et de CuO de diamètres moyens de 28 et 23 nm respectivement y sont suspendues. Les résultats expérimentaux ont montré que les conductivités thermiques de tous les nanofluides étaient plus élevées que celles des fluides de base. En outre, la comparaison avec diverses données a indiqué que la conductivité thermique des nanofluides augmente quand la dimension particulaire décroît. Les résultats ont montré également que l'amélioration n'est que de 12% pour la conductivité thermique et cela par une fraction volumique de 3% des nanoparticules par rapport à l'amélioration de 20% rapportée par Masuda et Col[25] et de 8% rapportée par Lee et Col [23] à la même fraction volumique.

D'autres études menées par Xie et Col [26-13], où ils ont mesuré les conductivités thermiques de SiC pour deux diamètres différents (26 nm et 0,6 μm) suspendu dans l'eau déminéralisée et dans EG. Ils ont remarqué que leurs résultats sont différents des résultats expérimentaux obtenus par Lee et Col [23]. Ils ont constaté que les nanofluides avec les mêmes nanoparticules dans des différents fluides de base ont la même amélioration de la conductivité thermique effective.

En outre, les résultats ont montré que le modèle Hamilton et Crosser [19] est capable de prédire la conductivité thermique de suspensions SiC de 0.6 μm .

Das et Col [3] ont étudié l'effet de la température sur l'amélioration de la conductivité thermique pour des nanofluides contenant des particules d' Al_2O_3 (38.4 nm) et de CuO (28.6nm) par une expérience basée sur la méthode d'oscillation de la température. Ils ont trouvé qu'à la température 52°C l'augmentation de la conductivité thermique est 2 à 4 fois plus grande que celle obtenue à la température ambiante 21°C. De même manière, Li et Peterson [27] ont effectué une recherche expérimentale pour étudier les effets de la variation de la température et la fraction volumique sur la conductivité thermique effective de CuO (29nm) et Al_2O_3 (36nm) suspendu dans l'eau. Ils ont démontré que le type de la nanoparticule, son diamètre, la fraction de volumique et la température moyenne ont des effets significatifs sur la conductivité thermique des nanofluides. Par exemple, pour la suspension d' Al_2O_3 /eau, l'augmentation de la température moyenne de 27 à 34.7°C donne une

augmentation de la conductivité thermique presque de trois fois. Ils ont proposé deux corrélations simples linéaires pour les deux types de nanofluides:

Pour $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$:

$$(k_{\text{eff}} - k_p)/k_p = 0,764\phi + 0,0187(T - 273,15) - 0,462 \quad (\text{I.5})$$

Pour CuO/eau :

$$(k_{\text{eff}} - k_p)/k_p = 3,761\phi + 0,0179(T - 273,15) - 0,307 \quad (\text{I.6})$$

Wen et Ding [17] ont étudié le problème du transfert de chaleur en convection naturelle de nanofluides de TiO_2 (30-40 nm) /eau dans une géométrie composée de deux disques horizontaux en aluminium de diamètre 240mm et d'épaisseur 10mm séparés par un espace de 10mm. Ils ont examiné les coefficients du transfert de chaleur en régime transitoires et stationnaires pour différentes concentrations des nanofluides. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de Putra et col [28], le coefficient du transfert de chaleur est faible pour l'eau pure et il augmente avec la concentration volumique des nanoparticules.

Wen et Ding [10] ont effectué une étude sur le transfert de chaleur en convection d'un nanofluide à base d'eau, les particules d' Al_2O_3 (27-56 nm de diamètre) à travers un tube en cuivre de diamètre de 4,5mm et de longueur 970 mm en régime laminaire.

Ils ont constaté que l'inclusion des nanoparticules d' Al_2O_3 peut augmenter de manière significative le coefficient du transfert de chaleur convectif, si on augmente la concentration des particules et le nombre de Reynolds. En outre, l'amélioration du coefficient du transfert de chaleur est particulièrement remarquable dans la région d'entrée, et diminue avec la distance axiale. De leur côté, Heris et col [29] ont étudié un écoulement laminaire de deux nanofluides (CuO/eau et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$) à travers un tube annulaire en cuivre de longueur 1m et de diamètre intérieur de 6 mm, et un tube externe d'acier inoxydable d'épaisseur 0.5 mm et de diamètre 32 mm, où la vapeur saturée a été distribuée pour créer une condition aux limites à température constante à la paroi. La comparaison des résultats expérimentaux a montré que le coefficient du transfert de chaleur augmente en fonction de la fraction volumique de nanoparticules et le nombre de Peclet, ils ont montré également que le nanofluide ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$) a donné la meilleure augmentation du transfert thermique.

Certains articles [30, 31, 14] ont montré l'importance de la viscosité du nanofluide. Li et Col [31] ont mesuré expérimentalement la viscosité d'un nanofluide contenant les

nanoparticules de CuO, à l'aide d'un viscosimètre capillaire. Les résultats ont montré que la viscosité des nanofluides diminue avec l'augmentation de la température. Cependant, le diamètre du tube capillaire peut influencer sur la viscosité apparente pour la plus grande fraction massique de nanoparticule, particulièrement aux basses températures.

De leur côté, Wang et Col [24] ont mesuré la viscosité relative des nanofluides ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{éthylène glycol}$) et montré également une augmentation de la viscosité relative avec la fraction volumique pour les deux nanofluides. Ils constatent que pour un écoulement laminaire dans un tube cylindrique, le coefficient de transfert de chaleur est proportionnel à la conductivité thermique du nanofluides, et que la chute de pression est proportionnelle à la viscosité. Pour un écoulement turbulent la chute de pression est proportionnelle à $\mu^{1/5}$, et le coefficient de transfert thermique est proportionnel à $(k_{\text{nf}}^{2/3}/\mu^{0,467})$

Cela signifie que l'augmentation du transfert thermique désirable peut être combinée avec une augmentation indésirable de la chute de pression.

Das et Col [30] ont mesuré la viscosité du nanofluide ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$) par rapport au taux de cisaillement. Les résultats ont montré une augmentation de la viscosité en fonction de la concentration volumique. Il y a possibilité que le nanofluide soit non newtonien, ou même viscoélastique dans certains cas. D'autres études expérimentales sont nécessaires pour définir les modèles de la viscosité des nanofluides qui seraient utilisable dans les simulations numériques.

Murshed et col [32] ont constaté que la conductivité thermique effective et la viscosité des nanofluides (eau/TiO_2 , $\text{eau}/\text{Al}_2\text{O}_3$) augmentent de façon significative avec la concentration volumique des particules. Par ailleurs, une augmentation linéaire de la conductivité thermique effective de nanofluides en fonction de la température a été observée.

Pour étudier les caractéristiques du transfert de chaleur des nanofluides par la simulation numérique, deux approches ont été essentiellement adoptées dans la littérature. La première approche suppose que la condition de continuité est encore valide pour les nanofluides. L'autre approche emploie un modèle diphasique pour une meilleure description des phases liquides et solides. Le modèle monophasique est le plus efficace et le plus simple dans le calcul numérique.

Une autre approche est adopté la théorie de Boltzmann pour l'amélioration du transfert de chaleur dans les nanofluides peut être affectée par plusieurs facteurs tels que le mouvement

brownien, la tension superficielle solide-liquide, l'agglomération des nanoparticules et le frottement entre les particules liquides et solides. Donc il est difficile de décrire tous ces phénomènes mathématiquement.

Parallèlement à l'étude expérimentale du coefficient de la conductivité thermique du nanofluide, Maïga et col [33-34] ont effectué des études numériques pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques du nanofluide traversant un tube chauffé uniformément de longueur « $L = 1 \text{ m}$ » sous les deux régimes d'écoulement laminaire et turbulent, en utilisant le modèle monophasique. Les résultats ont prouvé que l'addition des nanoparticules peut augmenter le transfert thermique sensiblement comparé au liquide de base seul. Et que (Al_2O_3 /éthylène glycol) a fourni une meilleure amélioration que (Al_2O_3 /eau).

De leurs côtés, Roy et col [35] ont réalisé une étude numérique du transfert de chaleur pour le nanofluide « Al_2O_3 /eau » dans un système de refroidissement radial, et ont constaté que l'addition des nanoparticules dans les fluides de base augmente le taux du transfert thermique considérablement. En effet, l'utilisation de 10% du volume des nanoparticules donne une augmentation double du taux du transfert de chaleur par rapport à celui du fluide de base. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de Maïga et col [33-34] puisqu'ils ont utilisé le même modèle.

Wang et col [36] ont étudié numériquement les caractéristiques du transfert de chaleur en convection naturelle d'une cavité bidimensionnelle, en fonction du nombre de Grashof et des fractions volumiques pour différents nanofluides. Leurs résultats montrent que, la suspension des nanoparticules a fait augmenter significativement le taux du transfert thermique pour tous les nombres de Grashof. Pour le nanofluide (Al_2O_3 /eau), l'augmentation du coefficient de transfert thermique moyen était approximativement de 30% pour une concentration de 10%.

Une augmentation maximale du transfert de chaleur de 80% a été obtenue pour 10% de nanoparticules de Cu dispersés dans l'eau. En outre, le coefficient du transfert moyen a augmenté presque 100% pour le nanofluide de nanotubes de carbone (huile/CNT) pour une concentration volumique de 1%.

Khanafer et col [37] ont développé un modèle analytique pour déterminer le transfert de chaleur en convection naturelle dans les nanofluides. Ils ont supposé que le nanofluide est monophasique. Ils ont analysé l'effet de la suspension des nanoparticules sur le transfert de chaleur. Ils ont observé que le taux du transfert thermique a augmenté avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules pour toutes les valeurs de Grashof.

Xuan et Roetzel [38] ont proposé plusieurs corrélations pour le transfert de chaleur par convection pour les nanofluides. Les deux modèles monophasique et diphasique ont été utilisés pour expliquer le mécanisme de l'augmentation des taux du transfert de chaleur. Cependant, il y a peu de données expérimentales pour valider de tels modèles.

Roy et col [39] ont effectué une étude numérique pour évaluer le transfert de chaleur et le taux de cisaillement à la paroi pour un écoulement laminaire radial dans un système de refroidissement. Ils ont utilisé un nanofluide (Al_2O_3 /eau) et comparés son efficacité à ceux de l'eau, éthylène glycol et le pétrole. Toutes les conditions utilisées dans cette étude étaient semblables à ceux de Maïga et col [40] qui ont pris le nanofluide comme fluide incompressible. Les résultats montrent que le coefficient de transfert de chaleur et le taux de cisaillement à la paroi étaient importants si la concentration volumique ou le nombre de Reynolds augmentaient.

La figure I-3 : montre la conductivité thermique des différents nanofluides, où elle illustre plusieurs résultats obtenus par plusieurs chercheurs Wang et Mujumdar [41].

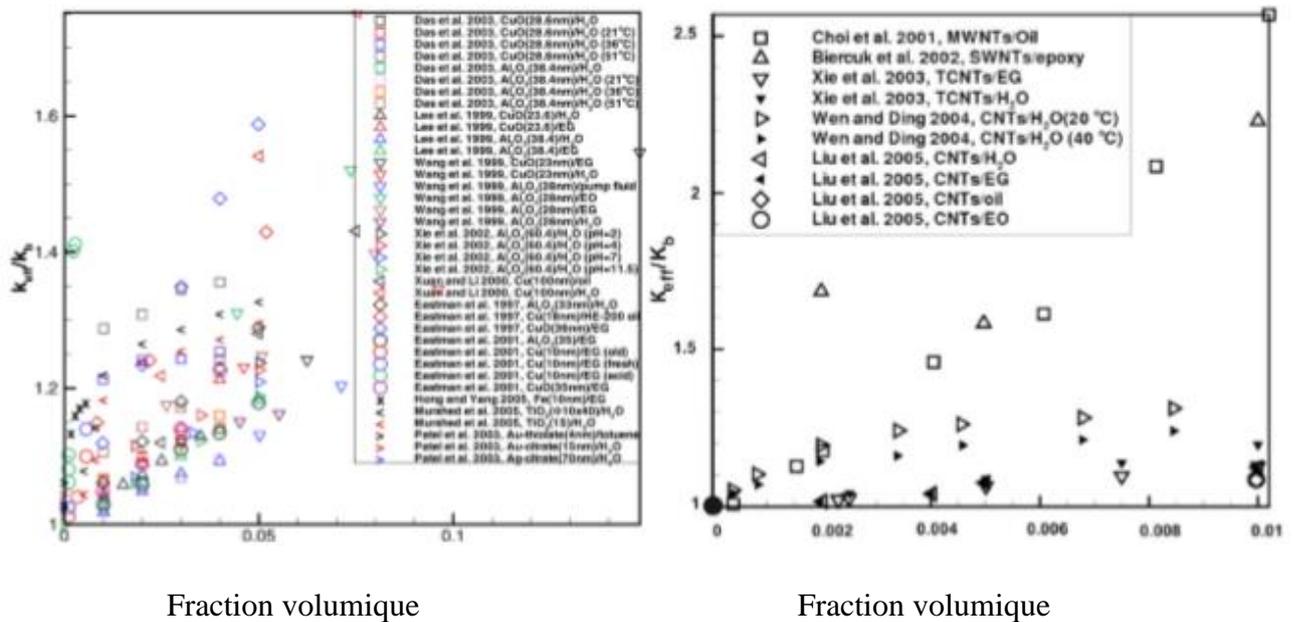


Figure I.3 : Comparaison des données expérimentales de la conductivité thermique pour différents types de nanofluides.

I.7. Effets influençant les propriétés thermophysiques des nanofluides

Les paramètres principaux influençant la conductivité thermique du nanofluide sont :

- (1) la concentration volumique des particules,
- (2) Le fluide de base,
- (3) le type de la particule,.
- (4) la température.

Les résultats expérimentaux de l'amélioration de la conductivité thermique en fonction de ces paramètres sont résumés dans les tableaux (1-4) donné en ANNEXE-A.

I.7.1. Effet de la concentration volumique de particules

L'effet de la concentration volumique des particules sur l'amélioration de la conductivité thermique du nanofluide est montré dans les figures I-4.a et I-4.b, où les travaux de sept groupes de chercheurs sont présentés pour les particules de l' Al_2O_3 suspendus dans l'eau. La dimension de la particule et la température du nanofluide varient entre ces groupes, mais la tendance générale est claire.

Nous constatons que l'amélioration de la conductivité thermique augmente en fonction de la fraction volumique des particules et que les concentrations de particules d'Oxyde métallique donne une amélioration allant jusqu'à 30%.

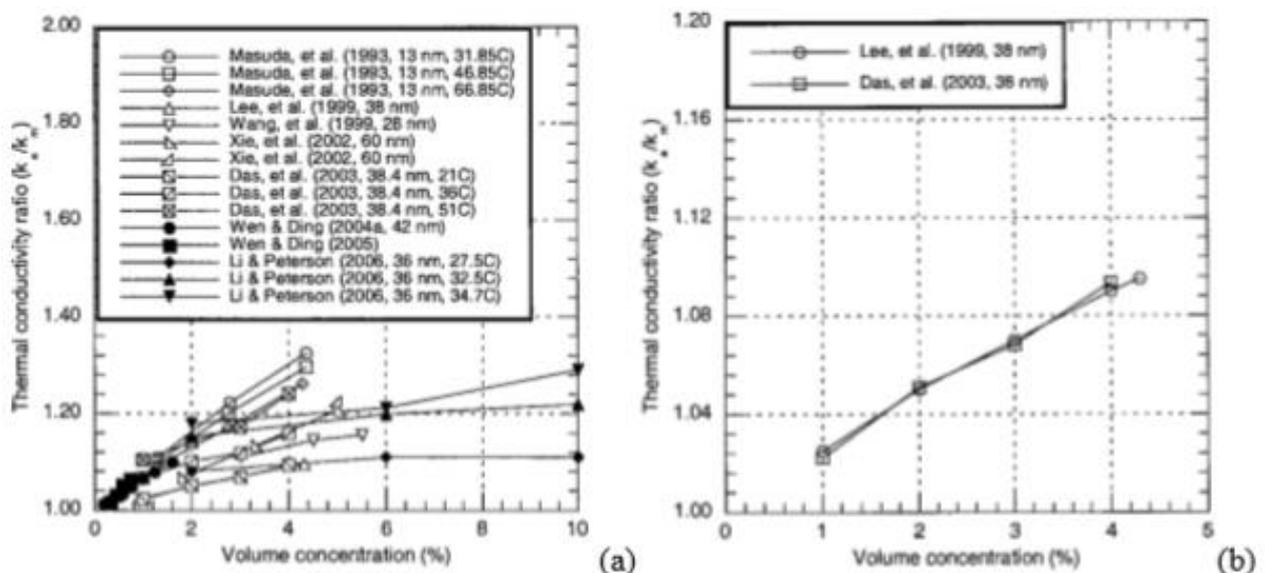


Figure I.4 : Effet de la concentration volumique sur la conductivité thermique du nanofluide (Al_2O_3 / l'eau) pour différents chercheurs.

I.7.2. Effet du type de la nanoparticule

Les figures I-5.a et I-5.b regroupent les études expérimentales de plusieurs chercheurs. Elles illustrent l'effet du type des nanoparticules sur la conductivité thermique pour deux nanofluides, l'un est un oxyde métallique et le second est un métal, tous les deux sont dilués dans de l'eau. Tous les paramètres (température et la taille de la particule) sont supposés constants. Ils ont constaté que les particules métalliques produisent la même amélioration que les oxydes métalliques mais à faible concentration volumique.

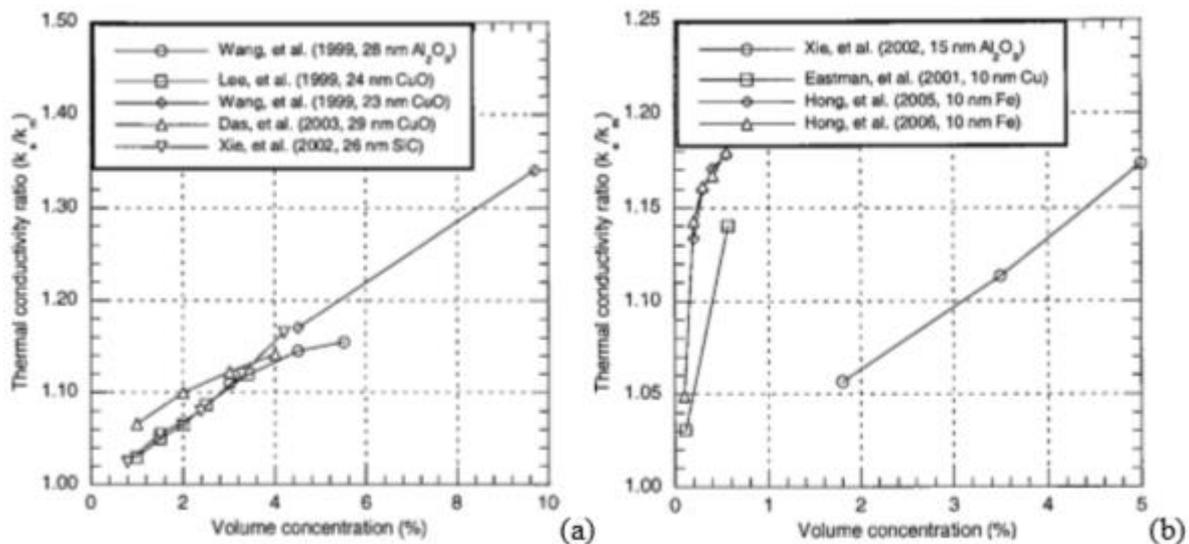


Figure I.5 : Effet des types de particules sur la conductivité thermique des nanofluides.

On observe aussi que le rapport de la conductivité thermique du métal a augmenté plus rapidement par rapport à l'oxyde métallique.

I.7.3. Effet de la température

En général, la conductivité thermique du nanofluide est sensible à la température par rapport au fluide de base. Par conséquent, l'amélioration de la conductivité thermique du nanofluide est également sensible à la température. Ainsi, l'amélioration de la conductivité thermique augmente en fonction de la température. Das et col [3] ont présenté leurs résultats pour un intervalle de température allant de 28 jusqu'à 51°C en utilisant les nanoparticules d'Al₂O₃ et CuO à base d'eau.

On observe que les données indiquent clairement que l'amélioration de la conductivité thermique augmente lorsque la température augmente. Mais elle est plus élevée pour l'oxyde de cuivre CuO par rapport à l'oxyde d'aluminium Al₂O₃, où le taux de la conductivité pour

une concentration volumique de $\varphi = 4\%$ et une température de $T = 51\text{ °C}$. Ils atteignent 1,24 pour Al_2O_3 et une valeur de 1,36 pour CuO .

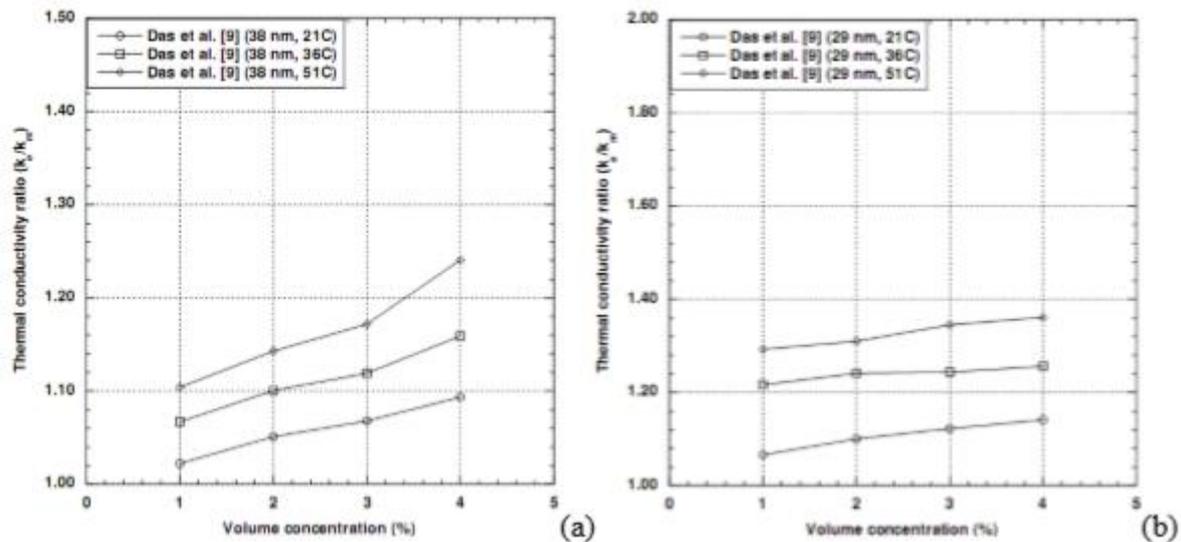


Figure I.6: Effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides à base d'eau : (a) pour Al_2O_3 , (b) pour CuO .

I.8. Domaines d'applications des nanofluides

Les nanofluides peuvent être employés dans de nombreux domaines, pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques. Dans cette section, quelques exemples d'applications seront présentés tel que le transport, la micro-électronique, la défense, le nucléaire, l'espace, et la biomédicale.

I.8.1. Refroidissement des systèmes thermiques

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides ce dernier améliore le taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, Tzeng et col [42] ont dispersé les nanoparticules de CuO et Al_2O_3 dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission. Dans une autre application, Zhang et Que [43] ont rapporté une étude pour réduire l'usure (lubrification) à l'aide des nanoparticules, et améliorer les propriétés tribologiques, et la résistance à l'usure avec la réduction du frottement entre les éléments mécaniques mobiles.

I.8.2. Refroidissement des systèmes électroniques

Dans les circuits intégrés, les nanofluides ont été considérés comme fluides de refroidissement. Pour cela plusieurs études ont été effectuées. Tsai et col [9] ont employé un nanofluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur. De leur côté, Ma et col [44] ont étudié l'effet du nanofluide sur les possibilités de transport de la chaleur d'un caloduc d'oscillation, ils ont prouvé qu'à la puissance d'entrée de 80 W, et seulement pour une concentration volumique de $\phi = 1\%$, la différence de température entre le vaporisateur et le condensateur est de 16.6°C.

I.8.3. Refroidissement des systèmes militaires

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

I.8.4. Refroidissement des systèmes spatiaux

Pour les applications dans l'espace, You et col [45] et Vassallo et col [46] ont effectué des études pour montrer que la présence des nanoparticules dans le fluide de refroidissement en électronique générale joue un rôle très important dans les applications de l'espace où la densité de puissance est très élevée.

I.8.5. Refroidissement des systèmes nucléaires

L'institut de technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle nanotechnologie (nanofluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique, et de la performance économique des systèmes nucléaires.

I.8.6. La biomédecine

Les nanofluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédicale. Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement du cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale, Jordan et col [47] ont effectué une étude où les nanofluides

pourraient être employés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines.

I.8.7. D'autres applications

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

I.9. Les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques

Les concentrateurs cylindro-paraboliques sont la technologie la plus utilisée dans les grandes centrales solaires thermodynamiques pour la production d'électricité. Le miroir concentrateur est un cylindre de section parabolique et ne comporte qu'une seule direction de courbure. La concentration a lieu sur la ligne où est placé le récepteur tubulaire dans lequel circule le fluide caloporteur (eau ou huile) qui peut être chauffé jusqu'à 450°C. De très grandes puissances peuvent être installées par interconnexion de plusieurs rangées de concentrateurs. La limitation dans ce cas dépend des pertes de charges et des déperditions thermiques qui augmentent avec la taille de l'installation. La Figure (I.7) montre deux exemples d'installations utilisant ce type de collecteurs ou concentrateur. La figure (I.7.a) présente l'installation de production d'eau chaude sanitaire d'une prison aux Etats-Unis, où 100 m² de concentrateurs cylindro-paraboliques de petite taille alimentent un ballon d'eau chaude de 20 m³. La figure (I.7.b) quant à elle, n'est autre qu'un aperçu du champ de concentrateurs de la centrale solaire thermodynamique Solar Electric Generating System (SEGS) de Kramer Junction (Californie, Etats-Unis) [48].



(a)



(b)

Figure I.7 : Photographie de deux installations utilisant des capteurs cylindro-parabolique. [48]

I.10. Les composants d'un concentrateur cylindro-parabolique

La conception d'un collecteur avec effet de concentration, nécessite des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite, afin d'augmenter la concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur, les différentes parties du CCP sont les suivantes :

- Support de la Structure.
- Moteurs (hydraulique, moteur électrique + réductions).
- Contrôleurs (boucles ouvertes ou fermées).
- Miroir (verre épais, mince).
- Tube absorbeur (sélectif, sous vide, connectiques).
- Poursuite ou tracking solaire.

Les composants principaux caractérisant le fonctionnement d'un cylindro parabolique sont comme suit [49] :

1) Le collecteur

1.a) Le réflecteur parabolique

Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmissivité atteint 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident. Le

facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est approximativement de 80%.

1.b) Le tube absorbeur

Le tube absorbeur est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective, et il est entouré d'une enveloppe transparente en verre, comme il est représenté par la figure (I.8). Il est placé le long de la ligne focale du concentrateur cylindro- parabolique. Il doit avoir les caractéristiques suivantes :

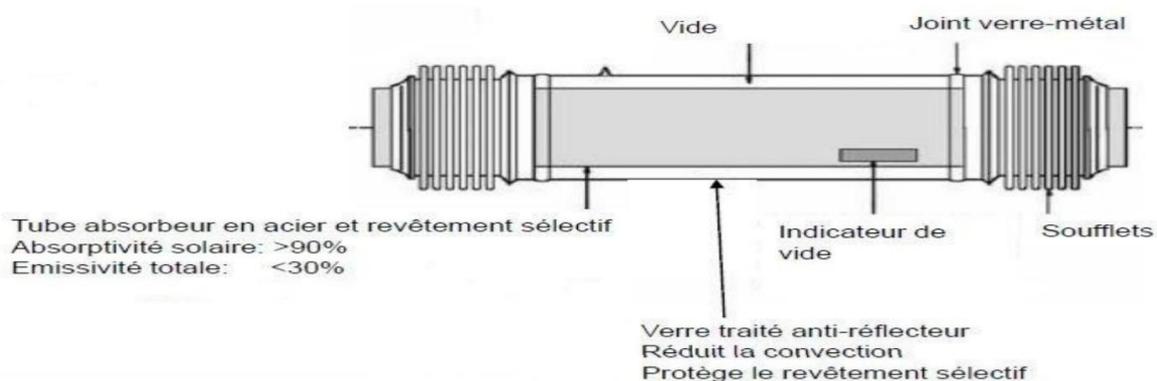


Figure I.8 : Structure du tube absorbeur.

- Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.
- Pertes thermiques limitées : La température du tube dépassant généralement 400C° , les pertes par échanges convectifs et radiatifs sont très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide.

2) Le champ solaire

Le champ solaire est la partie réceptrice de l'installation : la radiation solaire y est transformée en énergie thermique. Les collecteurs sont connectés en série pour former de longues files qui à leur tour sont connectées en parallèle. La taille du champ solaire dépend de la puissance désirée et de la température du fluide caloporteur en sortie. Les collecteurs sont alignés dans la direction nord-sud, et disposent d'un système mono axial de poursuite du soleil dans la direction est-ouest. Le système de poursuite permet de contrôler la position du soleil par rapport aux rangées de collecteurs. Cette information est transmise au système de contrôle central qui ajuste à son tour l'angle d'inclinaison en fonction.

Au cours des trois décennies écoulées. Des unités de production de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts à une dizaine de mégawatts ont été construites à travers le monde. Les centrales à miroirs cylindro-paraboliques restent la technologie la plus répandue aujourd'hui.

Une première période intensive de construction de centrales solaires se situe entre 1980 et 1990. Suivi d'une période de quinzaine années d'attente (de retour d'expérience) afin de vérifier la pertinence des concepts CSP (performances énergétique et économique, fiabilité, efficacité....). Puis une reprise croissante des constructions à partir de 2007, évolution témoin de la relative maîtrise des technologies de cette filière. Un potentiel d'amélioration de 20 à 30% reste envisageable, notamment via la production directe de vapeur dans les capteurs, et l'optimisation des miroirs. Le États-Unis et, pour l'Europe, l'Allemagne et l'Espagne (centrale solaire d'Almería) mènent conjointement des recherches sur ces thèmes. Des réalisations, combinant parfois turbine à gaz et solaire, sont annoncées dans plusieurs pays tels que l'Algérie, l'Égypte, le Maroc, l'Inde et le Brésil.

II.11. Modes de transfert thermique

On distingue trois modes de transfert thermiques : la conduction thermique (ou diffusion thermique), la convection thermique et le rayonnement.

II.11.1. Conduction thermique

L'énergie microscopique due à l'agitation moléculaire est transférée d'une région à une autre sous l'effet d'un gradient de température, c'est-à-dire quand l'énergie moyenne d'agitation des molécules n'est pas la même en différents endroits du corps.

- Dans les fluides, la conduction thermique résulte des chocs entre les molécules « rapides » qui viennent des régions chaudes et les molécules « lentes » des régions froides : il y a un transfert d'énergie cinétique des plus rapides aux plus lentes.
- Dans les solides, le transfert thermique par déplacement des molécules n'existe pas car leur seul mouvement possible est une vibration autour de leurs positions d'équilibre; c'est en fait cette énergie vibrationnelle qui est transportée le long du réseau cristallin.

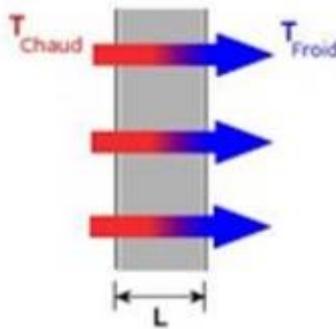


Figure II.9 : Phénomène de conduction dans un mur.

Dans tous les cas, il y a un transfert d'énergie des régions chaudes vers les régions froides sans aucun mouvement macroscopique de matière.

II.11.2. Convection thermique

Elle apparaît uniquement dans les fluides où il peut y avoir un transport macroscopique de matière dû aux différences de densités engendrées par des différences trop importantes de températures.

On peut par exemple l'observer avec de l'eau chauffée dans une casserole : lorsque la différence de température entre le fond et la surface libre du liquide devient trop importante, le liquide du fond, plus chaud, se dilate et sa masse volumique devient plus petite : il remonte alors vers la surface vers les zones moins chaudes. Il cède alors de la chaleur en se refroidissant au fur et à mesure et se contracte. Sa masse volumique diminue et il finit par redescendre.

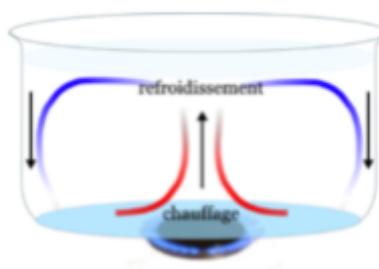


Figure I.10 : Phénomène de convection dans un liquide.

II.11.3. Rayonnement thermique

C'est le troisième mode de transfert thermique et il est entièrement de nature électromagnétique. Tout corps peut absorber une partie du rayonnement électromagnétique ambiant (ce sont les atomes et les molécules qui absorbent les photons). Inversement, tout corps émet continuellement un rayonnement : sous l'effet de l'agitation thermique les atomes ou molécules entrent constamment en collision un avec les autres et une partie de l'énergie reçue lors d'une collision est rendue par émission de rayonnement électromagnétique (désexcitation des atomes ou molécules qui reviennent dans leur état fondamental).

I.12. Conclusion

On a présenté dans ce chapitre introductif les différents nanofluides utilisés lors de cette décennie, leurs propriétés thermophysiques et leur application dans de nombreux domaines. Le but de ces travaux est d'obtenir une augmentation du transfert de chaleur transporté par le nanofluide comparé à celui qui serait transporté par le seul fluide porteur. Les tableaux présentés dans ce chapitre montrent l'importance de l'écart sur les résultats de mesure de la conductivité thermique des nanofluides obtenus par les différentes équipes mentionnées précédemment. Le manque de concordance entre les différents résultats expérimentaux obtenus par les différents expérimentateurs et portant sur le même nanofluide, serait probablement dû, en partie, au fait que la fraction volumique utilisée n'est pas la même pour tous les auteurs puisqu'il n'est nul part précisé la température pour laquelle la mesure de ϕ (fraction volumique) a été effectuée. Suivant les auteurs les expériences ont été menées à des températures moyennes allant de 5 à 80 °C alors que la variation de la masse volumique du fluide porteur ne peut plus être négligée dans cet intervalle de température.

CHAPITRE. II

**Modélisation Mathématique et procédure
numérique**

II. Modélisation Mathématique et procédure numérique

II.1. Introduction

La résolution des équations d'un écoulement se fait par l'utilisation d'une méthode numérique qui consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations. Ce chapitre expose la description du problème et la simulation par le code de calcul FLUENT, essentiellement la procédure qu'il propose pour résoudre les problèmes tels que le nôtre. La construction des géométries avec génération de maillage et l'incorporation des conditions aux limites sont effectuées par le constructeur et mailleur GAMBIT.

II.2. Formulation mathématique du problème d'écoulement du nanofluide

La quasi-totalité des études effectuées sur les nanofluides ont visé principalement la détermination des performances énergétiques. Ces études ont démontré la faisabilité et la rentabilité de ce type de fluide en comparaison avec d'autres types de fluides. Cependant, afin d'identifier les phénomènes de transports qui apparaissent dans certains domaines industriels, la connaissance du comportement thermophysique du mouvement des nanofluides serait toutefois nécessaire.

Dans cette partie, nous présentons les équations régissant les écoulements dans le cas générale (massique et dynamique, thermique pour un écoulement à travers une conduite cylindrique). Pour traiter ce cas, nous allons établir ces équations pour le cas général puis les simplifier pour le cas qui nous intéresse, c'est à dire le cas d'un écoulement axisymétrique laminaire dans une conduite cylindrique. Ces équations mathématiques générales gouvernant l'écoulement, sont illustrées dans plusieurs ouvrages de mécanique des fluides et de transfert de chaleur Fletcher [54].

II.2.1. Equations générales de transport

Le système d'équation gouvernant les phénomènes de la convection forcée est régi par les équations générales de la conservation de la masse et de la thermodynamique.

a. Equation de continuité :

Elle est déduite du principe de la conservation de masse.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (\text{II.1})$$

(j=1, 2, 3 : indice de sommation).

b. Equations de conservation de la quantité de mouvement :

D'après la deuxième loi fondamentale de la dynamique, l'équation de conservation de quantité de mouvement d'un fluide incompressible et stationnaire est :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i \quad (\text{II.2})$$

j : 1, 2, 3 indice de somme.

$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}$: Taux de la quantité de mouvement.

$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j}$: Taux de transport de quantité de mouvement.

$\frac{\partial \rho}{\partial x_i}$: Représente les forces due à la pression.

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$: Représente les forces de viscosité.

F_i : Représente les forces du volume.

c. Equation de conservation de l'énergie :

Elle est obtenue par l'application du premier principe de la thermodynamique. Cette équation pour un fluide Newtonien incompressible, s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(u_j T)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + \dot{q} \quad (\text{II.3})$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

α : Diffusivité thermique.

k : Conductivité thermique.

c_p : Chaleur spécifique à pression constante.

\dot{q} : Terme de la source de chaleur.

II.2.2. Hypothèses simplificatrices

Afin d'aborder la résolution des équations régissant l'écoulement d'un nanofluide au sein de l'absorbeur solaire, relatif à la géométrie montrée dans la figure II.1, on va adopter les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'écoulement est laminaire.
- La géométrie est simple et axisymétrique.
- Les nanofluides sont des mélanges homogènes, incompressibles et newtoniens.
- Le système de coordonnées est cartésien (x, r, Θ) .
- L'écoulement est stationnaire $(\frac{\partial}{\partial t} = 0)$.
- Les propriétés thermophysiques des nanofluides (k : la conductivité thermique, μ : la viscosité cinématique, C_p : chaleur spécifique) sont supposées constantes.

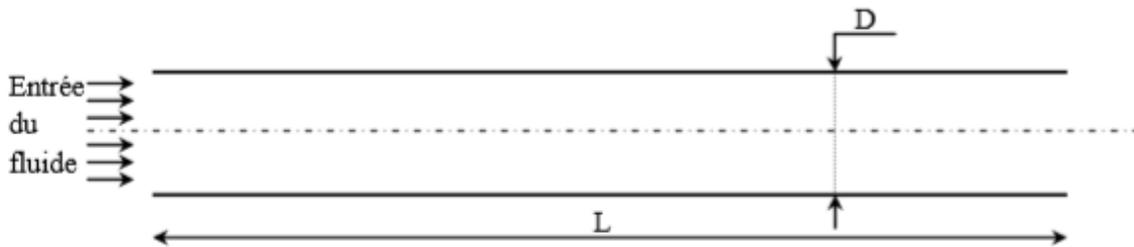


Figure II.1 : Domaine d'étude.

II.2.3. Les équations gouvernant l'écoulement

Après l'application des hypothèses de simplification précédentes, les équations générales régissant l'écoulement deviennent :

a. Equation de continuité :

L'équation de continuité pour le nanofluide :

$$\frac{\partial(\rho_{nf}u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{nf}rv)}{\partial r} = 0 \quad (\text{II.4})$$

b. Equations de quantité de mouvement :

- Suivant la composante axiale u

L'équation de Navier-Stokes s'écrit suivant la direction $\ll x \gg$ pour le nanofluide :

$$\rho_{nf} \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \rho_{nf} \frac{1}{r} \frac{\partial(rv u)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (\text{II.5})$$

- Suivant la composante radiale v

L'équation de Navier-Stokers s'écrit suivant la direction $\ll r \gg$ pour le nanofluide :

$$\rho_{nf} \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \rho_{nf} \frac{1}{r} \frac{\partial(rv v)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \mu_{nf} \frac{v}{r^2} \quad (\text{II.6})$$

c. Equation de l'énergie :

Elle est déduite de la loi de concentration de l'énergie et elle peut comme suite :

$$\rho_{nf} \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \rho_{nf} \frac{1}{r} \frac{\partial(rvT)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_{nf}}{Cp_{nf}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k_{nf}}{Cp_{nf}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (\text{II.7})$$

d. Généralisation des équations :

Les équations précédentes peuvent être écrites sous la forme conservative suivante :

$$\frac{\partial(\rho_{nf} u \varphi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{nf} r v \varphi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\varphi_{nf}} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\varphi_{nf}} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + S_{\varphi} \quad (\text{II.8})$$

Où :

φ : Est la variable générale.

Γ_{φ} : Coefficient de la diffusivité.

S_{φ} : Terme source.

Les expressions du coefficient de diffusion et du terme source S_{φ} sont indiquées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Expressions du coefficient de diffusion et du terme source.

Equation	φ	Γ_{φ}	S_{φ}
De continuité	1	0	0
Q-M suivant x	U	μ	$-\frac{\partial \rho}{\partial x}$
Q-M suivant r	V	μ	$-\frac{\partial \rho}{\partial r} - \mu \frac{v}{r^2}$
Energie	T	$\frac{k}{Cp}$	0

Il est difficile de comparer les différentes études expérimentales sur les nanofluides car chacune a été menée pour des nanoparticules de tailles différentes et des préparations d'échantillons différentes. Or la taille des particules et la préparation des échantillons sont des facteurs déterminants qui influent fortement sur les résultats obtenus Das et col [55].

D'autres approches théoriques ont vu le jour pour tenter de comprendre l'origine et l'importance de cette augmentation de la conductivité thermique des nanofluides. Néanmoins

aucune d'entre elles n'est parvenue à décrire convenablement tous les comportements obtenus expérimentalement.

II.3. Principe du code CFD

Les logiciels de simulation numérique des écoulements basés sur la méthode des volumes finis peuvent maintenant être considérés comme de véritables « expériences numériques », lorsqu'elles sont faites avec soin. L'avantage des « méthodes numériques » est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (champ de vitesse, champ de pression, contraintes etc.), sont immédiatement disponibles en tout point de l'écoulement.

Les méthodes CFD (Computational Fluid Dynamics) ont l'avantage de mettre en œuvre les équations générales de la mécanique des fluides avec un minimum des hypothèses. Elles résolvent notamment les équations non-linéaires instationnaires et compressibles.

II.4. Présentation du Gambit et du Fluent

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT 2019 R3 nécessite la présentation de logiciel GAMBIT 2.4.6.

II.4.1. GAMBIT 2.4.6

GAMBIT 2.4.6 est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, Spatiale, ... etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

Les types de mailles supportées sont :

- Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales ;
- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales ;
- Des mailles (hybrides) mixtes.

II.4.2. Présentation du logiciel de calcul « FLUENT 2019 R3 »

ANSYS-Fluent 2019 R3 est un code de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) qui modélise les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes, l'interface du logiciel est illustrée sur la figure (II.2). Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité.

Fluent emploie la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité et quantité de mouvement et de l'énergie. En utilisant cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, "Fluent" passe par les étapes suivantes :

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul.
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les inconnues telles que : vitesses, pressions et températures.
- Linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant.

Pour tenir compte des effets turbulents, le logiciel de calcul offre la possibilité de choisir un des modèles de turbulence suivants :

- Le modèle à une équation de Spalart Allmaras;
- Le modèle à deux équations $k - \varepsilon$;
- Le modèle à deux équations $k - \omega$;
- Modèle de contrainte de Reynolds (Reynolds stress model).

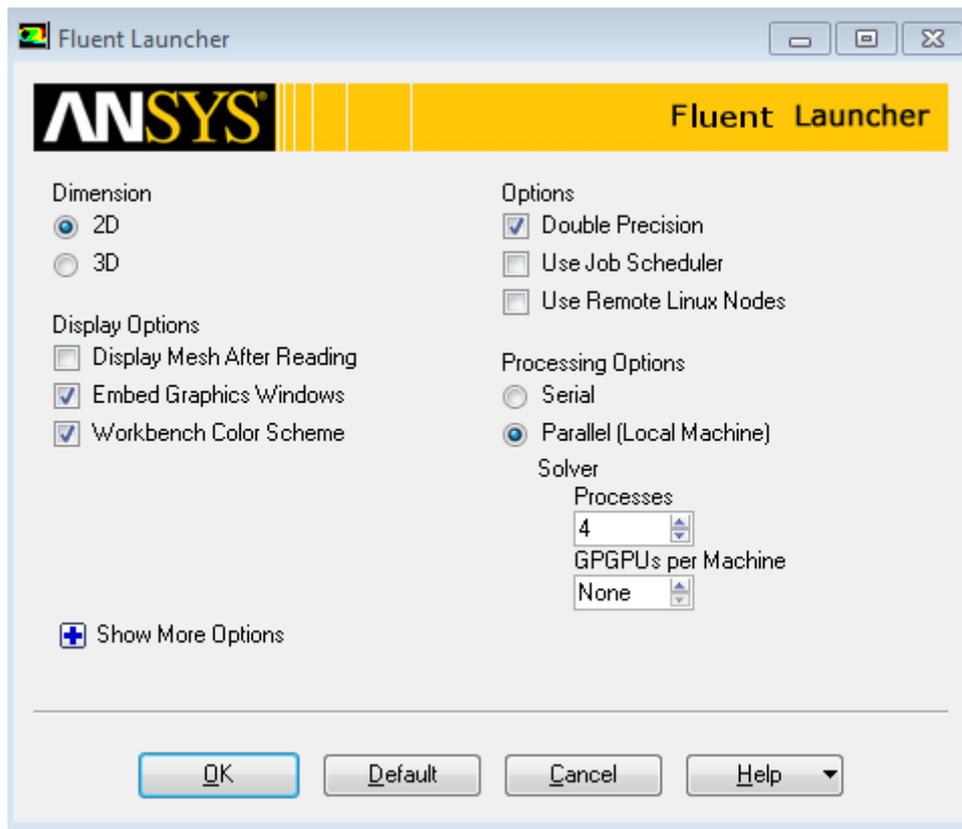


Figure II.2 : Interface du logiciel ANSYS-Fluent 2019 R3 d'un calcul parallèle avec 4 processeurs.

II.5. Procédure de résolution

Pour la création de notre modèle on passe par les étapes suivantes :

II.5.1. Création de la géométrie

Notre géométrie est construite sur Gambit en 3D, vu sa complexité on a choisi de l'établir point par point, relier entre eux dans différents directions les lignes sont créés, ensuite les faces sont formées, pour obtenir en dernier les volumes.

Nous avons deux tubes de diamètres différents {28 et 35} mm, avec une longueur de 3 m.

Pour raffiner le maillage nous avons divisé chaque tube en cinq volumes au milieu sous la forme d'un carré, puis nous avons connecté chaque points du carré avec le point le plus proche de circonférence dans le tube pour former nous avons quatre volumes de même dimensions dans chaque côté et le carré au milieu.

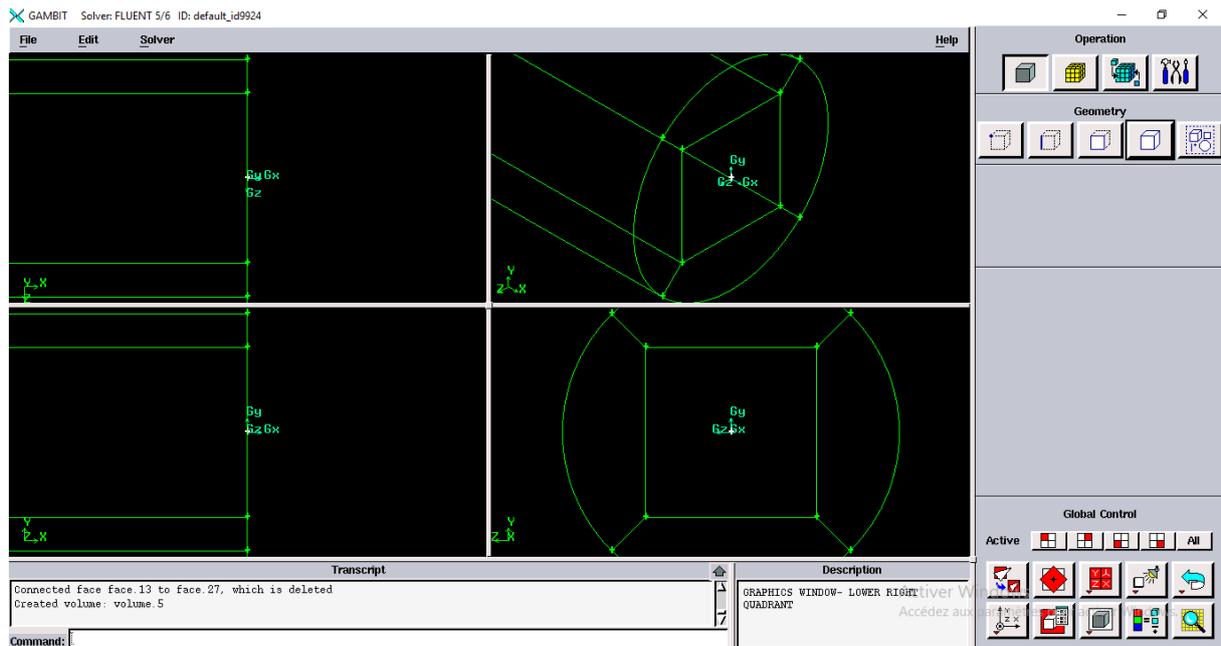


Figure II.3 : Présentation de la géométrie par GAMBIT en 3D.

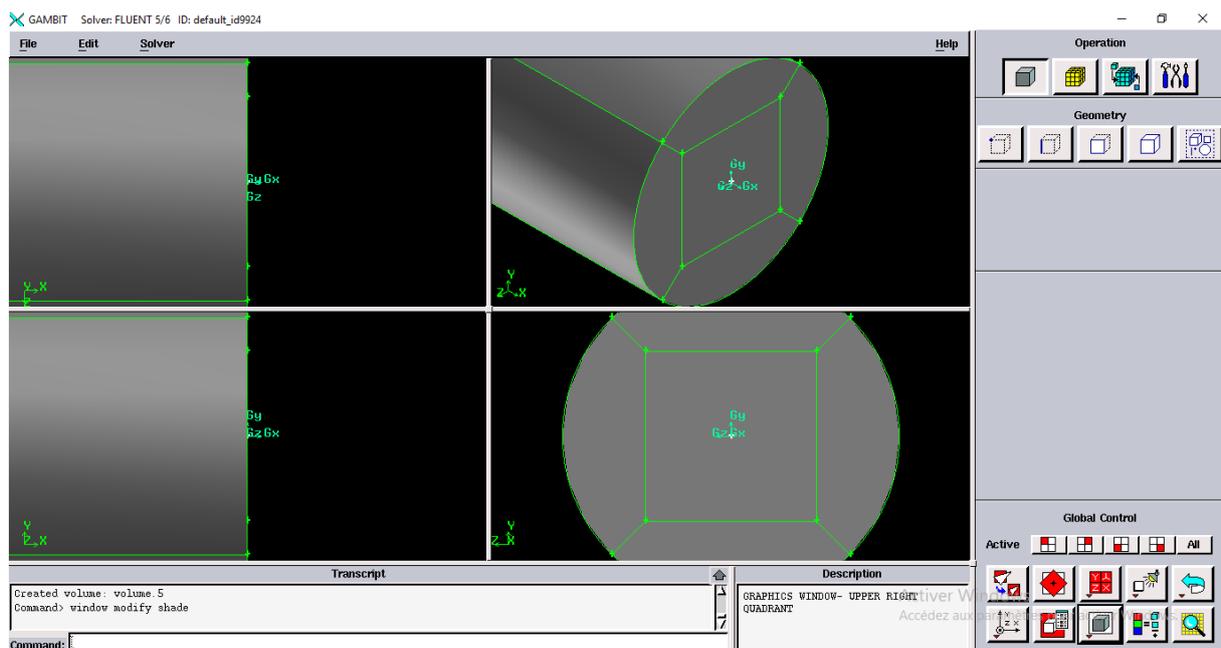


Figure II.4 : Présentation de nanofluide par GAMBIT en 3D.

II.5.2. Création du maillage

Pour construire un maillage, il est bon de suivre la démarche suivante :

- définir la géométrie.
- réaliser le maillage.
- définir les paramètres des zones de calcul.

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on à mailler : coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne; des quatre points de carré et des quatre points de tube ; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle.

Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques x , y et z ou indices I , J et k .

Par ailleurs, il peut être avantageux de définir des points intermédiaires qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées pour raffiner le maillage près des parois par exemple ou bien pour épouser au mieux la forme des obstacles, parois ou autres...

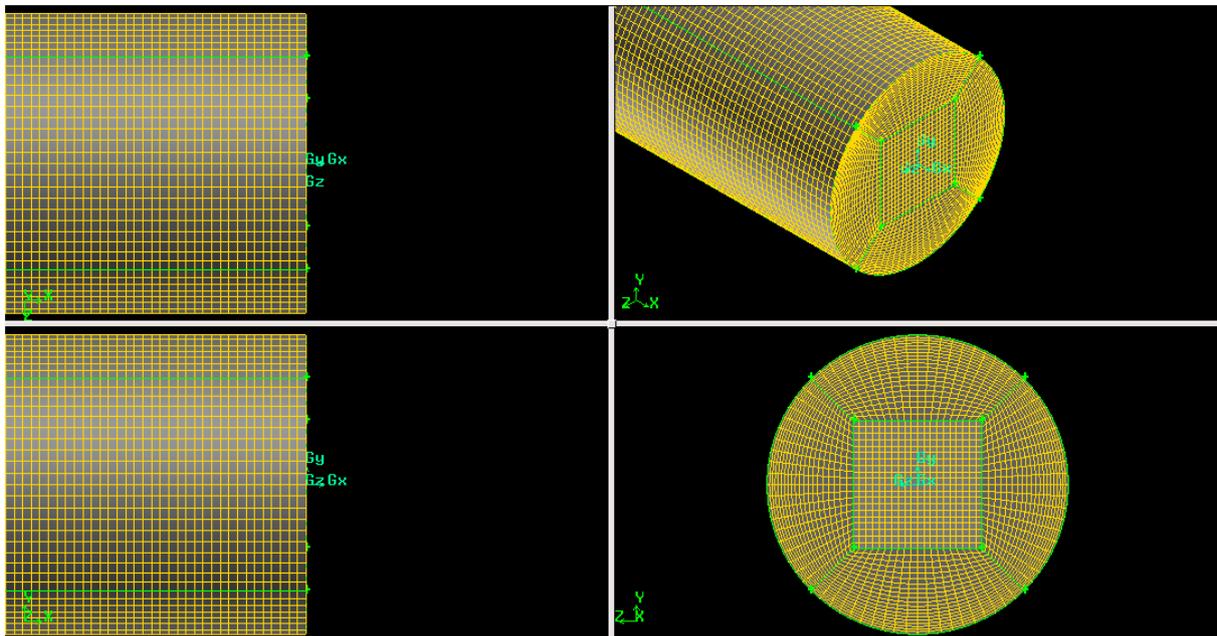


Figure II.5 : Maillage par GAMBIT 3D pour le tube de diamètre 35 mm et la longueur de 3mètre.

Tableau II.2 : nombre de cellules, mailles, et de nœuds dans chaque tube.

Diamètre de tube	Nombre des cellules	Nombre des mailles	Nombre des nœuds
28 mm	518400	1571328	534877
35 mm	768000	2325760	790125

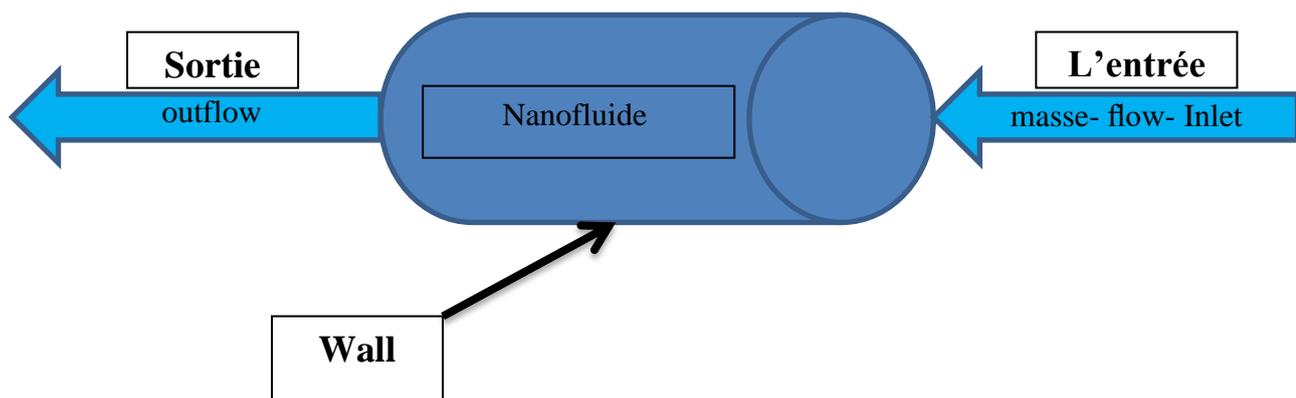
Remarque :

On a choisi de raffiner notre maillage dans la zone la plus proche de notre carré ceci à cause des phénomènes important qui déroulent dans cette zone, pour avoir des bonnes résultats.

II.5.3. Les conditions aux limites

Une fois que nous avons représenté la géométrie du système étudié, nous devons fixer des conditions aux limites du système. Nous en utilisons essentiellement trois conditions :

- La première condition aux limites << masse- flow- Inlet >>, correspond le débit à l'entrés.
- La deuxième condition << outflow >> est appliquée au niveau de la sortie (sortie de nanofluide).
- La troisième condition est représentée par la condition << Wall >> dans ANSYS-Fluent.

**Figure II.6** : Les conditions aux limites de système.

II.6. les lois de mélange

Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et cinématique, etc.) des fluides de base sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. Nous supposons dans notre travail que les nanoparticules sont bien dispersées de façon uniforme et forment une suspension stable dans le fluide de base et qu'elles sont en état d'équilibre thermique avec ce dernier.

II.6.1. La masse volumique

En tenant compte des suppositions antérieures, la masse volumique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique à une température T donnée, est établie en appliquant la définition de la masse volumique des mélanges.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (\text{II.9})$$

La fraction volumique des nanoparticules notée φ , désigne le rapport du volume des nanoparticules et le volume total.

$$\varphi = \frac{\text{Volume solide}}{\text{Volume totale du nanofluide}} = \frac{V_s}{V_f + V_s} \quad (\text{II.10})$$

On en déduit alors l'expression de la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (\text{II.11})$$

Où ρ_{nf} est la masse volumique du nanofluide, ρ_f est la masse volumique du fluide de base et ρ_s est la masse volumique des nanoparticules solides.

II.6.2. La chaleur spécifique

La plupart des études effectuées dans la littérature utilise le modèle définis par l'équation II.4 [50] pour déterminer la chaleur spécifique des nanofluides.

$$Cp_{nf} = (1 - \varphi)Cp_f + \varphi Cp_s \quad (\text{II.12})$$

Avec $(Cp)_{nf}$, $(Cp)_f$ et $(Cp)_s$ désignent respectivement les chaleurs spécifiques du nanofluide, fluide de base, et du nanoparticules.

II.6.3. la viscosité

Différents modèles sont établis pour le calcul de la viscosité des nanofluides, à savoir le modèle donné par Einstein, celui de Batchelor, celui donné par Pack et Cho et enfin le modèle de Maiga et al [51] qu'on a utilisé dans ce qui suit:

$$\mu_{nf} = \mu_f(123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad (\text{II.13})$$

Où μ_{nf} et μ_f , désignent respectivement les viscosités dynamiques du nanofluide et du fluide de base.

II.6.4. la conductivité thermique

A partir de la résolution de l'équation de l'énergie, beaucoup de modèles de calcul de la conductivité thermique des nanofluides, constitués par des éléments très réguliers tels que les nanoparticules sphériques, ont été développés. Les modèles décrits dans la littérature sont des outils de prédictions développés afin d'appréhender les mécanismes de transfert thermique au sein de l'écoulement des nanofluides. Parmi ces modèles, on retrouve le modèle de Maxwell, le modèle de Yu et Choi, le modèle de Bruggeman et le modèle de Hamilton-Crosser [52] qu'on a utilisé dans cette étude dont la formulation est indiquée ci-dessous :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_s)\varphi}{k_s + (n-1)k_f - (k_f - k_s)\varphi} \quad (\text{II.14})$$

Où n est un facteur de forme empirique égal à $n = 3$ pour les particules sphériques et $n = 6$ pour les particules cylindriques.

II.7. caractéristiques thermophysiques

En utilise les lois de mélange pour estimer la chaleur spécifique, la densité, la conductivité thermique, et la viscosité des nanofluides suivent :

- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) + terminol VP-1
- Le cuivre (Cu) + terminol VP-1
 - L'oxyde d'aluminium : est un composé chimique de formule Al_2O_3 . Il s'agit d'un solide blanc inodore insoluble dans l'eau.
 - Le cuivre : le cuivre à faible dose est essentiel au développement de toute forme de vie.

- Terminol VP-1 : est utilisable sous forme liquide ou sous forme d'ébullition-condensation fluide caloporteur jusqu'à 400 °C. il est miscible et interchangeable (à des fins de complément ou de conception) avec d'autres fluides d'oxyde de diphenyle constitués de manière similaire.

II.7.1. Les caractéristiques thermophysiques des nanoparticules l'oxyde d'aluminium

Dans le tableau 3 sont présentées les propriétés thermophysiques des nanoparticules l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) avec une température moyenne de 27°C.

Tableau II.3 : Propriétés thermophysiques des nanoparticules l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).

	C_p (j.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	k (w.K ⁻¹ .m ⁻¹)	μ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
Al_2O_3	765,3	3970	40	/

II.7.2. Les caractéristiques thermophysiques des nanoparticules le cuivre

Dans le tableau 4 sont présentées les propriétés thermophysiques des nanoparticules le cuivre (Cu) avec une température moyenne de 27 °C.

Tableau II.4 : Propriétés thermophysiques des nanoparticules le cuivre (Cu).

	C_p (j.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	k (w.K ⁻¹ .m ⁻¹)	μ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
Cu	380	8960	40,1	/

II.7.3. Les caractéristiques thermophysiques de liquides de base (terminol VP-1)

Dans le tableau 5 sont présentées les propriétés thermophysiques de liquides de base (terminol VP-1) avec une température moyenne de 27 °C.

Tableau II.5 : Propriétés thermophysiques de liquides de base (terminol VP-1).

	C_p (j.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	k (w.K ⁻¹ .m ⁻¹)	μ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
Terminol VP1	1565	1059	0,1356	0,003585

II.7.4. Les caractéristiques thermophysiques des nanofluides

Dans les tableaux 6, et 7 sont présentées les propriétés thermophysiques des liquides caloporteurs (les nanofluides) avec une température moyenne de 27 °C.

- Le facteur de forme empirique égal à $n = 3$ pour calculer la conductivité thermique dans les deux cas, par ce que les deux nanoparticules (l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 et le cuivre Cu) ont des particules sphériques.
- La fraction volumique φ égale à 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5%.

Tableau II.6 : Propriétés Thermophysiques du Nanofluide (Allumine Al_2O_3 + Terminol VP1) en fonction de la fraction volumique.

φ (%)	C_p ($j.kg^{-1}.K^{-1}$)	ρ ($kg.m^{-3}$)	k ($w.K^{-1}.m^{-1}$)	μ ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
0.5	1525	1205	0,1568	0,005996
1	1485	1350	0,1803	0,01061
1.5	1445	1495	0,2066	0,01743
2	1405	1641	0,2361	0,02646
2.5	1365	1786	0,2694	0,03769
3	1325	1932	0,3074	0,05112
3.5	1285	2078	0,3513	0,06676
4	1245	2223	0,4022	0,08461
4.5	1205	2369	0,4623	0,1047
5	1165	2514	0,5341	0,1269

Tableau II.7 : Propriétés Thermophysiques du Nanofluide (Cuivre Cu + Terminol VP-1) en fonction de la fraction volumique.

φ (%)	C_p ($j.kg^{-1}.K^{-1}$)	ρ ($kg.m^{-3}$)	k ($w.K^{-1}.m^{-1}$)	μ ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
0.5	1506	1453	0,1570	0,005996
1	1447	1848	0,1808	0,01061
1.5	1389	2243	0,2074	0,01743
2	1330	2638	0,2373	0,02646
2.5	1271	3033	0,2711	0,03769
3	1212	3428	0,3098	0,05112
3.5	1154	3823	0,3544	0,06676
4	1095	4218	0,4065	0,08461
4.5	1036	4613	0,4680	0,1047
5	977,2	5008	0,5418	0,1269

II.8. Les paramètres à étudier

Il y a trois modes de transfert de chaleur présentes dans le tube absorbeur, le premier c'est la conduction entre l'extérieur de tube à l'intérieur, le deuxième c'est la convection entre le matériau et le fluide qui en considéré comme une convection forcée, la troisième et la dernière mode de transfert de chaleur c'est le rayonnement, dans notre travail en va négliger par ce que le fluide caloporteur (les nanofluides) en considéré comme un corps noir.

II.8.1. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds (Re) représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. En calculer pour définir la nature du régime d'écoulement (laminaire, transitoire, ou turbulent). Ce nombre sans dimension apparait naturellement en adimensionnant les équations de Navier-stokes.

On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{w \cdot \varnothing_i}{\vartheta} \quad (\text{II.15})$$

Re : Nombre de Reynolds

w : La vitesse caractéristique du nanofluide ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

\varnothing_i : Diamètre du tube récepteur (m)

ϑ : La viscosité cinématique du nanofluide ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

Avec :

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{II.16})$$

μ : viscosité dynamique du fluide caloporteur ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

ρ : La masse volumique du nanofluide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

En remplace l'équation (II.16) dans l'équation (II.15),

D'où la formulation classique :

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot \varnothing_i}{\mu} \quad (\text{II.17})$$

La formule générale du débit massique (\dot{m}) :

$$\dot{m} = S \cdot w \cdot \rho \quad (\text{II.18})$$

Donne :

$$\rho = \frac{\dot{m}}{S \cdot w} \quad (\text{II.19})$$

\dot{m} : Débit massique ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

S : La surface de tube (m^2)

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V} = \frac{V}{t} \\ \dot{m} = \frac{m}{t} \\ \dot{\rho} = \frac{\rho}{t} \end{array} \right.$$

\dot{V} : Débit volumique ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

V : Le volume (m^3)

m : La masse (kg)

t : Le temps (s)

$\dot{\rho}$: Le coefficient de dilatation ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)

En remplace l'équation (II.19) dans l'équation (II.17).

D'où la formulation :

$$Re = \frac{\phi_i \cdot \dot{m}}{S \cdot \mu} \quad (\text{II.20})$$

La formule générale de la surface d'un tube :

$$S = \frac{\pi \cdot \phi_i^2}{4} \quad (\text{II.21})$$

π : Constante d'Archimède ($\pi = 3,14$)

En remplace l'équation (II.21) dans l'équation (II.20).

D'où la formule Reynolds (Re) de qu'en va utiliser dans notre calcul :

$$Re = \frac{4. \dot{m}}{\pi. \phi_i. \mu} \quad (\text{II.22})$$

II.8.2. Le flux de chaleur

Lorsqu'un débit massique \dot{m} de matière (nanofluide) entre dans le système à la température T_i et en ressort à la température T_s , on doit considérer dans les calculer un flux de chaleur entrant correspondant :

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h = \dot{m}. Cp. (T_f - T_i) - \dot{Q}_{pert} \quad (\text{II.23})$$

\dot{Q} : Flux de chaleur (W)

\dot{m} : Débit massique (kg.s^{-1})

Δh : L'enthalpie (KJ/mol)

Cp : La chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

T_f : La température sortie dans le tube ($^{\circ}\text{C}$)

T_i : La température rentrée dans le tube ($^{\circ}\text{C}$)

\dot{Q}_{pert} : Déperdition thermique (W)

II.8.3. L'efficacité du collecteur

La mesure des performances d'un collecteur solaire est une étape importante et nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du système. Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par le récepteur à l'énergie reçue à l'ouverture du concentrateur [53].

On peut calculer l'efficacité du collecteur cylindro-parabolique par l'équation (II.24) :

$$\eta_{collecteur} = \frac{\dot{Q}}{DNI. A_{collecteur}} \quad (\text{II.24})$$

Le rendement atteint par le concentrateur dépend de l'intensité du rayonnement et de la différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

$\eta_{collecteur}$: L'efficacité du collecteur cylindro-parabolique

\dot{Q} : Flux de chaleur (W)

DNI : Direct normal irradiation (flux solaire) (W.m^{-2})

$A_{collecteur}$: Surface apparue du collecteur (m^2)

La surface d'ouverture de miroir (Surface de apparue du collecteur) est calculée comme le produit de la largeur de l'ouverture l et de la longueur du collecteur L :

$$A_{collecteur} = L.l \quad (\text{II.25})$$

l : La largeur de l'ouverture (m), L : La longueur du collecteur (m).

II.9. Régimes d'écoulement

La connaissance du régime d'écoulement d'un fluide est un point clé dans notre travail, car il a une influence sur la plupart des phénomènes, en particulier les transferts de chaleur, de matière, les pertes de charge etc...

Trois grands régimes d'écoulement ont été définis par Reynolds :

- L'écoulement laminaire : écoulement rectiligne, le fluide s'écoule en filets parallèles à l'axe de la conduite, sans mélange.
 - ✓ Pour $Re < 2000$, l'écoulement est laminaire.
- L'écoulement intermédiaire : l'écoulement est plus ou moins rectiligne, avec un peu de mélange (petits tourbillons).
 - ✓ Pour $2000 < Re < 10^5$, l'écoulement est intermédiaire.
- L'écoulement tourbillons, avec un mélange important.
 - ✓ Pour $Re > 10^5$, l'écoulement est turbulent.

La formule finale du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{4. \dot{m}}{\pi. \phi_i. \mu_{nf}} \quad (\text{II.26})$$

- Le débit massique (\dot{m}) : en prendre égal à 0,03942 Kg/s
- La constante d'Archimède $\pi = 3,14$
- Diamètre du tube récepteur (ϕ_i) : nous avons deux tubes de diamètre différente {28 et 35} mm

- Viscosité dynamique du fluide caloporteur (μ) : en calcule par utilisé les lois de mélange.

❖ *Calcul du nombre de Reynolds en fonction de la fraction volumique :*

Tableau II.8 : Le nombre de Reynolds dans les deux tubes avec les différentes fractions volumiques.

Tube	φ	μ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	Re
Tube 1 $\varnothing = 28mm$	5	0,005996	299,10
	10	0,01061	169,03
	15	0,01743	102,89
	20	0,02646	67,77
Tube 2 $\varnothing = 35mm$	5	0,005996	239,28
	10	0,01061	135,22
	15	0,01743	82,31
	20	0,02646	54,22

- ❖ Dans le cas général de notre travail sur les deux tubes et les nanofluides différents, le nombre de Reynolds n'a pas dépassé le 2000 malgré le changement de fraction volumique. Ce que signifie que le régime d'écoulement dans les tubes est toujours laminaire.

II.10. Calcul du flux de chaleur

Pour effectuer une simulation sous le solveur Fluent pour les deux géométries considérées, créés dans le Gambit, des tubes de diamètre égal respectivement à 28 mm et 35 mm et d'une longueur de 3 m, il faut d'abord calculer le flux de chaleur en fonction du DNI, rim angle et la surface du collecteur.

Avant de calculer le flux de chaleur, il faut d'abord calculer les paramètres suivants :

- La surface d'ouverture de miroir et celle de l'absorbeur tubulaire.
- Direct normal irradiation (DNI).
- L'efficacité du collecteur.

1) calcul La surface d'ouverture de miroir

La surface d'ouverture de miroir (Surface apparente du collecteur) est calculée comme le produit du largeur de l'ouverture l et de la longueur du collecteur L :

$$A_{collecteur} = L.l \quad (\text{II.27})$$

Les dimensions du collecteur cylindro-parabolique que nous étudions sont :

- La largeur de l'ouverture est égale à 1,5 m ($l=1,5$ m).
- La longueur du collecteur est égale 3 m ($L=3$ m).

Alors :

$$A_{collecteur} = L.l = 1,5.3 = 4,5 \text{ m}^2 \quad (\text{II.28})$$

La surface de l'ouverture du miroir est égale à 4,5 m².

2) Direct normal irradiation (DNI)

La radiation solaire directe est mesurée au moyen de pyréliomètres dont la surface de réception est arrangée pour être normale au parcours du soleil. Grâce à des orifices, seule la radiation du soleil et d'un anneau voisin du ciel est mesurée, la radiation de cette dernière composante étant parfois appelée la radiation circumsolaire ou la radiation d'auréole.

Nous pouvons extraire le DNI via le programme Gneenius.

2.a) le programme Gneenius :

Greenius est un logiciel puissant de simulation pour le calcul et l'analyse de Projets des énergies renouvelables à alimentation électrique. Nous notons les centrales thermiques solaires, les cylindro-paraboliques, les systèmes photovoltaïques, et les centrales éoliens ou concentrateurs paraboliques à Moteur Stirling. Ce programme offre une seule combinaison des calculs techniques et économiques détaillés comme ils sont nécessaires pour la planification et l'installation des projets renouvelables.



Figure II.7 : Interface Greenius.

2.b) Les graphes de DNI :

Nous avons trois courbes de DNI qui changent avec le temps, le temps a été divisé en heures.

- ✓ La première courbe concerne les données annuelles du DNI dans un site précis.
- ✓ La deuxième sur un mois et nous avons choisi le mois d'août pour la simulation.
- ✓ La troisième courbe au cours d'une journée, et nous avons choisi le 28ème jour qui montre le changement du DNI pendant une journée.

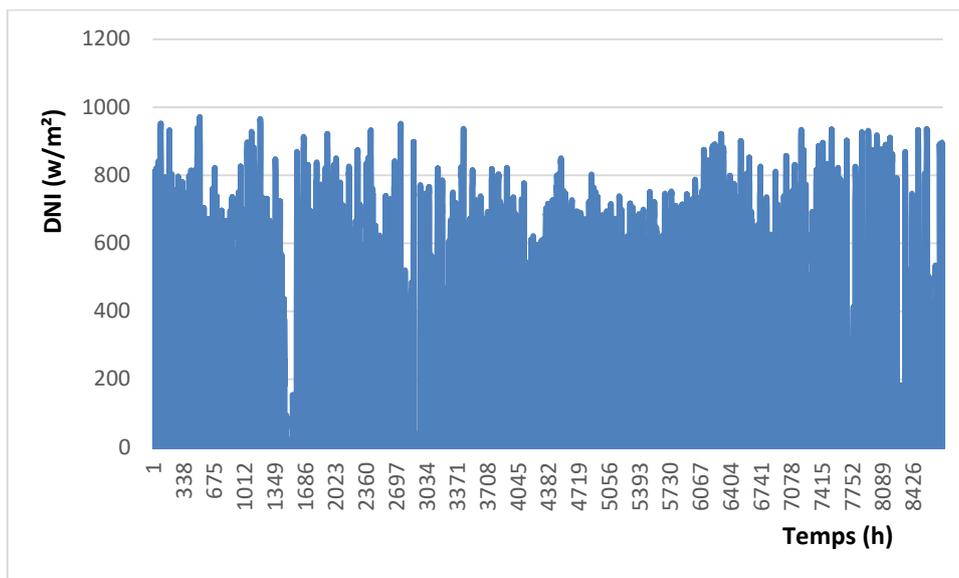


Figure II.8 : Variation de DNI en fonction de temps pendant une année.

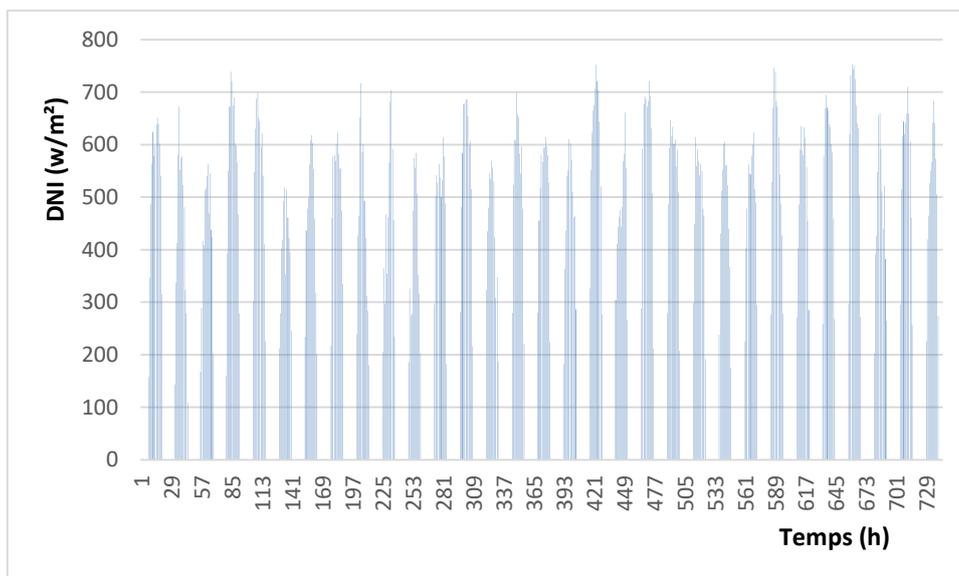


Figure II.9 : Variation de DNI en fonction de temps pendant le mois d’Août.

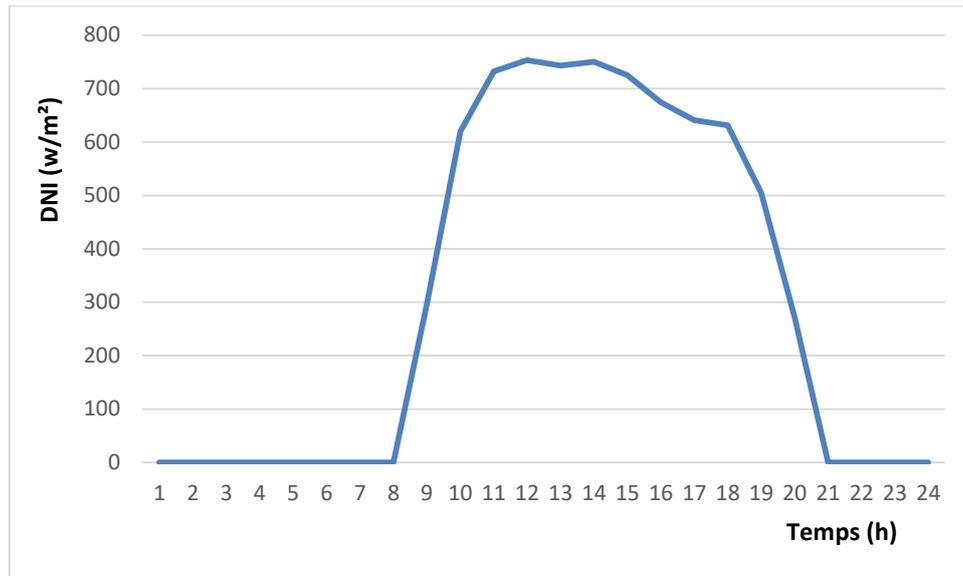


Figure II.10 : Variation de DNI en fonction de temps dans la journée du 28 août.

Dans notre étude, nous prendrons :

- ❖ Et DNI=500w/m² comme une valeur qui s'étend sur une longue période de presque une journée ensoleillée complète et il est possible de l'étudier.

3) Efficacité du collecteur

Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par le récepteur à l'énergie reçue à l'ouverture du concentrateur, et souvent entre 65 et 70%.

4) Application numérique

En peut écrire l'équation (II.16) sous forme :

$$\dot{Q} = \eta_{\text{collecteur}} \cdot DNI \cdot A_{\text{collecteur}}$$

$$\text{Et } q = \dot{Q}/S \quad (\text{II.29})$$

Le q étant le flux de chaleur absorbé par la section efficace de l'absorbeur solaire qui est de :

$$(S=S_{\text{totale}} \cdot (100/360)), \text{ Rim angle étant de } 100^\circ.$$

Tableau II.9 : Le flux de chaleur dans la journée 28 août.

$A_{\text{collecteur}}(\text{m}^2)$	$\eta_{\text{collecteur}}$	DNI (w/m ²)	$q(\text{kw/m}^2)$
4,5	0,7	500	5.7

II.11. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté le code calcul ANSYS-Fluent, son principe de fonctionnement. Nous avons montré les étapes suivies pour la création de la géométrie, et du maillage sous Gambit de notre problème.

Après, nous avons calculé les paramètres à introduire dans le programme fluent pour exécuter la simulation numérique, et obtenir des résultats qui seront discutés au chapitre suivant.

CHAPITRE. III

Résultats et discussions

III. Résultats et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter et discuter les résultats du transfert thermique par convection forcée, dans un absorbeur d'un concentrateur cylindro-parabolique est parcouru par des nanofluides constitué d'une base fluide (Terminol VP-1) et les nanoparticules d'oxyde d'Aluminium et le cuivre.

Les propriétés thermophysiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique) des fluides caloporteurs de base sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. De nombreux paramètres caractérisant ces nanoparticules peuvent avoir un effet notable sur les valeurs des propriétés thermophysiques du nanofluide obtenu (la nature des nanoparticules, leur taille, la fraction volumique ϕ , la conductivité du fluide de base et celle des nanoparticules, la température du milieu,...etc). De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées, lors de ces deux dernières décennies, en vue de mieux caractériser les propriétés thermophysiques des nanofluides mais cette caractérisation est encore loin d'être satisfaisante. On supposera dans toute la suite de notre travail que les nanoparticules sont bien dispersées dans le fluide de base et qu'ils sont en état d'équilibre thermique avec ce dernier. Les propriétés thermophysiques effectives du nanofluide seront approximées par différentes relations tirées de la littérature spécialisée.

Nous présenterons d'abord les propriétés thermophysiques de ce nanofluide qui seront utilisées dans la recherche de nos résultats en fonction de la fraction volumiques.

L'objectif de ce chapitre consiste à analyser les résultats obtenus régissant le transfert de chaleur de chaque nanofluide en écoulement confiné dans l'absorbeur concentrateur cylindro-parabolique.

Les hypothèses prises en considération sont :

- Température d'entrée est de 300° K.
- Longueur de l'absorbeur est fixée à 3 m.
- Le débit massique étant égal à 0,03942 Kg/s dans tous les cas d'étude.
- Le flux de chaleur est égal à 5,7 Kw/m².
- La fraction volumique est comprise entre 0 et 10 %.

Les résultats obtenus dans ce chapitre seront interprétés et discutés en termes de la température, et l'amélioration du transfert de chaleur en fonction de fluides caloporteurs (les deux nanofluides plus le fluide de base), la fraction volumique et la géométrie de l'absorbeur solaire (deux diamètres différents 28 et 35 mm).

III.2. Propriétés Thermophysiques du fluide caloporteur en fonction de la fraction volumique

Une fois tous les calculs effectués, nous exportons les résultats sur un fichier séparé afin de tracer des courbes de comparaison entre les différentes nanoparticules. Nous obtenons ainsi des courbes qui nous permettent de prédire le comportement des nanofluides utilisés dans notre cas d'étude.

Les figures III.1, III.2, et III.3 représentent la variation de la densité, la conductivité thermique, et la chaleur spécifique en fonction de la fraction volumique pour les deux nanofluides considérés, l'Oxyde d'Aluminium (l'Alumine) et le Cuivre combinés au fluide de base : le Terminol VP-1.

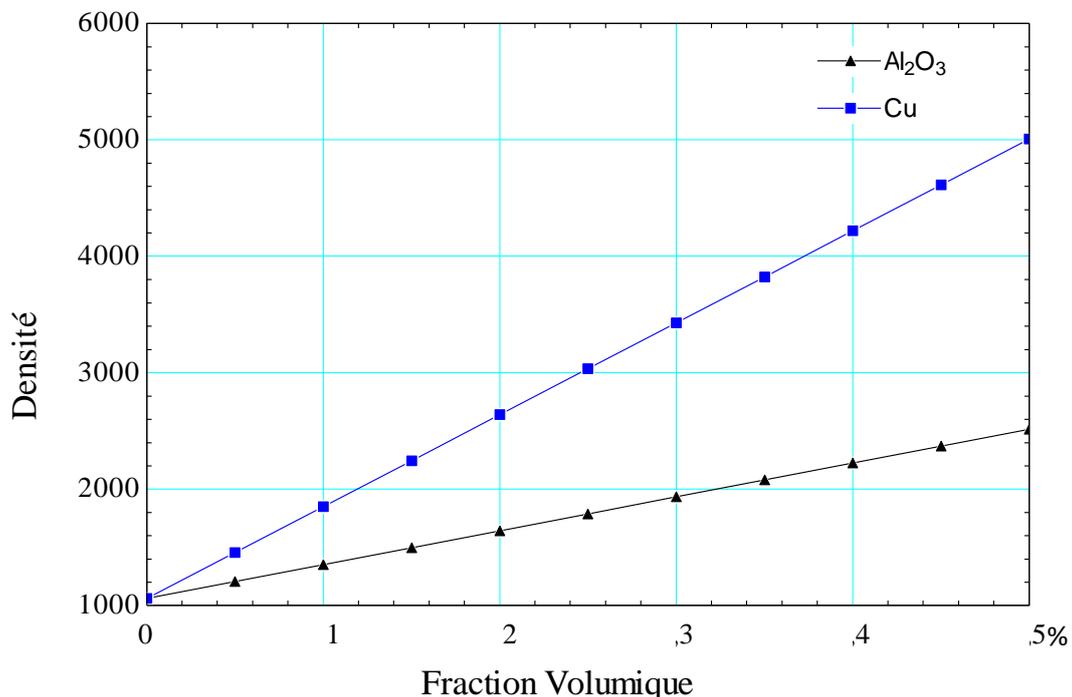


Figure III.1 : Variation de la densité des nanofluides (l'oxyde d'aluminium et le cuivre) en fonction de la fraction volumique.

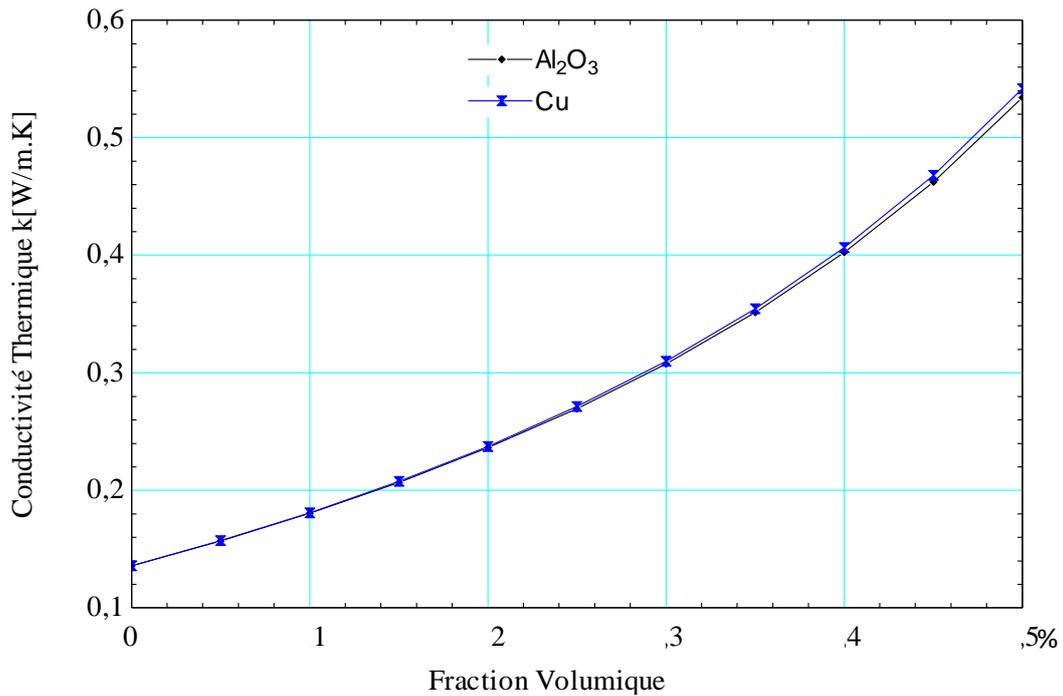


Figure III.2 : Evolution de la conductivité thermique dans les nanofluides (l'oxyde d'aluminium et le cuivre) en fonction de la fraction volumique.

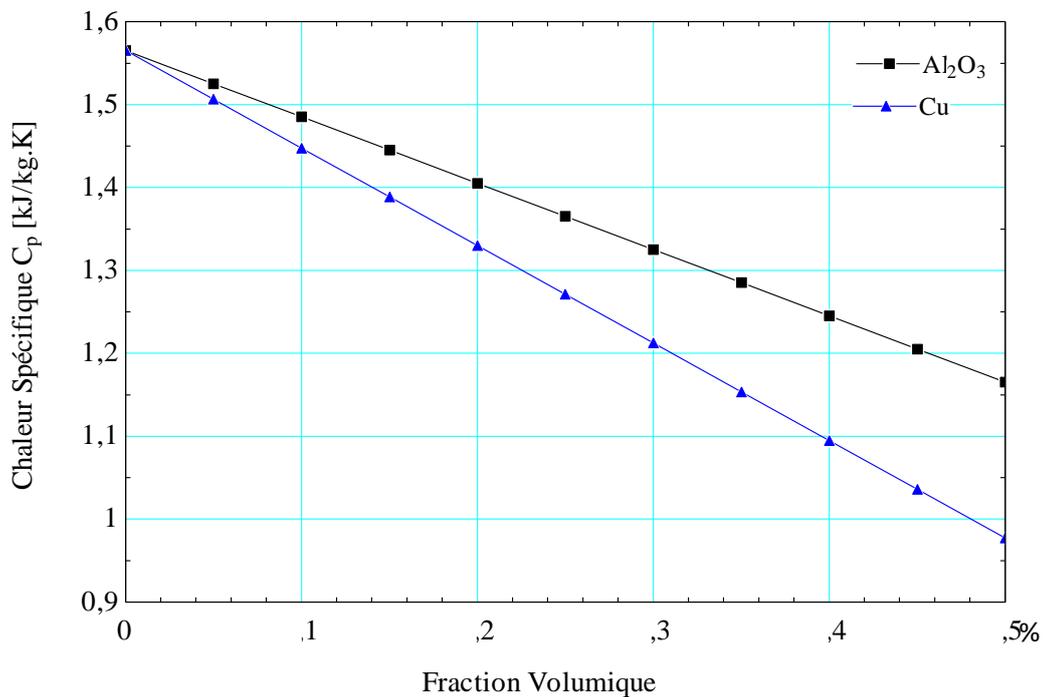


Figure III.3 : Variation de la chaleur spécifique dans les nanofluides (l'oxyde d'aluminium et le cuivre) en fonction de la fraction volumique.

- A partie de la première figure (III.1), on remarque que la densité augmente de près de cinq fois lors de l'utilisation des nanoparticules du cuivre par rapport à l'alumine qui peut atteindre les 2500 Kg/m^3 .

Généralement, pour calculer la densité d'un nanofluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique ϕ à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange.

- La deuxième figure (III.2), montre la convergence de la méthode ascendante de la conductivité thermique pour atteindre le $0,55 \text{ w/m.k}$ à une fraction volumique 0,5 pour les deux nanoparticules sachant que la conductivité thermique du cuivre est plus importante de celle de l'Alumine à partir d'une fraction volumique égale à 0.3.

L'amélioration de k fait du nanofluide un candidat pour remplacer fluide conventionnel dans certains échangeurs et récepteurs solaires. Une grande partie des travaux traitant des nanofluides porte sur la quantification de l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides. L'objectif de ces travaux étant de mesurer cette conductivité thermique et de choisir les nanoparticules et le fluide porteur les plus appropriés pour obtenir des rapports conductivité thermique du nanofluide sur celle du fluide porteur la plus élevée possible. Les travaux ont également porté sur la façon de prédire cette augmentation de conductivité thermique en fonction de celle des nanoparticules et du fluide porteur ainsi que de celle de la taille et la forme de ces nanoparticules en proposant différentes relations donnant ce rapport des conductivités thermiques nanofluide sur celle du fluide.

- La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène. La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on a retrouvé suivant les auteurs la relation qu'on a appliquée pour tracer la courbe sur la figure(III.3).

La troisième figure (III.3), montre une diminution de la chaleur spécifique, mais de manière plus rapide en proportion avec les nanoparticules du cuivre.

- Concernant la viscosité des nanofluides, la majorité des études qui ont traité de la viscosité des nanofluides ont eu recours, pour son calcul à partir de la viscosité du fluide de base et de la fraction volumique ϕ , aux relations de Stokes-Einstein ou de

Brinkman. Ces relations ont été établies dans un cadre précis à savoir particules métalliques de forme sphérique, en faible concentration, parfaitement dispersées et sans interaction inter-particules. Or les nanoparticules utilisées dans les différentes expérimentations ne sont ni sphériques ni de même taille, en particulier lorsqu'il s'agit de nanofluides avec des nanotubes de carbone. L'ajout de particules solides dans un liquide provoque une augmentation, plus ou moins importante, de la viscosité du mélange obtenu. Pour des nanoparticules identiques (nature, taille) et un même fluide de base, la qualité de la dispersion, et la température peuvent influencer considérablement sur la viscosité. Bien qu'un comportement Newtonien soit constaté pour des fluides contenant de faibles concentrations de nanoparticules, les suspensions à base de nanotubes de carbone obéissent à une loi de comportement différente. La dispersion de nanoparticules dans un fluide de base modifie notablement sa viscosité, il s'ensuit alors une modification de la structure des écoulements convectifs qui dépend fortement de la viscosité. Pour les suspensions constituées de nanoparticules sphériques, on dispose de différents modèles et de formules semi-empiriques variées décrivant l'évolution de la viscosité relative en fonction de la fraction volumique.

Par conséquent, L'agglomération des particules ne nous permet pas d'étudier de manière rigoureuse l'influence de la taille de ces dernières sur l'augmentation de conductivité thermique du fluide. Un meilleur contrôle des propriétés physico chimiques de ces fluides serait nécessaire pour pouvoir les étudier de façon précise et ainsi comprendre leur comportement. Les résultats obtenus sur les nanofluides à base de nanosphères du Cuivre montrent des augmentations de conductivité thermique en fonction de la concentration volumique beaucoup plus importantes que celles obtenues avec des nanoparticules oxyde-métalliques (l'Alumine).

III.3. L'effet de la géométrie

La principale raison qui nous encourage à utiliser des nanofluides (au lieu des fluides de base) consiste en leurs propriétés thermophysiques améliorées. L'efficacité thermique et le transfert de chaleur par convection sont deux facteurs principaux qui doivent être investigués et améliorés pour établir de meilleures performances dans le PTC. De plus, les nanofluides sont caractérisés par d'importante conductivité thermique, densité et viscosité tandis que la capacité thermique spécifique est inférieure comparée à celle du fluide de base. Il convient de noter qu'une viscosité plus élevée est en fait un inconvénient dans l'application de nanofluides

car elle augmente le facteur de frottement et provoque par la suite une chute de pression le long du tube récepteur ou absorbeur du PTC qui augmente enfin la demande de pompage des nanofluides en PTC.

L'amélioration thermique des PTC a récemment fait l'objet d'un intérêt particulier. Elle peut être faite par de nombreuses méthodes: soit par *modification géométrique* et/ou *application de nanofluides au lieu de fluides de base communs* ou *l'application des deux derniers facteurs pour améliorer d'avantage le rendement thermique* en PTC.

On suppose dans cette étude que le flux de chaleur pariétal, le flux solaire est uniforme axialement dans une portion circonférentielle égale à 0.27 de la surface totale de l'absorbeur solaire car le flux solaire possède une distribution très sensible à la position angulaire. En outre, Le modèle monophasique, fréquemment utilisé pour les nanofluides, est également mis en œuvre. Après avoir introduit les hypothèses, les conditions de fonctionnement et les conditions aux limites, on a lancé les calculs numériques sous fluent à une double précision inférieure à 10^{-6} .

Les résultats obtenus sont issus d'une étude paramétrique régissant principalement les distributions de la température et du taux d'augmentation de cette dernière par rapport à la température d'entrée du fluide caloporteur (27°C) en fonction des fractions volumiques de l'Alumine et du nombre de Reynolds pour un débit massique constant.

Les figures III.4, et III.5 représentent l'évolution de la température en fonction de la position axiale à une fraction volumique constante égale à 5% pour les différents tubes (le tube de 28mm de diamètre et l'autre de 35mm de diamètre et ayant la même longueur de 3m).

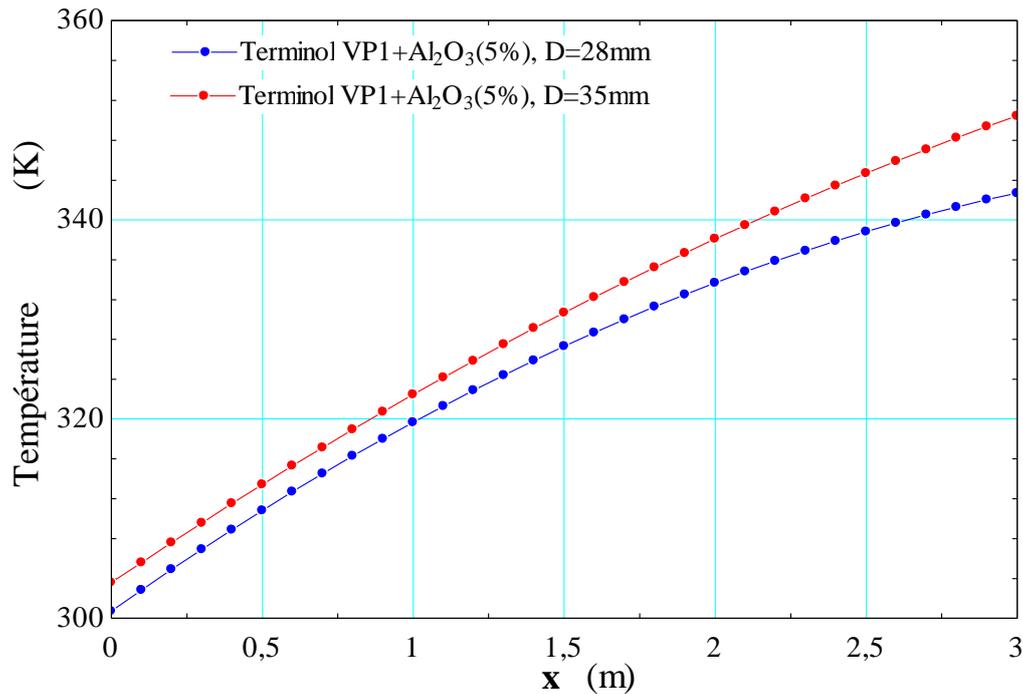


Figure III.4 : Variation de la température du nanofluide Al_2O_3 à 5% dans les deux tubes (diamètre égal à 28 et égal à 35 mm) en fonction de la position axiale.

La figure ci-dessus présente l'évolution axiale de la température du nanofluide circulant dans les tubes absorbeurs dont les diamètres sont de 28 et 35 mm respectivement, en fonction de deux nanofluides : l' Al_2O_3 et le Cu pour un débit massique constant et égal à 0.03942 kg/s et une fraction volumique de 5%. La figure (III.4) démontre que la température au sein du nanofluide est proportionnelle au diamètre de l'absorbeur solaire considéré car de plus en plus le diamètre augmente, le transfert de chaleur s'intensifie d'avantage. Cela confirme que l'adjonction de nanoparticules à une surface d'échange plus importante améliore le transfert thermique.

La figure (III.5) résume le taux d'amélioration du transfert thermique en fonction des diamètres considérés dans cette partie d'étude en utilisant le Cu comme nanofluide à une fraction de 5% par rapport la température de référence qui de 27°C.

Dans les deux figures (III.4) et (III.5) avec les deux nanoparticules (l'Alumine et le Cuivre) avec la même fraction volumique 5%, le tube caractérisé par la plus grande surface d'échange (de diamètre 35 mm) offre la meilleure augmentation de température en le comparant avec le tube de diamètre 28 mm.

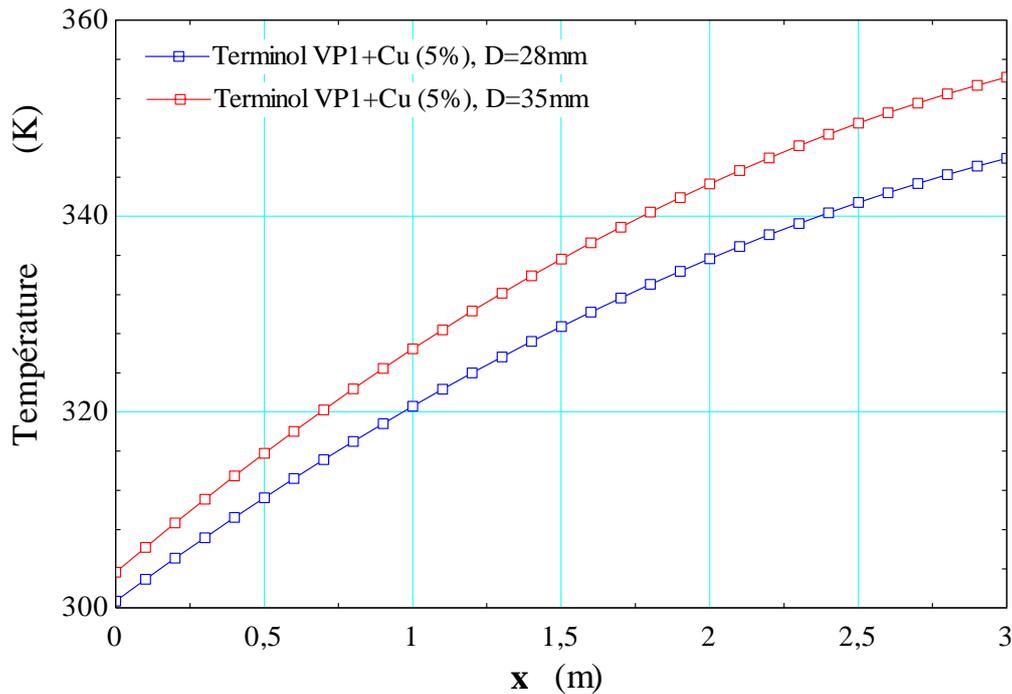


Figure III.5 : Variation de la température du nanofluide Cu à 5% dans les deux tubes (diamètre égal à 28 et égal à 35 mm) en fonction de la position axiale.

III.4. Effet du Nanofluide ou nanoparticules

En ce qui concerne les applications dans le domaine du transfert de chaleur, des études menées depuis une dizaine d'années ont montré que dans certaines conditions, l'ajout de particules nanométriques dans un fluide (appelé alors nanofluide) comme par exemple des particules d'Oxyde d'Aluminium (Al_2O_3), le cuivre (Cu) dans le Terminol VP-1 pouvaient augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas du corps pur (l'huile synthétique), en modifiant de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur.

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide de base, souvent appelées nanofluides, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels et des qualités indéniables d'amélioration du transfert thermique. La conductivité thermique des nanofluides peut être significativement plus élevée que celle des liquides purs.

Les figures (III.6), (III.7) représentent l'évolution de la température en fonction de la position axiale pour les différents nanofluides considérés (l'Alumine et le Cuivre) à des fractions volumiques 5 et 10%.

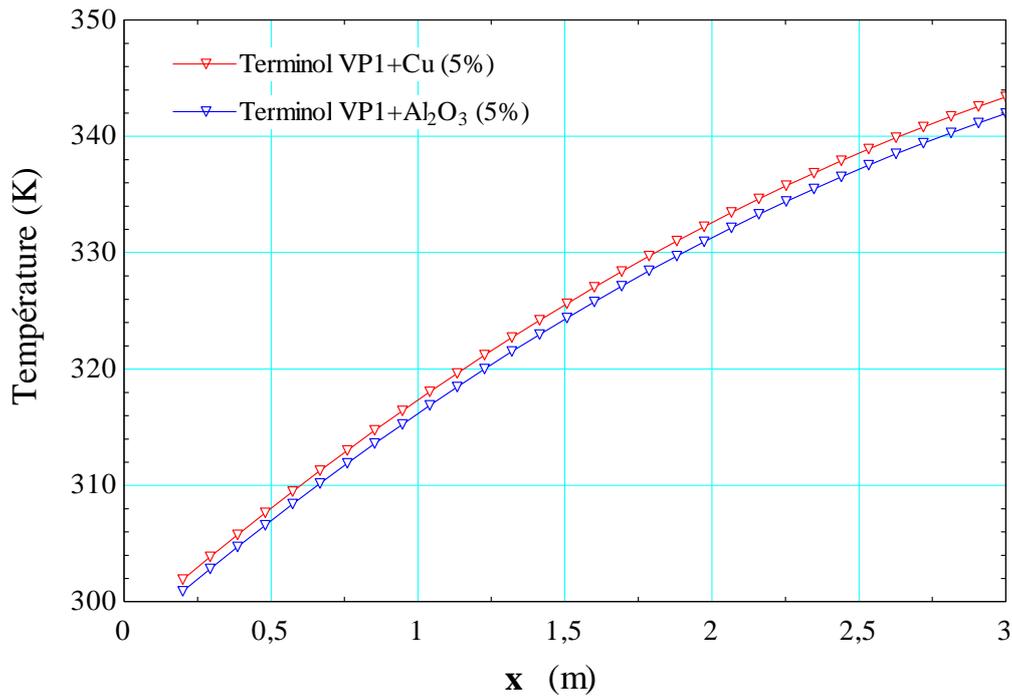


Figure III.6 : Evolution axiale de la température pour différents nanofluides (l'alumine et cuivre) à une concentration des nanoparticules égale à 5%.

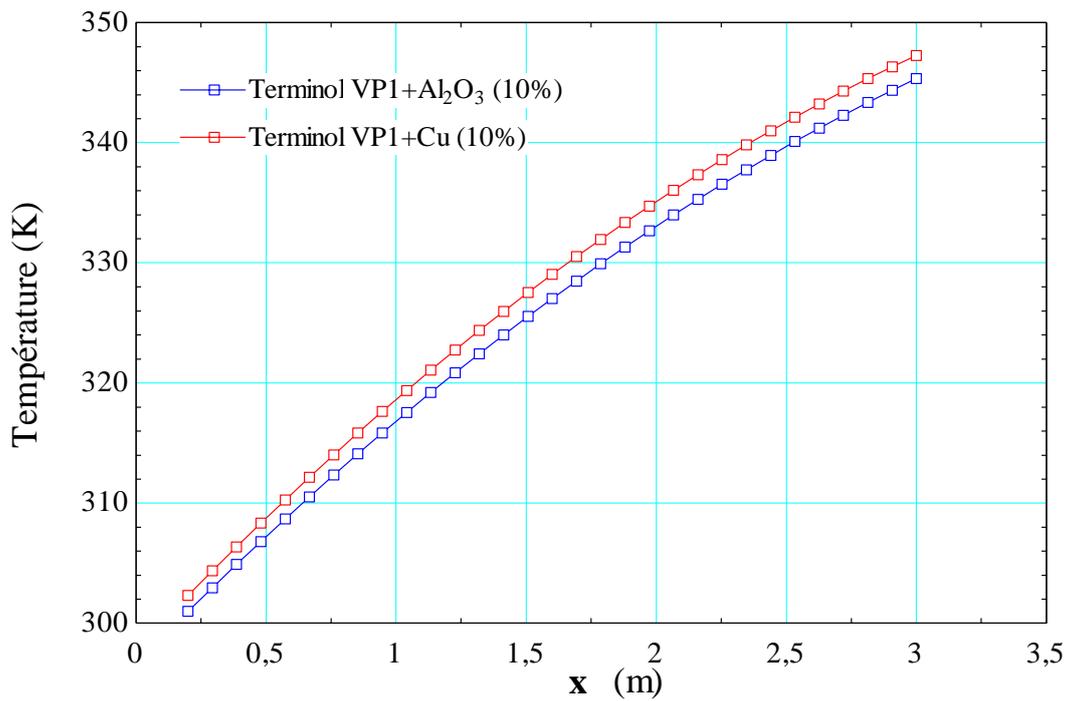


Figure III.7 : Evolution axiale de la température pour différents nanofluides (l'alumine et cuivre) à une concentration des nanoparticules égale à 10%.

Dans les deux fractions volumiques étudiées, les nanoparticules du cuivre augmentent d'avantage la température du fluide caloporteur en les comparant avec les nanoparticules de l'alumine, et c'est ce que démontrent les figures (III.6) et (III.7), quelle que soit de la fraction volumique utilisée (5% dans la figure III.6 et 10% dans la figure III.7).

III.5. Effet de la fraction volumique

Les figures (III.8), (III.9), (III.10), (III.11), (III.12), (III.13), (III.14), et (III.15) représentent l'évolution de la température et le taux d'amélioration du transfert de chaleur en fonction la position axiale pour les différents nanofluides utilisés et à des fractions volumiques égales à (0, 5, et 10%) dans les deux absorbeurs considérés dans cette étude.

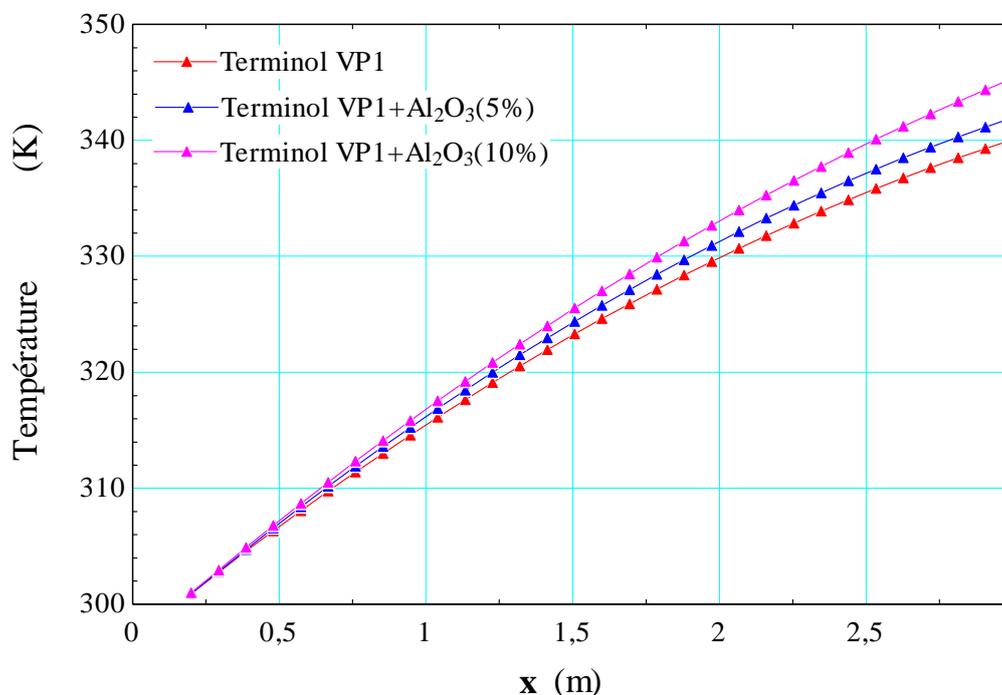


Figure III.8 : Evolution axiale de la température pour les différentes concentrations des nanoparticules (l'alumine) dans le tube de diamètre 28 mm.

La température du nanofluide Al₂O₃ ou Cu est plus grande que celle du Terminol VP-1, elle augmente avec l'augmentation de la concentration volumique de nanoparticules et du diamètre du tube, où le taux d'amélioration du transfert atteint son maximum pour le nanofluide Cu et une fraction volumique de 10% où le transfert thermique est plus intense.

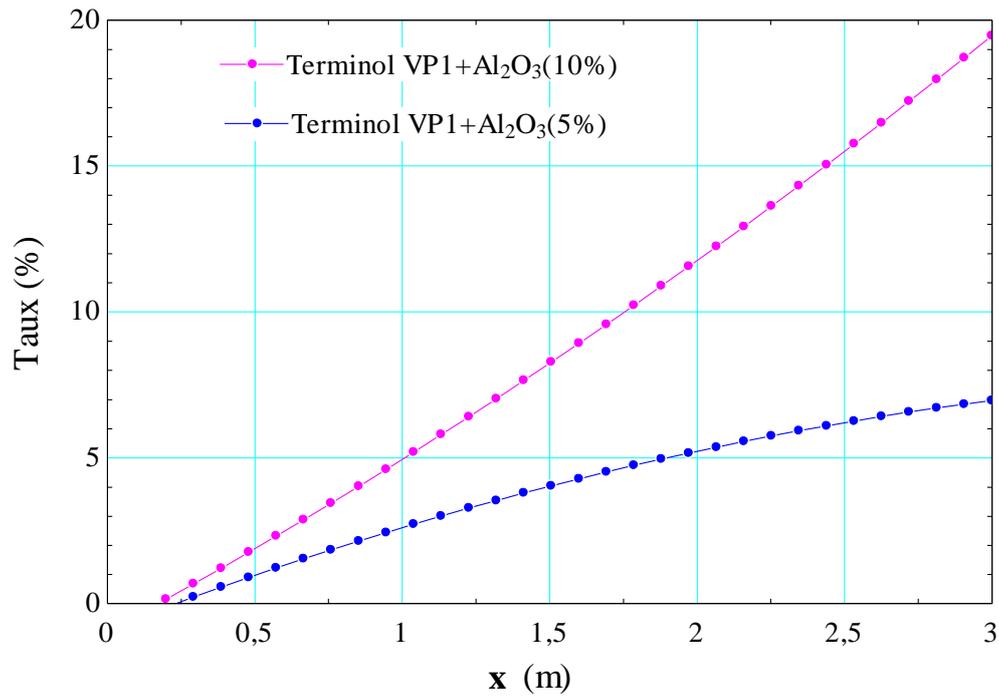


Figure III.9 : Evolution axiale de taux d'amélioration du transfert de chaleur pour les différentes concentrations des nanoparticules (l'alumine) dans le tube de diamètre 28 mm.

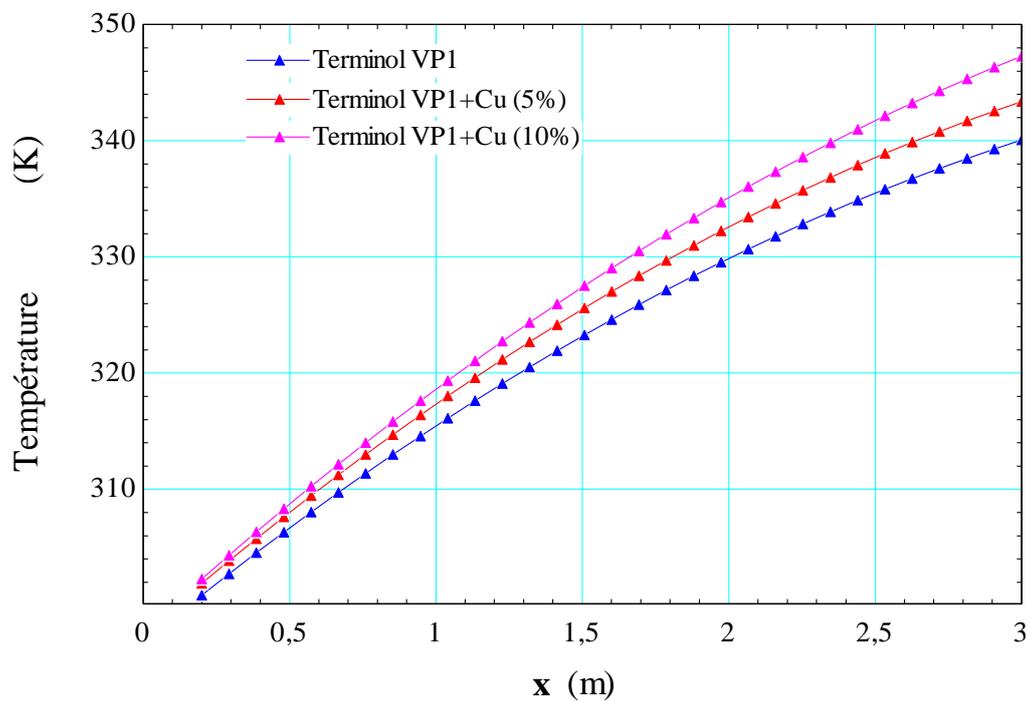


Figure III.10 : Evolution axiale de la température pour les différentes concentrations des nanoparticules (le cuivre) dans le tube de diamètre 28 mm.

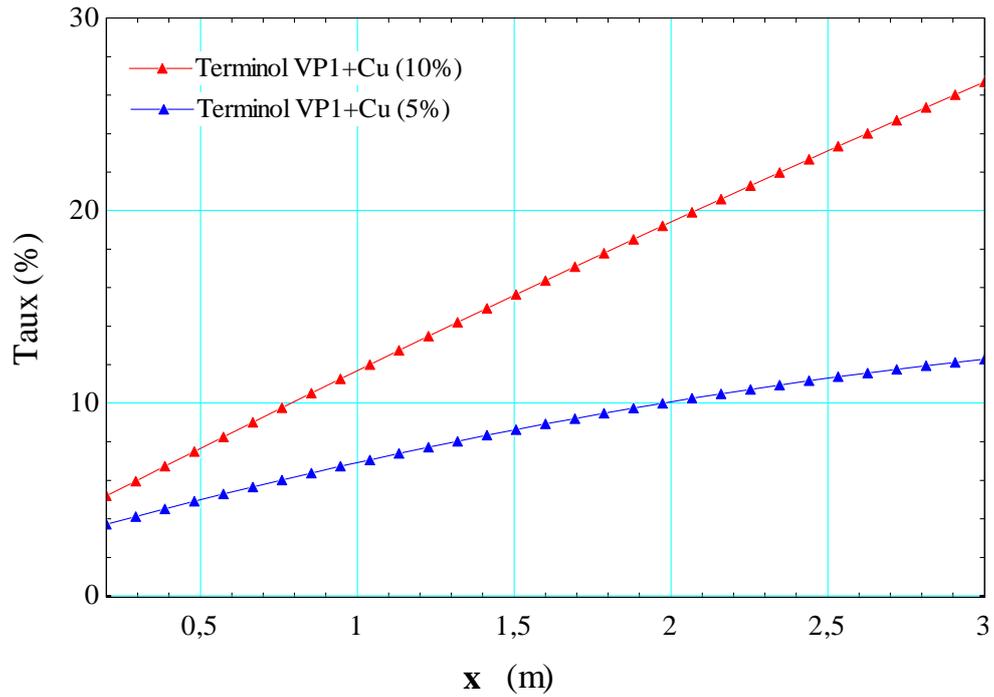


Figure III.11 : Evolution axiale de taux d'amélioration du transfert de chaleur pour les différentes concentrations des nanoparticules (le cuivre) dans le tube de diamètre 28 mm.

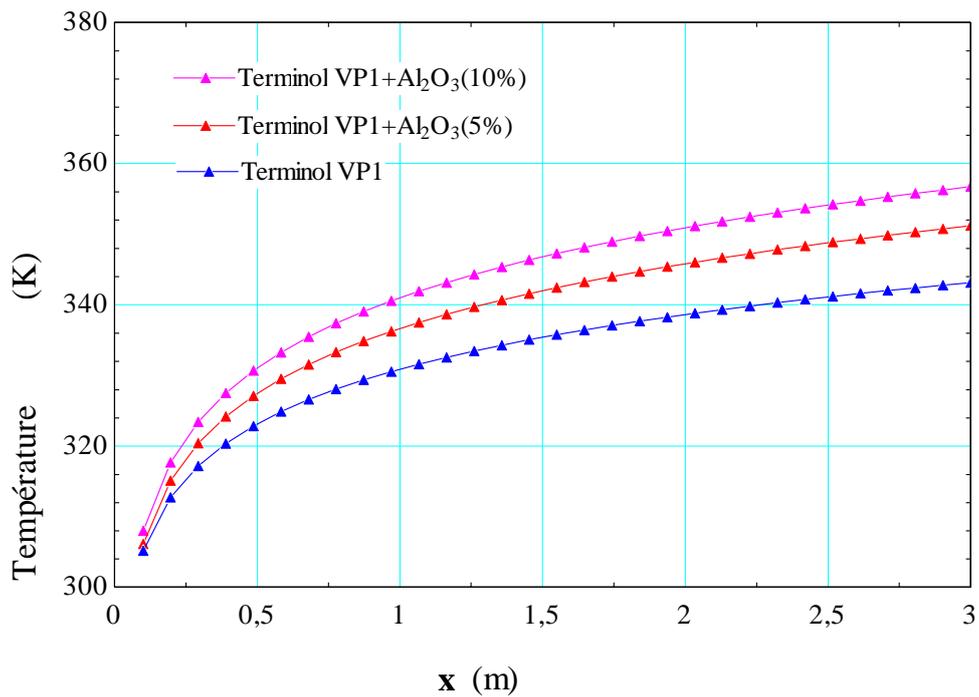


Figure III.12 : Evolution axiale de la température pour les différentes concentrations des nanoparticules (l'alumine) dans le tube de diamètre 35 mm.

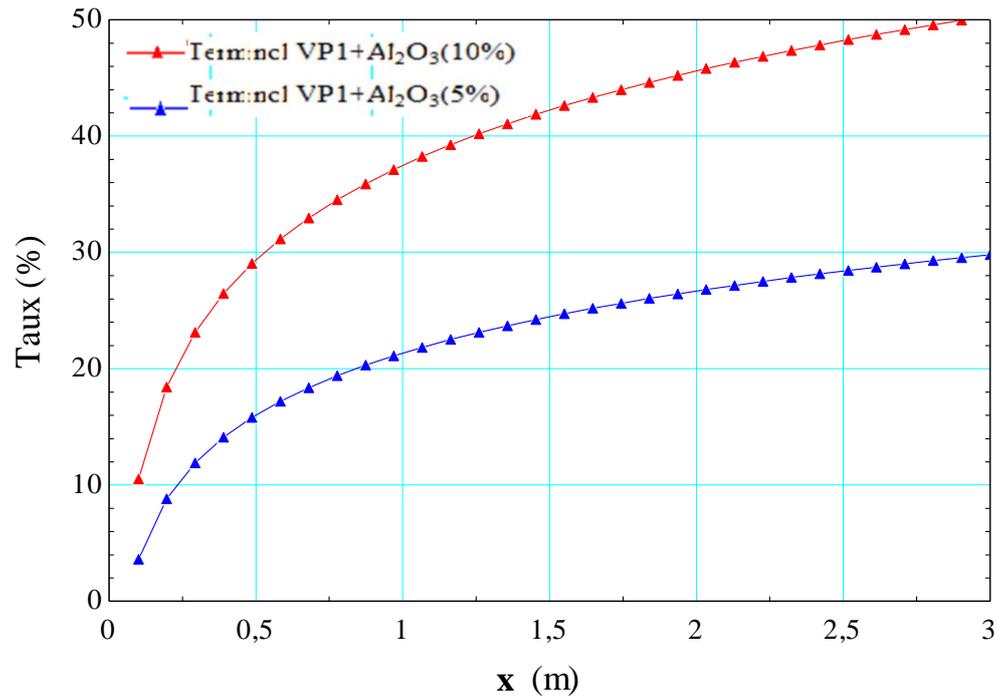


Figure III.13 : Evolution axiale de taux d'amélioration du transfert de chaleur pour les différentes concentrations des nanoparticules (l'alumine) dans le tube de diamètre 35mm.

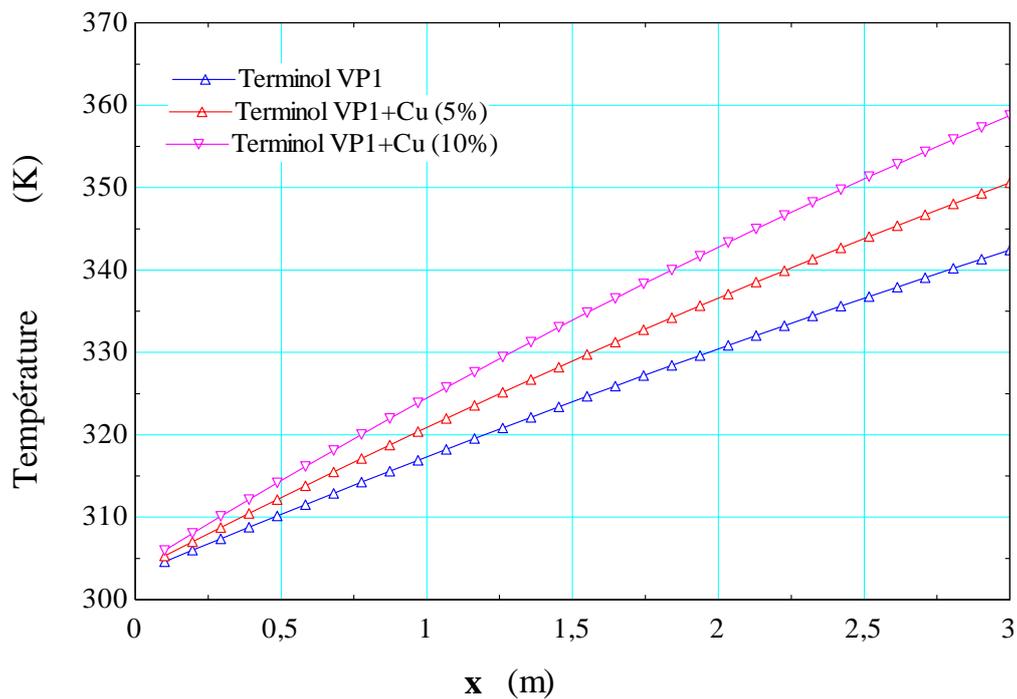


Figure III.14 : Evolution axiale de la température pour les différentes concentrations des nanoparticules (le cuivre) dans le tube de diamètre 35 mm.

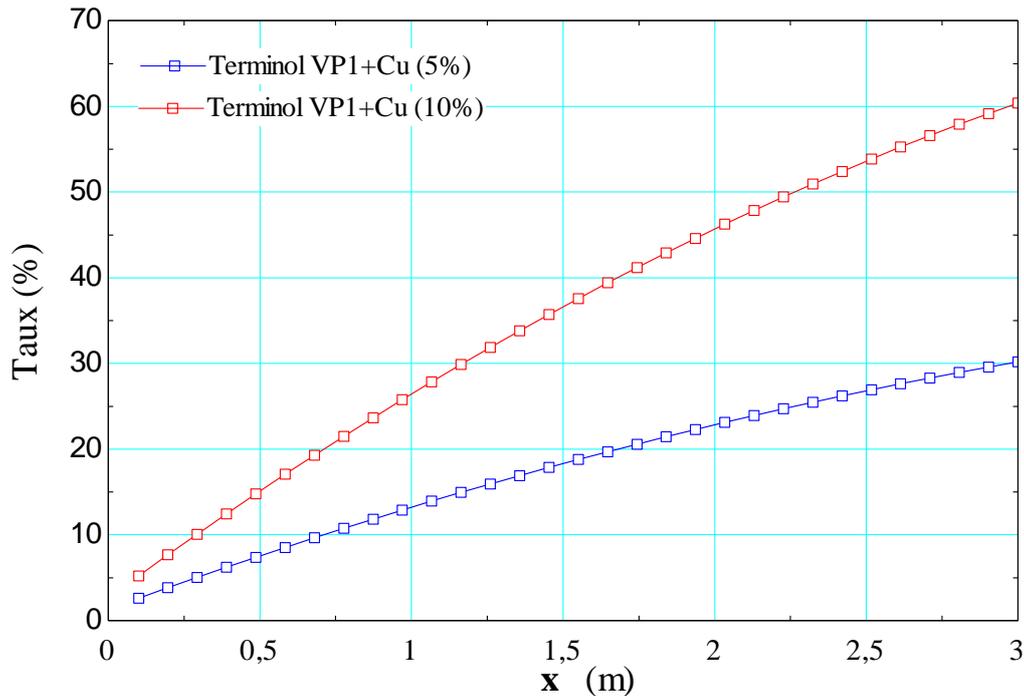


Figure III.15 : Evolution axiale de taux d'amélioration du transfert de chaleur pour les différentes concentrations des nanoparticules (le cuivre) dans le tube de diamètre 35 mm.

D'après les figures ci-dessus, les nanoparticules métalliques ont des conductivités thermiques plus grandes que celles des oxydes métalliques correspondants même avec des fractions volumiques en nanoparticules métalliques beaucoup plus faibles. La conductivité thermique du cuivre à la température ambiante est environ 3000 fois plus grande que celui d'huile synthétique VP-1. Il est clairement démontré d'après les figures tracées que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique. Le rapport de la conductivité thermique du nanofluide (Terminol VP-1+Cu) sur le fluide de base augmente environ de 45%, quand la fraction volumique des nanoparticules varie entre 5% à 10%.

Par conséquent, si on change le diamètre de l'absorbeur tubulaire solaire, les nanoparticules, leur fraction volumique, et on calcule la température, ou taux d'amélioration du transfert de chaleur, toujours les nanofluides avec la plus grande proportion de nanoparticules métalliques (c'est-à-dire la plus grande fraction volumique en Cu) et la plus grande surface d'échange de chaleur ($D=35\text{mm}$) sont les meilleurs fluides caloporteurs et cela apparaît clairement sur les différentes figures tracées précédemment (III.8, III.9, III.10, III.11, III.12, III.13, III.14, et III.15).

III.6. Conclusion

Dans cette partie, nous avons étudié l'écoulement laminaire de différents nanofluides à l'intérieur d'un absorbeur tubulaire destiné au système solaire cylindro-parabolique. En examinant les résultats obtenus dans cette étude, nous pouvons affirmer, que la présence des nanoparticules dans le fluide de base (terminoIVP-1) fait augmenter notablement la température le long du récepteur solaire (augmentation du transfert thermique) qui s'accroît aussi avec l'augmentation de la fraction volumique.

La valeur maximale de la température est toujours atteinte, pour la fraction volumique la plus élevée (10%).

Concernant la comparaison de différentes nanoparticules, nous pouvons dire que les meilleurs résultats ont été obtenus avec les nanoparticules métalliques (le cuivre). En effet, dans les figures précédentes, le cuivre présente le meilleur taux d'amélioration du transfert de chaleur avec augmentation remarquable de la température.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à la simulation numérique des transferts de chaleur par convection forcée pour de différents nanofluides en écoulement laminaire et stationnaire dans les absorbeurs tubulaires solaires des concentrateurs cylindro-paraboliques.

D'après la recherche bibliographique, l'utilisation des nanofluides en simulation du transfert de chaleur dans les concentrateurs cylindro-paraboliques est peu fréquente. De même que des études sur l'écoulement laminaire des nanofluides sont rares.

Avant d'exposer les différents cas de figures considérés dans ce travail, dans le deuxième chapitre nous avons, créé les géométries avec leur maillage et les conditions aux limites dans le logiciel Gambit. Pour lancer les calculs dans le fluent, nous avons calculé les propriétés thermophysiques des nanofluides à l'aide des lois de mélange qui sont des corrélations issues de l'expérimentation.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié l'écoulement laminaire des nanofluides de fluide de base Terminol VP-1 et les nanoparticules l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 et le cuivre Cu en écoulement à l'intérieur d'un absorbeur de concentrateur cylindro-parabolique à une température d'entrée connue ($T_e=27^\circ C$). Les résultats de la simulation numérique, nous ont permis de proférer plusieurs constatations sur les effets de la présence des nanoparticules dans le fluide de base. Nous résumons dans ce qui suit les principaux résultats obtenus :

- Les propriétés thermophysiques des nanofluides qui contiennent des nanoparticules métalliques « le cuivre » sont plus intéressants que les nanofluides contenant les nanoparticules oxyde-métalliques telles que l'oxyde d'aluminium avec l'élévation de fraction volumique.
- Plus le diamètre de tube absorbeur est grand, plus le transfert de chaleur est important, compte tenu des conditions réelles de l'environnement.
- Les nanofluides contenant du cuivre sont meilleurs que les nanofluides contenant de l'oxyde d'aluminium en tant que fluide de transfert la chaleur ou fluide caloporteur.
- Plus la fraction volumique est élevée, plus le transfert de chaleur est élevé.

- Le meilleur fluide de transfert de chaleur est le nanofluide qui contient les nanoparticules métalliques avec la fraction volumique la plus élevée (dans notre étude c'est le cuivre à 10%).

ANNEXE A :

Les effets influent sur la conductivité thermique

Les tableaux suivants présentent un résumé des résultats obtenu par des différents groupes de recherche où ils ont analysé la variation des principales variables pour les différents essais effectués pour déterminer le taux de l'amélioration de la conductivité thermique. Ces analyses ont été obtenues pour des oxydes métalliques, des métaux et carbone silicone.

1. Les oxydes métalliques

Tableau 1 : Effet de la taille des particules sur la conductivité thermique

Auteur (Année)	Nanofluide	La concentration	La taille	L'amélioration
Lee et col (1999)	Al ₂ O ₃ / Eau	1,00-4.30	38.4	1.03-1.10
	CuO/ Eau	1.00-3.41	23.6	1.03-1.12
	Al ₂ O ₃ / EG	1.00-5.00	38.4	1.03-1.18
	CuO/ EG	1.00-4.00	23.6	1.05-1.23
Wang et col (1999)	Al ₂ O ₃ / Eau	3.00-5.50	28	1.11-1.16
	CuO/ Eau	4.50-9.70	23	1.17-1.34
	Al ₂ O ₃ / EG	5.00-8.00	28	1.25-1.41
	CuO/ EG	6.2-14.80	23	1.24-1.54
	Al ₂ O ₃ / H M	2.25-7.40	28	1.05-1.30
Xie et col (2002b)	Al ₂ O ₃ / Eau	1.80-5.00	60.4	1.07-1.21
	Al ₂ O ₃ /EG	1,80-5.00	15	1.06-1.17
	Al ₂ O ₃ /EG	1,80-5.00	26	1.06-1.18
	Al ₂ O ₃ /EG	1,80-5.00	60.4	1.08-1.30
	Al ₂ O ₃ /EG	1,80-5.00	302	1.39-1.25
Xie et col (2002c)	Al ₂ O ₃ / Eau	5.00	60.4	1.23

	Al ₂ O ₃ /EG	5.00	60,4	1.29
Wen et Ding (2004)	Al ₂ O ₃ / Eau	0.19–1.59	42	1.01–1.10
Murshed et col (2005)	TiO ₂ / Eau	0.50–5.00	15	1.05–1.30
	TiO ₂ / Eau	0.50–5.00	10 × 40	1.08–1.33
Wen et Ding (2005)	Al ₂ O ₃ / Eau	0.31–0.72		1.02–1.06
Hwang et col (2006)	CuO/ Eau	1.00		1.05
	SiO ₂ / Eau	1.00		1.03
	CuO/ EG	1.00		1.09
Kang et col (2006)	SiO ₂ / Eau	1.00–4.00	15–20	1.02–1.05
Lee et col (2006)	CuO/ Eau(pH=3)	0.03–0.30	25	1.04–1.12
	CuO/ Eau(pH=6)	0.03–0.30	25	1.02–1.07
Wen et Ding (2006)	TiO ₂ /Eau(pH=3)	0.29–0.68	34	1.02–1.06

Tableau 2 : Effet de la température et de la taille des particules sur la conductivité thermique

Auteur (Année)	Nanofluide	La concentration	La taille	L'amélioration
Masuda et col (1993)	Al ₂ O ₃ /Eau(31.85°C)	1,30-4.30	13	1.109-1.324
	Al ₂ O ₃ /Eau(46.85°C)	1.30-4.30	13	1.100-1.296
	Al ₂ O ₃ /Eau(66.85°C)	1.30-4.30	13	1.092-1.262
	SiO ₂ / Eau (31.85°C)	1.10-2.30	12	1.010-1.011
	SiO ₂ / Eau (46.85°C)	1.10-2.30	12	1.009-1.010
	SiO ₂ /Eau(66.85°C)	1.10-2.40	12	1.005-1.007
	TiO ₂ / Eau (31.85°C)	3.25-4.30	27	1.080-1.105
	TiO ₂ / Eau (46.85°C)	3.25-4.30	27	1.084-1.080
	TiO ₂ / Eau (86.85°C)	3.10-4.30	27	1.075-1.099
Das et col (2003)	Al ₂ O ₃ / Eau (21°C)	1.00–4.00	38.4	1.02–1.09

	Al ₂ O ₃ / Eau (36°C)	1.00–4.00	38.4	1.07–1.16
	Al ₂ O ₃ / Eau (51°C)	1.00–4.00	38.4	1.10–1.24
	CuO/ Eau (21°C)	1.00–4.00	28.6	1.07–1.14
	CuO/ Eau (36°C)	1.00–4.00	28.6	1.22–1.26
	CuO/ Eau (51°C)	1.00–4.00	28.6	1.29–1.36
Li et Peterson (2006)	Al ₂ O ₃ / Eau (27.5°C)	2.00–10.00	36	1.08–1.11
	Al ₂ O ₃ / Eau (32.5°C)	2.00–10.00	36	1.15–1.22
	Al ₂ O ₃ / Eau (34.7°C)	2.00–10.00	36	1.18–1.29
	CuO/ Eau (28.9°C)	2.00–6.00	29	1.35–1.36
	CuO/ Eau (31.3°C)	2.00–6.00	29	1.35–1.50
	CuO/ Eau (33.4°C)	2.00–6.00	29	1.38–1.51

2. Les métaux et carbone silicone

Tableau 3 : Effet de la température et de la taille des particules sur la conductivité thermique.

Auteur (Année)	Nanofluide	La concentration	La taille	L'amélioration
Patel et Col (2003)	Ag/ Eau (30°C)	0.001	60–70	1.030
	Ag/ Eau (60°C)	0.001	60–70	1.04
	Au/ Eau (30°C)	0.00013	10–20	1.03
	Au/ Eau (60°C)	0.00013	10–20	1.05
	Au/ Eau (30°C)	0.00026	10–20	1.05
	Au/ Eau (60°C)	0.00026	10–20	1.08
Wen and Ding (2004)	MWCNT/eau(20°C)	0.04–0.84	20–60 (D)	1.04–1.24
	MWCNT/eau(45°C)	0.04–0.84	20–60 (D)	1.05–1.31

Ding et Col (2006)	MWCNT/eau(20°C)	0.05–0.49		1.00–1.10
	MWCNT/eau(25°C)	0.05–0.49		1.07–1.27
	MWCNT/eau(30°C)	0.05–0.49		1.18–1.79

Tableau 4 : Effet de la taille des particules sur la conductivité thermique.

Auteur (Année)	Nanofluide	La concentration	Taille de la particule	L'amélioration
Xuan et Li(2000)	Cu / Eau	2.50-7.50	100	1.22 -1.75
Eastman et Col (2001)	Cu/EG	0.10-0.56	<10	1.016-1.100
	Cu /EG	0.11-0.56	<10	1.031-1.140
	Cu /EG	0.01-0.28	<10	1.002-1.140
Xie, et Col (2002a)	SiC/ Eau	0.78-4.18	26	1.03 -1.17
	SiC/ Eau	1.00-4.00	600	1.06 -1.24
	SiC/EG	0.89-3.50	26	1.04 -1.13
	SiC/EG	1.00-4.00	600	1.06 -1.23
Xie et Col (2003)	MWCNT/ eau	0.40–1.00	15 nm×30µm	1.03–1.07
	MWCNT/ EG	0.23–1.00	15 nm×30µm	1.02–1.13
Assael et Col(2004)	MWCNT/eau	0.60	100 nm×50µm	1.07–1.38
Assael et Col (2005)	DWCNT/eau	0.75	5 (D)	1.03
	DWCNT/eau	1.00	5 (D)	1.08
	MWCNT/eau	0.60	130 nm×10µm	1.34
	MWCNT/eau	0.60	130 nm×10µm	1.28
Hong et Col(2005)	Fe/EG	0.20–0.55	10	1.13–1.18
Liu et Col (2005)	MWCNT/EG	0.20–1.00	20–50 (D)	1.02–1.12
	MWCNT/H M	1.00–2.00	20–50 (D)	1.09–1.30

Hong et Col (2006)	Fe/ EG	0.10–0.55	10	1.05–1.18
Hwang et Col (2006)	MWCNT/ Eau	1.00		1.07
	MWCNT/ H Min	0.50		1.09
Kang et Col (2006)	Ag/ Eau	0.10–0.39	8–15	1.03–1.11
	Diamant/EG	0.13–1.33	30–50	1.03–1.75
Liu et Col (2006)	Cu/ Eau	0.05		1.04
	Cu/ Eau	0.10	50–100	1.24
	Cu/ Eau	0.10	75–100	1.24
	Cu/ Eau	0.05	100–200	1.12
	Cu/ Eau	0.10	100–300	1.11
	Cu/ Eau	0.05	130–200	1.09
	Cu/ Eau	0.20	130–300	1.10
	Cu/ Eau	0.20	250	1.04
	Cu/ Eau	0.20	200 × 500	1.13

EG : éthylène glycol, H M : l'huile de moteur, H Min : l'huile minérale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Choi S.U.S, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, FED-vol 231/MD-vol 66(1995), pp: 99–105.
- [2] Choi S.U.S, Z.G Zhang, W Yu, F.E Lockwood, E.A Grulke (2001), Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions, *Applied Physics Letters* 79 2252–2254.
- [3] Das S.K, N Putta, P Thiesen, W Roetzel (2003), Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *ASME Trans. J. Heat Transfer* 125 567–574.
- [4] Xuan Y, Q Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Transfer* 21(2000) 58–64.
- [5] Xuan Y, Q Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat Transfer* (2003)125 151–155.
- [6] Dittus ,F.W. ,and Boelter ,L.M.K. ,Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type, *University of California Publications in Engineering*, vol.2,pp.443–461,1930.
- [7] LeeS and S.U.S Choi, Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling systems, in (1996): *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, Atlanta, USA.
- [8] ChienH.T, C.I Tsai, P.H Chen, P.Y Chen, Improvement on thermal performance of a diskshaped miniature heat pipe with nanofluid, in: *ICEPT (2003), Fifth International Conference on Electronic Packaging Technology, Proceedings (IEEE Cat. No.03EX750)*, IEEE, Shanghai,China, p. 389.
- [9] Tsai C.Y, H.T Chien, P.P Ding, B Chan, T.Y Luh, P.H Chen, Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, *Material Letters* 58(2004) 1461–1465.
- [10] Wen D, Y. Ding, Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids), *Journal of Thermo-physics and Heat Transfer* 18 (4) (2004) 481–485.
- [11] Ding Y, H Alias, D Wen, R.A Williams (2005), Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes , *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 240–250.
- [12] Assael M.J, C.F Chen, I.N Metaxa,W.A Wakeham, Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, in: *15th Symposium on Thermophysical Properties*, National Institute of Standards(2003), University of Colorado, Boulder, USA.
- [13] Xie H, H. Lee, W. Youn, M. Choi (2003), Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities, *Journal of Applied Physics* 94 (8) 4967–4971.

- [14] Wen D, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47(24) (2004) 5181.
- [15] Hwang Y.J, Y.C. Ahn, H.S. Shin, C.G. Lee, G.T. Kim, H.S. Park, J.K. Lee, Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids, *Current Appl. Phys.* 6 (2006) 1068–1071.
- [16] Murshed S.M.S, K.C. Leong, C. Yang, enhanced thermal conductivity of TiO₂–water based nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 44 (4) (2005) 367–373.
- [17] Wen D, Y. Ding, Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26 (6) (2005) 855–864.
- [18] Vajjha R.S, D.K. Das, Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. I. *J. of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 4675–4682.
- [19] Hamilton R.L, and O.K. Crasser, Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 1(1962): 187-191.
- [20] Koo J and C. Kleinstreuer, A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research* 6(2004): 577-588.
- [21] Yurong He, Y. Men, Y. Zhao, H. Lu, Y. Ding, Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1965-1972.
- [22] Jian Qu, H.y. Wu, P. Cheng, Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al₂O₃-water nanofluids, *I Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 111-115.
- [23] Lee S, Choi S.U.S, S. Li, J.A. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *Journal of Heat Transfer* 121(1999) 280–289.
- [24] Wang X.Q, X. Xu, S.U.S. Choi, (1999), Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13 (4) 474 – 480.
- [25] Masuda H, A. Ebata, K. Teramae and N. Hishinuma, Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of -Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles), *Netsu Bussei (Japan)* 4(1993) 227-233.
- [26] Xie H, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu (2002), Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, *Journal of Applied Physics* 91 4568–4572.
- [27] Li C.H and G.P. Peterson, Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids), *Journal of Applied Physics* 99 (8) (2006) 084314.

- [28] Putra N, W Roetzel and S.K Das, Natural Convection of Nano-Fluids. *Heat and Mass Transfer* 39(2003):775-784.
- [29] Heris S.Z, S.Gh Etemad and M.N Esfahany, Experimental Investigation of Oxide Nanofluids Laminar Flow Convective Heat Transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33(2006): 529-535.
- [30] Das S. K, N Putra, and W Roetzel, Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46(2003.b): 851-862.
- [31] Li J.M, Z.L Li, B.X Wang, Experimental viscosity measurements for copper oxide nanoparticle suspensions, *Tsinghua Sci. Tech.* 7 (2) (2002)198–201.
- [32] Murshed S.M.S, K.C Leong, C Yang, Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2008) 560–568.
- [33] Jordan A, R Scholz, P Wust, H FaMng and R Felix, Magnetic Fluid Hypothermia (MFH): Cancer Treatment with AC Magnetic Field Induced Excitation of Biocompatible Superparamagnetic Nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 201(1999):413-419.
- [34] Maïga S.E.B, C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy (2004), Hydrodynamic and thermal behaviours of a nanofluid in a uniformly heated tube, in: *Computational Studies*, vol. 5, WIT Press, Southampton, SO40 7AA, United Kingdom, Lisbon, Portugal, pp. 453–462.
- [35] Roy G, C.T Nguyen, P.R Lajoie, Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids, *Superlattices and Microstructures* 35(2004) 497–511.
- [36] Wang X.Q, A.S Mujumdar, C Yap, Free convection heat transfer in horizontal and vertical rectangular cavities filled with nanofluids, in: *International Heat Transfer Conference IHTC- 13(2006)*, Sydney, Australia.
- [37] Khanafer K, K Vafai, M Lightstone, Bouyancy-driven heat transfer enhancement in a twodimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 3639–3653.
- [38] Xuan Y, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2000) 433701–3707.
- [39] Roy G,S.J Palm, C.T Nguyen Heat Transfer and Fluid Flow of Nanofluids in Laminar Radial Flow Cooling Systems. *J. of Thermal Science* Vol.14 (2005), No.4
- [40] Maïga S.E.B, S.J Palm, C.T Nguyen. Heat Transfer Enhancement by Using Nanofluids in Forced Convection Flows, *I. Journal of Heat and Fluid Flow* (2005).
- [41] Wang X.Q and A.S Mujumdar, a review on nanofluids - part ii: experiments and applications. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* Vol. 25(2008), No. 04, pp. 631 - 648.

- [42] Tzeng S.C, C.W Lin and K.D Huang, Heat Transfer Enhancement of Nanofluids in Rotary Blade Coupling of Four-Wheel-Drive Vehicles. *Ac ta Mechanic a* 179(2005): 11-23.
- [43] Zhang Z and Q Que, Synthesis, Structure and Lubricating Properties of Dialkydithiophosphate-Modified Mo-S Compound Nanoclusters, *Wear* 209(1997): 8-12.
- [44] MaH.B, C Wilson, B Borgmeyer, K Park, Q Yu, S.U.S Choi , M Tirumala, Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe, *Applied Physics Letters* 88 (14) (2006) 143116.
- [45] You S.M, J.H Kim and K.H Kim, Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer. *Applied Physics Letters* 83(2003): pp. 3374-3376.
- [46] Vassallo P, R Kumar and S D'Amico, Pool Boiling Heat Transfer Experiments in Silica-Water Nano-Fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47(2004): 407-411.
- [47] Maïga S.E.B, C.T Nguyen, N. Galanis, and G. Roy, Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a Uniformly Heated Tube, *Superlattices and Microstructures* 35(2004): 543-557.
- [48] Guillaume ANIES. ‘‘Modélisation, simulation dynamique, validation expérimentale et optimisation énergétique d’une unité de rafraîchissement solaire par absorption’’. Thèse de doctorat de L’Université de Pau et des Pays de l’Adour. Novembre 2011.
- [49] Axel Augeard et al. ‘‘Concentrateurs solaires et production électrique’’. *Projet de Physique*. INSA Rouen. 2014
- [50] ZHENG ZhangJing et al. ‘‘Thermal analysis of a solar parabolic trough receiver tube with porous insert optimized by coupling genetic algorithm and CFD’’. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*. October 2016 Vol.59 No.10: 1475–1485
- [51] Patankar S.V., (1980), *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor and Francis Group. 26
- [52] Xuan Y.M., Roetzel W., Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43/19 (2000), 3701–3707.
- [53] A. Gama, M. Haddadi et A.Malek << etude et realisation d’un concentrateur cylindro-parabolyque avec poursuite solaire aveugle >> *Revue des energies renouvelables*, Vol. 11, N°3 (2008) 437 – 451.
- [54] S. E. B. Maiga, S. J. Palm, C. T. Nguyen, G. Roy, and N. Galanis, "Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 26, pp. 530-546, 2005.
- [55] R. L. Hamilton and O. K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two - component system. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3) :187 – 191, 1962.