

*RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE*

*MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE*

*LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*



*Centre Universitaire SALHI AHMAD de Naama*



*Département de Science et technologie*

*Spécialité : génie mécanique énergétique*

*Option : énergétique*

*Présenté par :*

*Mazouzi Abdallah*

*Chafi Mohamed*

*Amélioration de transfert thermique  
dans un échangeur de chaleur à  
l'aide des nano-fluides*

Soutenu le :07/07/2019

Devant le jury composé par :

Dr Taibi Bouziane

Président

C.U. Naama

Dr Taibi Brahim

Examineur

C.U. Naama

Dr Noureddine Bounoua

Encadreur

C.U. Naama

**Année Universitaire 2018/2019**



## *Remerciement*

*Nous remercions tout d'abord notre ALLAH pour nous avoir donné la force et le courage pour faire ce modeste travail.*

*Nos sincères remerciements s'adressent à notre encadreur Mr BOUNOUA NOUREDDINE pour ses directives et ses conseils durant la période de projet fin d'étude, ainsi que pour l'intérêt particulier qu'il a prodigé à notre mémoire, nous le remercions également pour la confiance qu'il nous a accordée et sans son soutien ce travail n'aurait pas été conclu.*

*Nous tenant à remercier Monsieur BENAMEUR BENAMAR pour ces conseils précieux durant ce travail et pour tout l'aide qu'il nous a apporté.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressant aussi aux Messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

*Nous adressons également nos remerciements les plus vifs aux responsables de filière de génie mécanique énergétique de l'université.*

*Nous remercions sincèrement tous nos enseignants qui ont veillé à notre formation.*

*Finalement nous adressons nos gratitudes remerciements à toute personne qui a contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.*

*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à*

*La mémoire de ma sœur Fatima*

*Mes chers parents pour leur soutien et leurs encouragements*

*durant toute ma carrière d'étude*

*Mes frères : Samire, Abdesslam, Mohamed*

*A ma sœur : Nadjema*

*Ma grande mère Bent Hadj*

*Toute ma grande famille*

*A tous les étudiants de génie mécanique*

*Ainsi que tous mes amis et tous qui me connaissent*

*Abderrazak, Zakaria, Lakhedar,*

**Mazouzi Abdellah**



*Dédicace*

*Je dédié ce modeste travail*

*A mes parents*

*A ma femme et mes enfants AKRAM et*

*FATIMA*

*A mes frères*

*A toute mes familles et mes amis*

*Chafi Mohamed*



## Résumé :

Les nano fluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide. Leurs propriétés thermiques étonnantes en ont fait l'objet d'intenses investigations durant la dernière décennie. On constate, notamment, une nette augmentation des échanges de chaleur qu'aucune phénoménologie ne permet encore d'expliquer de manière satisfaisante. Cette amélioration du transfert de chaleur fait donc des nano-fluides une nouvelle technologie prometteuse dans le cadre des transferts thermiques, permettant d'améliorer les performances de divers échangeurs de chaleurs. L'objectif de ce travail est une étude numérique paramétrique de l'influence des nano-fluides dans l'amélioration des performances des échangeurs de chaleur grâce au code de calcul COMSOL multiphysics version 5.3

**Les mots clés :** nano fluide –les échangeurs a tube concentrique -comsol-transfert de chaleur

## abstract

Nano-fluids are colloidal suspensions composed of nonometer-sized particles suspended in a liquid. Their astonishing thermal properties have been the subject of intensive investigations during the last decade. indeed, the results reveal that there is a remarkable increase in heat transfer which is still unclerarly explained. This improvement at the level of heat transfer thereby makes nsnofluids in particular well- appropriate in the designs of heat exchanger strengthening the performance of diverse heat exchangers as a new promising technology. The objective of this inquiry is purely parametric and numerical concerning the impact of nano-fluids in the enhancement of the performance of the heat exchangers thanks to the code of computation COSMOL multiphysics version 5.3

**Keywords :** Nano-fluids-heat transfer- concentric tube heat exchanger-COMSOL

## ملخص :

**المائع النانو** مترى هي محاليل غروانية تتكون من جزيئات ذات حجم نانومتر معلق في مائع. خواصهم الحرارية المدهشة كانت موضوع تحقيق مكثف خلال العقد الماضي. هناك، على وجه الخصوص، زيادة واضحة في المبادلات الحرارية التي لا يمكن لأي ظواهر تفسيرها بشكل مرض. هذا التحسن في نقل الحرارة يجعل موائع النانو مترية تقنية جديدة واعدة في سياق نقل الحرارة ، مما يجعل من الممكن تحسين أداء مختلف المبادلات الحرارية. الهدف من هذا العمل هو دراسة عددية حدية لتأثير سوائل النانو في تحسين أداء المبادلات الحرارية بفضل كود حساب COMSOL multiphysics 5.3

**الكلمات المفتاحية:** نانوفلويد- التبادل الحراري-كومصول- مبادل حراري أنبوب متحدة المركز

## Nomenclature

$C_p$	la capacité thermique	<b>J/Kg. K</b>
$\phi$	flux de chaleur	W
D	le diamètre	M
$\varphi$	La fraction volumique	
$\lambda$	coefficient de transfert thermique convectif	W/m <sup>2</sup> .K
L	Longueur	M
Nu	nombre de Nusselt	/
P	pression	Pa
Pr	nombre de Prandtl	/
$q'$	flux thermique	W/m <sup>2</sup>
R	rayon	M
Re	nombre de Reynolds	/
S	surface	m <sup>2</sup>
M	Viscosité dynamique	Kg/m .s
T	temps	S
T	température	K
V	Vitesse	m/s
r, z	coordonnées cylindrique	/
$\sigma$	<i>contrainte normal</i>	
$\tau$	Contrainte tangentielle	
$\Lambda$	conductivité thermique	W/m K
P	masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>
H	performance thermique	
<b>Les indices</b>		
E	extérieur	
F	fluide	
I	intérieur	
Nf	Nano-fluide	
P	particule	
<b>Abréviation</b>		
Ntc	nano tube de carbone	
$\Delta TLM$	La différence de température logarithmique moyenne	
DNTCs	double couche nanotube de carbone	
MNTC	multiple couche nanotube de carbone	
SNTCs	simple couche nanotube de carbone	

## Table des matières

Résumé :.....	
abstract .....	
: ملخص.....	
Introduction générale .....	1
I.1. Introduction : .....	4

### **Chapitre I: Généralité sur les nano-fluides**

I.2. Echangeur de chaleur:.....	5
I.2.1. Classification des échangeurs :.....	5
I.2.1.1 Echangeur à contact direct :.....	5
I.2.1.2 Echangeur à contact indirect :.....	5
I.2.2. Classement des types d'échangeurs :.....	5
I.2.2.1. Echangeur sans changement de phase :.....	5
I.2.2.2. Echangeur avec changement de phase :.....	6
I.2.3. Classement suivant la disposition des écoulements : .....	6
I.2.3.1. Circulation à co-courant : .....	6
I.2.3.2. Circulation à contre-courant : .....	6
I.3. Les nano fluides :.....	7
I.3.1. Nanoparticules et les fluides porteurs :.....	7
I.3.2. État de l'art sur les nan fluides : .....	8
I.3.3. Production des nan fluides et nanoparticules : .....	9
I.3.4. Les nano fluides à base d'oxyde (Revue bibliographique) :.....	10
I.3.5. Les nanoparticules d'oxyde d'Aluminium : .....	10
I.3.6. Les nanoparticules d'oxyde de cuivre : .....	12
I.3.7. Nanoparticules de dioxyde de Titane : .....	13
I.3.7. Les nanoparticules métalliques :.....	16
I.3.7.1 Les nanoparticules de cuivre : .....	16
I.3.7.2. Les nanoparticules d'Or et d'Argent : .....	16
I.3.8. Les nanotubes de carbone :.....	17
I.3.8.1. La structure : .....	17
I.3.8.2. Propriété thermique des nanotubes de carbone : .....	18

I.3.9. Propriétés thermiques à l'échelle nanométrique :	21
I. 3.10. Convection forcée :	21
I.3.11. Domaines d'applications des nano-fluides :	22
I.3.11.1. Refroidissement des systèmes thermiques :	22
I.3.11.2. Refroidissement des systèmes électroniques :	22
I.3.11.3. Refroidissement des systèmes militaires :	23
I.3.11.4. Refroidissement des systèmes spatiaux :	23
I.3.11.5. Refroidissement des systèmes nucléaires :	23
I.3.11.6. La biomédecine :	23
I.3.11.7. D'autres applications :	23
I.4. Conclusion :	24

## **Chapitre II: Les caractéristiques thermo-physiques des nano-fluides**

II.1. Introduction :	26
II.2. Les propriétés thermo-physiques des nano fluides :	26
II.2.1. La fraction volumique :	26
II.2.2. La masse volumique et la capacité thermique:	26
II.2.3. la capacité thermique :	27
II.2.4. La conductivité thermique:	27
II.2.5. La viscosité dynamique :	33
II.3. Conclusion :	37

## **Chapitre III: Modélisation et position du problème**

III.1. Introduction :	38
III.2. Modèle géométrique :	38
III.3 CONDITIONS AUX LIMITES :	39
III.3. MATÉRIAUX :	39
III.3.1. Fluide intérieur :	39
III.3.2. Fluide extérieur :	39
III.3.3. Les tubes :	40
III.4. MAILLAGE :	41
III.5. Description du problème :	41
III.5.1. Hypothèses :	41
III.5.2. Les équations du problème :	42
III.5.2.1 Régime laminaire :	42
III.5.2.1.1. L'équation de quantité de mouvement (Navier-Stokes) :	42

III.5.2.1.2.L'équation de continuité : .....	42
III.5.2.1.3.L'équation d'énergie : .....	42
III.5.2.2.Régime turbulent : .....	42
III.5.2.2.1.L'équation de continuité : .....	42
III.5.2.2.2.L'équation de quantité de mouvement : .....	43
III.5.2.2.3.L'équation d'énergie : .....	43

## **Chapitre IV: Résultats et discussions**

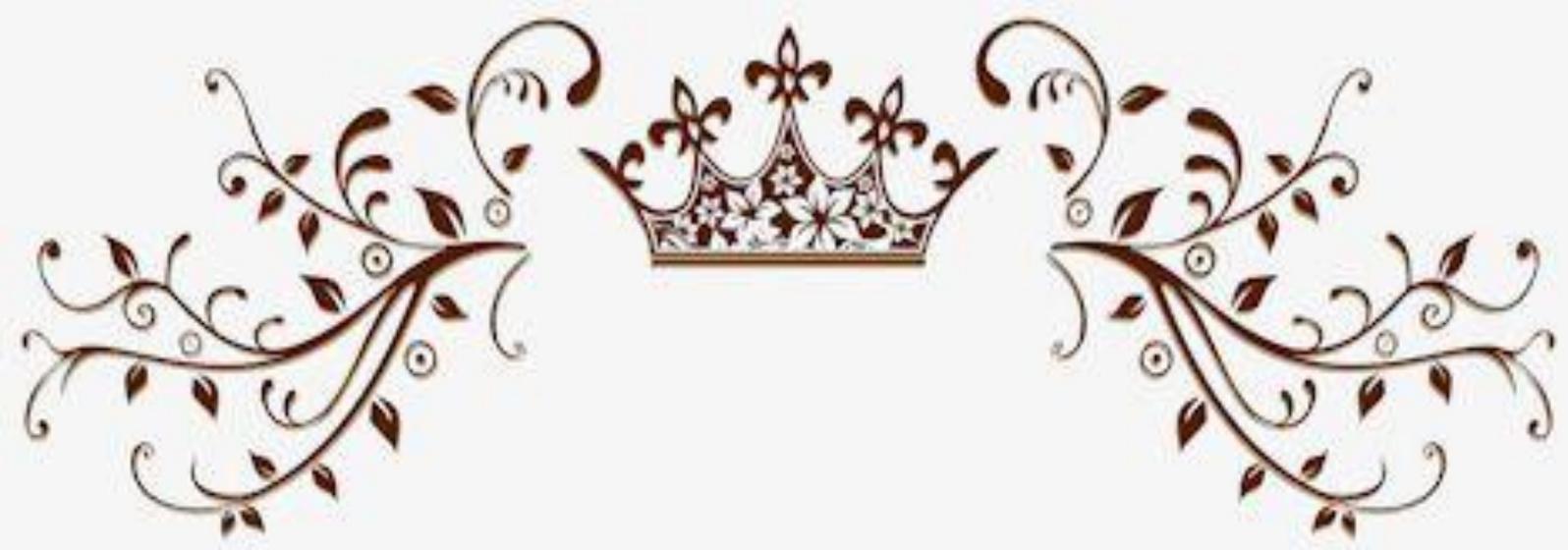
IV.1. Introduction : .....	44
VI.2. VERIFICATION DE L'AMELIORATION DU TRANSFERT CONVECTIF PAR LES NANOFLUIDES : .....	45
IV.3. COMPARAISON ENTRE DIFFERENTS MODELES DE CALCUL DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUE : .....	46
IV.4. EFFET DU NOMBRE DE REYNOLDS : .....	51
IV.5. EFFET DE LA TEMPERATURE : .....	52
IV.6. EFFET DU CHOIX DES NANOPARTICULES : .....	56
IV. Conclusion : .....	57
Conclusion générale .....	56
Bibliographie : .....	57

## Liste des figures :

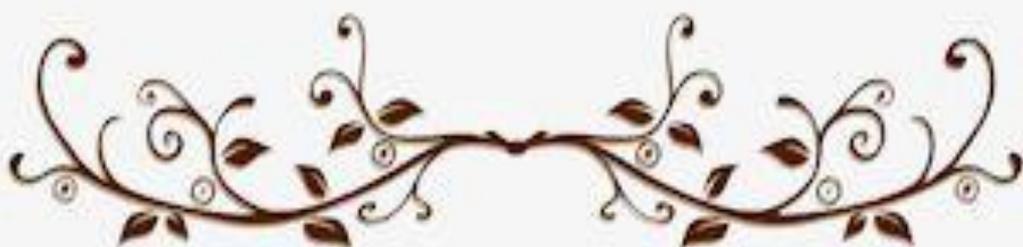
Figure I. 1. Différents modes de circulation. ....	6
Figure I. 2. Les couleurs de deux nanofluides avec seulement 1% de nanoparticules. ....	13
Figure I. 3. Différentes structures des nanotubes identifiées. ....	18
Figure I. 4. Image TEM (Microscope électronique à transmission) de nanotubes « mono feuillet » (barre d'échelle 10nm) Wang et al. en 2005. ....	18
Figure I. 5. Explication schématisée de la création d'un réseau de ponts thermiques (trait rouge) créée par une dispersion de nano-fibres (trait noir) dans un liquide (Beige) qui permet la propagation de la chaleur d'une zone chaude (ovale rouge) vers.....	19
Figure III. 1. model géométrique d'échangeur de chaleur à tube concentrique.....	38
Figure III. 2 Maillage de notre tube concontrique. ....	41
Figure IV. 2.1. Profil des températures des deux fluides (chaud et froid) le long de l'échangeur. ....	45
Figure IV. 2.2. évolution des pertes de charges le long des deux tubes de l'échangeur. ....	46
Figure IV. 3.1. Profils des flux de chaleur échangés en fonction de la fraction volumique pour différentes théories de calcul.....	47
Figure IV. 4.1. Variation du flux de chaleur échangé en fonction du nombre de Reynolds ( $\phi=8\%$ ). ....	51
Figure IV. 5.. Variation du flux échangé en fonction de la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide).....	52

## Liste des tableaux :

Tableau I. 1. Valeurs des conductivités thermiques des nanoparticules et des fluides utilisés. ....	14
Tableau I. 2. Résultats donnant les valeurs maximales des conductivités thermiques obtenues pour différents nanofluides avec des nanoparticules sphériques d'oxydes métalliques et différents fluides de base. ....	15
Tableau I. 3. Valeurs maximales de la conductivité thermique des nano-fluides pour les nanoparticules métalliques obtenues par différents auteurs. ....	17
Tableau I. 4. Valeurs mesurées de la conductivité thermique des nanofluides avec des nanotubes de carbone pour différents fluides de base et pour différentes valeurs de la fraction volumique en nanotubes. ....	20
Tableau III. 1..Dimensions du modèle géométrique d'échangeur à tubes concentriques étudié.	38
Tableau III. 2 Les conditions aux limites. ....	39
Tableau III. 3. Les caractéristiques thermo-physiques de l'eau. ....	39
Tableau III. 4. Caractéristiques thermo-physiques des différent nano-fluide. ....	40
Tableau III. 5. Caractéristiques thermo-physiques de l'acier. ....	40



# INTRODOCTION GENERALE



## Introduction générale

L'intensification des transferts thermiques dans les échangeurs de chaleur est un enjeu majeur du génie des procédés industriels et plus globalement dans toute politique de maîtrise de l'énergie. La problématique est complexe car elle nécessite un bon équilibre entre les coûts et les gains afin de s'inscrire dans une démarche technico-commerciale économiquement viable. Les techniques permettant l'intensification des transferts thermiques mènent très souvent à une augmentation des coûts de fabrication du fait de modification d'installations existantes, de consommation supplémentaire de matières premières ou de leur complexité technologique (usage plus long, utilisation de nano matériaux...).il existe deux types de techniques d'amélioration du transfert thermique :

Les techniques dites actives ou on peut citer :

- les procédés dont les parois du canal sont fixes
- les procédés dont les parois sont mobiles.

Et les techniques dites passives ou on peut citer :

- Modification de l'hydrodynamique de l'écoulement
- Modification de la géométrie de la surface d'échange : Les ailettes
- Optimisation des propriétés thermo-physiques des fluides : les nano-fluides .Cette dernière est l'objet de notre étude vue son utilisation très larges ces dernières années.

Les nano-fluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés.

Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique. Or, les fluides les plus employés tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène-glycol (EG) ne disposent que d'une conductivité thermique faible par rapport à celle des solides cristallins. Avec les nano-fluides, l'idée est alors d'insérer, au sein du fluide de base, des nanoparticules afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange. Ce terme nano-fluide a été introduit par Choi nano-fluides pour les applications thermiques et reste couramment utilisé pour désigner ce type de suspensions.

L'idée d'améliorer les propriétés thermiques de fluides par l'adjonction de particules n'est pas nouvelle, mais l'utilisation de particules de taille nanométrique permet potentiellement de minimiser considérablement les problèmes d'érosion et de sédimentation rencontrés avec les particules de taille plus élevée. De plus, certains auteurs ont mis en avant des performances thermiques améliorées en conductivité thermique et en échange thermique liquide et liquide/ vapeur dues à la taille nanométrique.

Débutée il y a une dizaine d'années, l'activité de recherche sur les nano-fluides croît de manière quasiment exponentielle depuis lors pour atteindre, à l'automne 2008, 92 brevets, 268 présentations dans des conférences internationales, 6 livres ou chapitres de livre, 454 articles de revues scientifiques, 34 rapports et 15 thèses sur le sujet.

L'objectif de ce modeste mémoire est l'étude numérique grâce au code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS version 5.3a de l'intensification du transfert thermiques par l'utilisation des nano-fluides et l'amélioration des performances d'un échangeur de chaleur à tubes concentriques travaillant à contre –courant.

Notre mémoire est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre « Généralité sur les nano-fluides » nous présentons les nano-fluides leurs différents types et leurs classes ainsi que leurs domaines d'application.

Le second chapitre « Caractéristique thermo-physique des nano-fluides » est consacré à la théorie des nano-fluides ainsi que les différents modèles de calcul de leurs propriétés thermo-physiques.

Nous présentons dans le troisième chapitre « Modélisation et position du problème » notre modèle géométrique et la position de la problématique avec toutes les hypothèses considérées.

Finalement dans le quatrième et dernier chapitre « Résultats et discussions » nous exposons et discutons les résultats de notre étude numérique réalisée avec le code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS (version 5.3a).

Dans cette partie nous avons étudié l'amélioration de transfert de chaleur convectif par les nano fluide grâce au code de calcul COMSOL .



# Capitre I :

## Généralité sue les nano-fluide



### I.1. Introduction :

Le développement des nanotechnologies constitue un challenge pour les années à venir. Les nanosciences étudient la structure de la matière au niveau moléculaire donc à l'échelle nanométrique dans le but d'innover dans de nombreux domaines tels que : l'environnement, la production et le stockage de l'énergie, le refroidissement des composants électroniques, la biologie, le diagnostic médical, le traitement de l'eau, etc....

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 nano fluide) comme par exemple des particules d'Oxyde d'Aluminium ( $Al_2O_3$ ), d'Oxyde de Cuivre (CuO), le cuivre (Cu) ou des nanotubes de carbone dans l'eau pouvaient augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas du corps pur (eau), en modifiant de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur. Différents modèles ont été élaborés en vue d'expliquer cette remarquable améliorations des transferts convectifs, mais la confrontation entre ces modèles pour évaluera la conductivité thermique effective des nano fluides montre que ces derniers n'approximent pas de façon satisfaisante les expériences réalisées sur les nano fluides avec différentes variétés de nanoparticules et de fluides.

## I.2. Echangeur de chaleur:

un échangeur de chaleur est un système servant à transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides.

Le matériau composant l'échangeur thermique doit être le plus conducteur possible afin de limiter les pertes thermiques et favoriser l'échange.

Pour que l'échange soit possible, les deux fluides devront avoir une température différente : on parle d'écart de température, de delta de température ( $dT$ ) généralement exprimé en Kelvin (K) ou en degrés Celsius ( $^{\circ}C$ ).

La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou complexe de refroidir ou chauffer directement, pour cela on utilise différents types d'échangeurs tel que les échangeurs tubulaires (monotube, coaxial), les échangeurs multitubulaires (à tube séparé, à tube rapproché, ou à tube ailettes), les échangeurs à tube et calandre, et les échangeurs à plaque, dans notre étude on utilise l'échangeur concentrique.

### I.2.1. Classification des échangeurs :

Il existe plusieurs critères de classement des échangeurs.

#### I.2.1.1 Echangeur à contact direct :

Le type le plus simple comprend récipient (ou canalisation) dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.

#### I.2.1.2 Echangeur à contact indirect :

Les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi.

### I.2.2. Classement des types d'échangeurs :

#### I.2.2.1. Echangeur sans changement de phase :

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait

Changement de phase.

Les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur.

### I.2.2.2. Echangeur avec changement de phase :

Les échangeurs avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents :

1/ l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.

2/ le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire lequel ne subit pas de changement d'état .Ils sont appelés évaporateurs.

3/ le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid , lequel ne subit pas de transformation d'état.

### I.2.3. Classement suivant la disposition des écoulements :

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories : Co-Courant (mouvements des fluides dans le même sens).

Contre-courant (mouvement des fluides dans les sens contraires).

Ou bien les vecteurs vitesses des fluides sont perpendiculaires l'un à l'autre , il sagit cette fois de « courant croisés »

#### I.2.3.1. Circulation à co-courant :

Les fluides 1 (froid) et 2 (chaud) entrent d'un même côté de l'appareil, circulent en parallèle, et 2.5.2 Circulation à contre-courant sortent à l'autre extrémité.

#### I.2.3.2. Circulation à contre-courant :

Le fluide 1 et 2 entrent des côtés opposés de l'appareil et circulent en sens contraires.

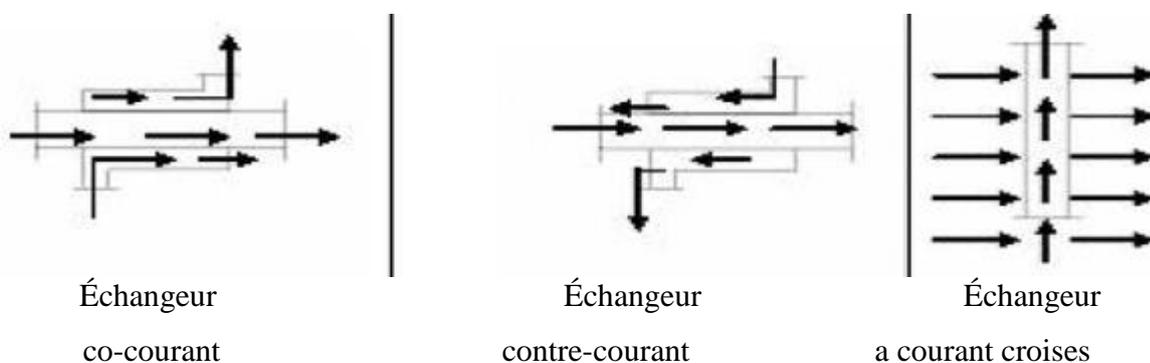


Figure I. 1. Différents modes de circulation.

### I.3. Les nano fluides :

Les transferts de chaleur au sein de fluides conduit à de nombreuses applications pratiques et industrielles, y compris dans le transport, l'approvisionnement en énergie, la climatisation et le refroidissement électronique, etc.

L'essor actuel des nanosciences a pour origine la mise en évidence des propriétés spécifiques de la matière aux dimensions nanométriques. Ceci a suscité de nouveaux champs d'étude dans de très nombreux laboratoires et a permis le développement des fluides aux propriétés originales. Nous restreindrons dans notre travail aux nano fluides.

#### I.3.1. 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 à 100 nm). 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 de nos jours. De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires.

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

- ❖ l'oxyde d'aluminium,  $Al_2O_3$ .
- ❖ l'aluminium, Al.
- ❖ le cuivre, Cu.
- ❖ l'oxyde de cuivre, CuO.
- ❖ l'or, Au.
- ❖ l'argent, Ag.
- ❖ les nanotubes de carbone.
- ❖ le silicone, Si.
- ❖ le dioxyde de titane,  $TiO_2$

Les liquides de base les plus utilisés sont :

- ✓ l'eau.
- ✓ l'éthylène-glycol, EG.
- ✓ les huiles.
- ✓ le Toluène.

Par ailleurs, l'agitation brownienne, liée à la taille nanométrique des particules, minimise les problèmes de sédimentation rencontrés avec des particules de plus grande dimension.

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nano fluides, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels Eastman et al. [3] et des qualités indéniables d'amélioration du transfert thermique. La conductivité thermique des nan fluides peut être significativement plus élevée que celle des liquides purs.

La mesure de la conductivité thermique des nano fluides nécessite le recours à une instrumentation originale. Les mesures disponibles de la conductivité thermique de différents nan fluides ne sont pas concordantes. Nous présentons dans un premier temps, la découverte d'un nano fluide et quelques travaux expérimentaux qui s'en sont suivis. Nous présenterons par la suite les propriétés thermo physiques et les résultats obtenus par différents auteurs sur les nano fluides. Pour comprendre les phénomènes mis en jeu dans les nan fluides, des expériences supplémentaires sont nécessaires pour arriver à une bonne compréhension des phénomènes mise en jeu dans les nano fluides. Pour l'instant aucune des théories physiques proposées ne rend compte des résultats expérimentaux obtenus.

### I.3.2. État de l'art sur les nan fluides :

Nous présentons dans cette partie l'historique des études théoriques et expérimentales portant sur les nan fluides depuis leur découverte jusqu'à nos jours.

Le terme "nano fluide" est proposé premièrement par Choi [1] pour désigner la suspension des nanoparticules solides dans un liquide de base. Choi [1] a trouvé que la conductivité thermique effective du mélange eau- $Al_2O_3$  augmente de 20% pour une concentration en volume entre 1% et 5% de  $Al_2O_3$ .

De plus l'adjonction dans un liquide de certains types de nanoparticules, même en très faible concentration (1% en volume), permet d'augmenter la conductivité thermique de ce dernier de

150% dans le cas de nanotubes de carbone Choi et al. [2], et de 40% pour des nanoparticules d'oxyde de cuivre Eastman et al. [3] et plus de 20% pour des oxydes d'aluminium [1-7].

De nombreuses recherches ont été menées depuis 2001 sur cette nouvelle classe de nan fluides afin de permettre une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu, et mettre ainsi

au point des fluides caloporteurs plus performants. La forte conductivité thermique des nan fluides les désigne en effet comme des candidats potentiels pour le remplacement des fluides porteurs utilisés dans les échangeurs thermiques en vue d'améliorer leurs performances Keblinski [4].

Certaines limitations susceptibles de réduire les performances des nan fluides utilisées à la place des fluides caloporteurs purs, ont été étudiées.

L'utilisation des nan fluides comme fluide caloporteur dans les échangeurs a montré que l'addition de nanoparticules dans un liquide augmente sa viscosité et de ce fait les pertes de charge Yang [5]. De plus, le manque de stabilité dans le temps de certains nan fluides peut entraîner l'agglomération des nanoparticules et une modification de leur propriété de conduction thermique. Néanmoins, en l'état actuel des recherches, ces deux effets restent moins importants lors de l'utilisation de nan fluides que dans le cas de suspension de microparticules classiques Daungthongsuk [6]. En dehors des applications industrielles possibles, l'étude des nan fluides présente un intérêt scientifique pour la compréhension des phénomènes mis en jeu aux échelles nanométriques. Les propriétés thermiques des nan fluides ne concordent pas avec les prévisions fournies par les théories classiques décrivant les suspensions de particules solides dans un liquide. Malgré le nombre élevé d'études publiées sur le sujet ces dernières années, aucune théorie ne parvient à décrire convenablement les résultats expérimentaux obtenus sur les nan fluides d'après Vadasz [7]. Il est à noter, que les résultats expérimentaux obtenus varient énormément d'une publication à l'autre ce qui ne facilite pas la comparaison entre ces derniers et les théories proposées. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour valider ou infirmer les différentes théories proposées pour décrire les propriétés thermiques des nan fluides.

Différents types de nanoparticules ont été utilisés pour fabriquer les nan fluides.

Nous pouvons de manière générale les classer en deux catégories de nano fluides : ceux contenant des nanoparticules métalliques et ceux contenant des nanotubes de carbone.

### **I.3.3. Production des nan fluides 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. Maouassi ammar [8]

Tout en supposant que la suspension est stable et durable, l'agglomération de particules est négligeable, aucun changement chimique du fluide, la préparation des nan fluides ne 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 nano poudre 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.3.4. Les nano fluides à base d'oxyde (Revue bibliographique) :**

L'idée est alors d'insérer, au sein du fluide, des particules de taille nanométriques pour espérer augmenter la conductivité thermique effective du mélange depuis Maxwell en 1881. Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour l'obtention de nan fluides à base de nanoparticules sphériques. Ces nanoparticules peuvent être fabriquées à l'aide de métaux solides (Cuivre, Argent, Or,...) ou d'oxyde métallique (d'oxyde d'Aluminium, d'oxyde de cuivre, d'oxyde de Titan,...). Les oxydes métalliques sont faciles à produire, ils sont chimiquement stables et facile à disperser dans l'eau. Les chercheurs ont alors entamé des études théoriques et expérimentales pour améliorer les propriétés de transport thermique des nan fluides ainsi obtenus.

La phase liquide comme : l'eau, l'huile, l'éthylène glycol possède une conductivité largement inférieure à celle de la phase solide.

#### **I.3.5. Les nanoparticules d'oxyde d'Aluminium :**

L'essentiel des travaux sur ce type de nano fluides a porté sur la mesure de la conductivité thermique en fonction des différents paramètres caractérisant les nanoparticules (taille, fraction massique) et température de l'ensemble.

Le premier travail publié sur l'amélioration de la conductivité thermique utilisant l'oxyde d'aluminium a été mené par Massuda et al. en 1993 [9]. En dispersant des nanoparticules ( $Al_2O_3$ ) dans l'eau dont la taille des nanoparticules est de diamètre 13nm. Ils ont obtenu une amélioration de la conductivité thermique de 30% pour une fraction volumique  $\phi = 4.3\%$ . Ce résultat a été suivi par une autre étude publiée par Eastman et al. [10] qui ont trouvé une amélioration de 30% de la

conductivité thermique de nanoparticules ( $Al_2O_3$ ) de taille 33nm en suspension dans l'eau pour une fraction volumique de 5%.

Les travaux de **Wang et al.** [11] ont porté sur l'étude numérique de la convection naturelle dans une cavité bidimensionnelle pour différents nombres de Grashof et pour différentes concentrations en volume. Ils ont obtenu une amélioration de la conductivité thermique de 40% pour ( $Al_2O_3$ +éthylène glycol) de fraction volumique 8% et 14% pour (eau+  $Al_2O_3$ ) pour une fraction volumique de 4.5%.

**Lee et al.** [12] ont mesuré la conductivité thermique des nan fluides. Ils ont utilisé l'oxyde de cuivre CuO et l'oxyde  $Al_2O_3$ . Ces particules sont utilisées dans deux liquides de base : l'eau et l'éthylène glycol. Ils ont obtenu une amélioration de 10% de la conductivité thermique pour le nano fluide (eau+  $Al_2O_3$ ) de fraction volumique 4.3% et une amélioration de 20% pour ( $Al_2O_3$ ) dans l'éthylène glycol pour  $\phi = 5\%$  de volume. Ces derniers résultats différents notablement de ceux obtenus par les précédents auteurs bien qu'ils aient travaillé avec des nanoparticules de même taille.

En 2003 **Das et al.** [13] furent les premiers à étudier l'influence de la température sur l'accroissement de la conductivité thermique des nan fluides. Ils ont relevé une augmentation de la conductivité thermique lorsque la température varie de 21°C à 51°C pour les deux nan fluides ( $Al_2O_3$ +eau) et (CuO+eau). Les valeurs de diamètre des particules sont de 38,4nm pour ( $Al_2O_3$ ) et de 28.6nm pour CuO. Les résultats expérimentaux montrent que la conductivité thermique augmente linéairement avec l'augmentation de la température et dépend de la fraction volumique des nanoparticules dans l'eau.

**Xie et al.** [14] ont examiné l'influence du pH de la solution fluide de base et des nanoparticules de différentes tailles sur l'amélioration de la conductivité thermique du nano fluide et ce pour des nanoparticules ( $Al_2O_3$ ) dispersées dans l'eau, l'éthylène glycol et l'huile. Ils ont montré que l'amélioration de la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de pH.

En 2006, **Pracher et al.** [15] ont mesuré la conductivité thermique à 85°C d'un nano fluide constitué d'eau et de particules d'  $Al_2O_3$  de diamètre 10nm avec une fraction volumique de 0.5%. Ils ont trouvé qu'à cette température la conductivité du nano-fluide était égale à deux fois celle de l'eau.

**Li et Peterson** [16] ont utilisé des nanoparticules  $Al_2O_3$  de diamètre 36nm avec une fraction volumique 10% dans l'eau pure à une température de 34.7 C. Ils ont relevé une amélioration de 30% de conductivité thermique du nano fluide ainsi mise au point. Sur la base de ces résultats expérimentaux, Li et Peterson ont proposé la relation permettant le calcul de la conductivité thermique du nano fluide (eau+Al2O3).

$$\frac{k_{nf} - k_f}{k_f} = 0.764481\varphi + 0.01868867T - 0.462174175$$

### I.3.6. Les nanoparticules d'oxyde de cuivre :

En utilisant des nanoparticules de CuO, de diamètre 36nm avec une fraction volumique de 5% dans de l'eau, Eastman et al. [10] ont obtenu une amélioration de la conductivité thermique de 60%, deux fois supérieure à la conductivité thermique obtenue dans les mêmes conditions avec des nanoparticules d' $Al_2O_3$ .

**Lee et al.** [12] ont mesuré la conductivité thermique de nan fluides utilisant des nanoparticules de CuO de diamètre 18,6 nm dans de l'eau ou dans l'éthylène glycol. Ils ont relevé que la conductivité thermique du nano fluide utilisé augmente linéairement en fonction de la fraction volumique des nanoparticules.

**Das et al.** [13] ont refait avec des nanoparticules de CuO les mêmes expériences développées pour des nanoparticules d' $Al_2O_3$ . Ils ont retrouvé un résultat analogue à savoir que la conductivité thermique du nano fluide étudié varie linéairement avec la température.

**Li et Peterson** [16] ont mené des expérimentations avec des nanoparticules CuO de diamètre 29nm dans l'eau pure avec une fraction volumique 10% et une température de 34.7 C. Ils ont relevé une amélioration de 52% de conductivité thermique du nano fluide. Ils ont proposé comme pour le cas des nanoparticules d'Al2O3 la relation suivante pour le nano fluide (eau+CuO).

$$\frac{k_{nf} - k_f}{k_f} = 3.76108\varphi + 0.017924T - 0.30734$$

### I.3.7. Nanoparticules de dioxyde de Titane :

Les nanoparticules d'  $Al_2O_3$  et de CuO, plus faciles à trouver dans le commerce, ont été les nanoparticules les plus étudiées au début des travaux de recherche sur les nano-fluides. Une autre nanoparticule d'oxyde a été plus tardivement étudiée. Il s'agit de l'oxyde de Titane ( $TiO_2$ )

, Pack et Choi [17], en dispersant des nanoparticules de 27 nm dans l'eau, ont obtenus une amélioration de la conductivité thermique de 10.7% pour une fraction volumique de 4,35%. Cette valeur est beaucoup plus faible que les 32% obtenue pour le nano fluide (eau+  $Al_2O_3$ ) avec la même concentration des nanoparticules.

**Murshed et al.** [18] ont mesuré la conductivité thermique des nanoparticules ( $TiO_2$ ) sphérique et cylindrique. Ils ont trouvé que le nano fluide contenant des nanoparticules sphériques de 15nm conduit à une faible amélioration de la conductivité thermique tandis que, pour des nanoparticules cylindriques de 40nm, ils obtiennent une amélioration allant jusqu'à 33% pour une fraction volumique de 5%.

La figure 1.1 montre les couleurs des nano fluides d'oxyde d'aluminium (eau+ $Al_2O_3$ ) et d'oxyde de cuivre (eau+CuO).

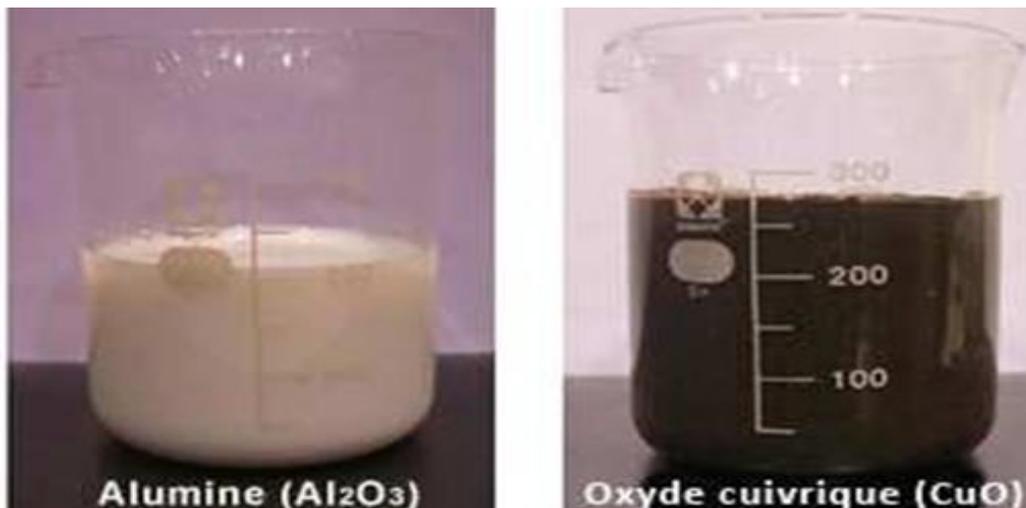


Figure I. 2. Les couleurs de deux nano-fluides avec seulement 1% de nanoparticules.

Nous présentons sur le tableau (I.1), les valeurs des conductivités thermiques des nanoparticules et des fluides de base utilisées pour former des nano fluides.

Les Matériaux	Les formes	Les conductivités themiques
Les carbones	nanotube de carbone	2000-3000
	Diamant	2300
	Graphite	110-190
	Fullerènes	0.4
Des solides métalliques	Cuivre	401
	Aluminium	237
	Argent	429
	Nickel	158
	Or	317
Des oxydes métalliques	Silicon	148
	Oxyde d'aluminium	40
	Oxyde de Titane	8.9538
	Oxyde de cuivre	17
	Brique rouge	60
Des liquides métalliques	Sodium	72.3
Des liquides non métalliques	Eau	0.613
	Ethylene glycol	0.253
	Huile de moteur	0.145
	Glycerol	0.289
	Huile	0.141

Tableau I. 1. Valeurs des conductivités thermiques des nanoparticules et des fluides utilisés.

Le tableau (I.2) regroupe les résultats expérimentaux, donnant la conductivité thermique des nano fluides, obtenus par plusieurs auteurs avec des nanoparticules d'oxydes métalliques de différentes tailles dispersées dans différents liquides porteurs (l'eau, l'éthylène glycol et l'huile) et pour différentes valeurs des fractions volumiques de nanoparticules. Gladés Bachir [19]

On peut relever au niveau de ce tableau la discordance entre les résultats obtenus par les différents auteurs avec le même type de nanoparticules et le même fluide de base.

Les nano-fluides	Taille des nano-fluide	Fraction	L'amélioration	reference
$Al_2O_3$ + eau	13	4,3	30	Masuda et al. 1993
$Al_2O_3$ + eau	33	5	30	Eastman et al. 1997
$Al_2O_3$ + eau	13	4.33	32	Pak et cho. 1998
$Al_2O_3$ + eau	28	4.5	14	Wang et al. 1999
$Al_2O_3$ + eau	24.4	4.3	10	Lee et al. 1999
$Al_2O_3$ + eau	38	4	25	Das et al. 2003
$Al_2O_3$ + eau	60	5	20	Xie et al. 2002
$Al_2O_3$ + eau	10	0.5	100	Prasher et al. 2006
$Al_2O_3$ + eau	20	1	16	Krishnamurthy et al.2006
CuO +eau	36	5	60	Eastman et al. 1997
CuO + eau	28.6	4	36	Das et al. 2003
CuO + eau	18.6	4.3	10	Lee et al. 1999
CuO + eau	23	10	35	Wang et al. 1999
$Al_2O_3$ +EG	28	8	40	Wang et al. 1999
$Al_2O_3$ +EG	24.4	5	20	Lee et al. 1999
$Al_2O_3$ +EG	60	5	30	Xie et al. 2002
CuO + EG	25	5	22.4	Liu et al. 2006
CuO + EG	23	15	55	Wang et al. 1999
$Al_2O_3$ +huile	28	7	20	Wang et al. 1999
$Al_2O_3$ + huile	60	5	40	Xie et al. 2002
$Al_2O_3$ + huile	28	7.5	30	Wang et al. 1999
$TiO_2$ + eau	27	4.35	10.7	Pak et Choi. 1998
$TiO_2$ + eau	15	5	33	Murshed et al. 2005

Tableau I. 2.Résultats donnant les valeurs maximales des conductivités thermiques obtenues pour différents nano-fluides avec des nanoparticules sphériques d'oxydes métalliques et différents fluides de base.

### I.3.7. Les nanoparticules métalliques :

#### I.3.7.1 Les nanoparticules de cuivre :

Les nanoparticules métalliques ont des conductivités thermiques plus grandes que celles des oxydes métalliques correspondants. On devrait s'attendre à trouver des valeurs de conductivité thermique du même ordre que celle obtenues avec les oxydes métalliques correspondants mais avec des fractions volumiques en nanoparticules métalliques beaucoup plus faibles. La conductivité thermique du cuivre à la température ambiante est environ 700 fois plus grande que celle d'eau et environ 3000 fois plus grande que celui d'huile du moteur. Xuan et Li [20] ont présenté une étude prouvant que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique. Le rapport de la conductivité thermique du nano fluide (eau + Cu) sur le fluide de base augmente 75% et de 45% pour le nano fluide (huile + Cu), quand la fraction volumique des nanoparticules varie entre 2.5% à 7.5%. Théoriquement, Xuan et al. [20] ont utilisé le modèle de Hamilton-Crosser pour étudier la conductivité thermique des mêmes nano fluides. Ils ont obtenu des résultats très proches des résultats expérimentaux.

En 1997 **Eastman et al.** [10] ont été observé une amélioration de 45% de la conductivité thermique par l'ajout de moins de 0.055% en volume des nanoparticules de cuivre de 35nm dans l'huile. Aussi en 2001 ils ont trouvé une amélioration de 40% de la conductivité thermique pour le nano fluide (Cu + éthylène glycol) contenant moins de 0.3% en volume de nanoparticules inférieur à 10nm.

#### I.3.7.2. Les nanoparticules d'Or et d'Argent :

La taille moyenne des nanoparticules d'or (Au) est de 10-20nm, tandis que, La taille moyenne des nanoparticules d'argent (Ag) est de 60-80nm.

**Patel et al.** [21] ont étudié le nano fluide (Au-thiolate+toluène) à une température de 60 C et ont obtenu une amélioration de 8.8% de la conductivité thermique pour une fraction volumique de nanoparticules  $\varphi=0.011\%$ . Pour une solution de (Au-citrate+eau) ils ont obtenu une amélioration de 8,3% de la conductivité thermique pour  $\varphi=0.00026$ , par contre, pour une solution de (Ag- citrate+eau) ils ont obtenu une amélioration de 4.5% pour  $\varphi=0.001\%$ . Pour le nano-fluide (Ag+eau) la conductivité thermique obtenue est plus faible que celle du nano-fluide (or+eau) bien que l'argent soit meilleur conducteur de la chaleur que l'or. Cette nette amélioration de la conductivité thermique lors de l'utilisation des nanoparticules d'or par rapport aux particules d'argent pourrait être attribuée à la taille des nanoparticules d'or qui sont de l'ordre de 3 à 8 fois plus

petites que celles d'argent. Kumar et al. [22] ont reporté, quant à eux une amélioration de conductivité thermique de 20% pour  $\varphi = 0.00013\%$  d'or dans l'eau.

Le tableau (2.3) regroupe les résultats expérimentaux, donnant la conductivité thermique des nano-fluides, obtenus par plusieurs auteurs avec des nanoparticules métalliques de différentes tailles dispersées dans différents liquides porteurs (l'eau, l'éthylène glycol et l'huile) et pour différentes valeurs des fractions volumiques de nanoparticules.

Les Nano-fluides	Taille des nanoparticules	Fraction volumique	L'amélioration maximum	Référence
Cu + huile	35	0.055	45	Eastman et al. 1996
Cu + eau	100	7.5	75	Xuan et Li 2000
Cu + huile	100	7.5	45	Xuan et Li 2000
Cu + EG	10	0.3	40	Eastman et al. 2001
Au + toluène	15	0.011	8.8	Patel et al. 2003
Au + eau	15	0.00026	8.3	Patel et al. 2003
Ag + eau	70	0.001	4.5	Patel et al. 2003
Fe + EG	10	0.55	18	Hong et al. 2006

Tableau I. 3. Valeurs maximales de la conductivité thermique des nano-fluides pour les nanoparticules métalliques obtenues par différents auteurs.

### I.3.8. Les nanotubes de carbone :

#### I.3.8.1. La structure :

Les travaux d'Harold Kroto, Richard Smaley et Robert Curl (Prix Nobel de Chimie en 1996) ont abouti à la découverte d'une nouvelle forme allotropique du carbone, les fullerènes. L'étude de ces nouvelles structures formées de 60 atomes de carbone arrangés sous formes de sphères va très vite susciter un vif intérêt dans le milieu des matériaux nanostructures. C'est en étudiant ces nouvelles structures, synthétisées alors par arc électrique, qu'en 1991 Sumio Iijima observe pour la première fois les nanotubes de carbone (NTC) multi-feuillets noté MWNT (Multi-Walled NanoTube). Ils sont constitués de deux ou plusieurs couches de graphène. En 1993, il découvre également des nanotubes mono-feuillet. Le NTC mono-feuillet noté SWNT (Single Walled NanoTube), se présente sous la forme d'un graphène, enroulé sur lui-même, décrivant une géométrie tubulaire. Si le NTC n'a pas subi de détérioration, une demi-sphère de fullerène forme généralement l'une de ses deux extrémités, tandis que la seconde peut être occupée par une

nanoparticule métallique utilisée comme catalyseur pour la synthèse des NTC. Suivant l'orientation des motifs hexagonaux de carbone par rapport à l'axe du tube, il est possible de différencier les divers types de SWNT (fig.I.2)

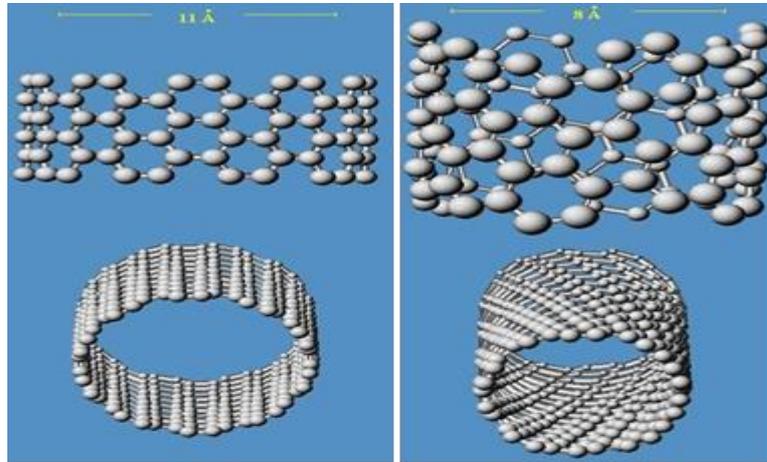


Figure I. 3. Différentes structures des nanotubes identifiées.

Les tubes de quelques nanomètres de diamètre peuvent atteindre plusieurs centaines de micromètres de longueur (Fig.I.3).

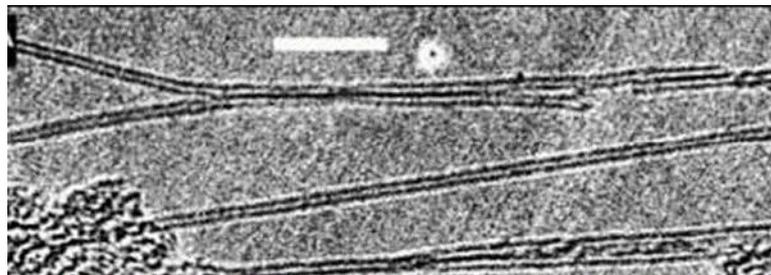


Figure I. 4. Image TEM (Microscope électronique à transmission) de nanotubes « mono feuillet » (barre d'échelle 10nm) Wang et al. en 2005.

### I.3.8.2. Propriété thermique des nanotubes de carbone :

Les travaux théoriques et expérimentaux ont permis la détermination de la conductivité thermique de ces nanotubes de carbone (3000W/m.K pour les nanotubes de carbone multi- feuillets ou multi Wall (MWNTCs) et 6000W/m.K pour les nanotubes de carbone single-Wall (SWNTCs) [23]. Ce sont les études portant sur les nano fluides à base de nanotubes de carbone qui ont montré les augmentations de conductivité thermique les plus élevées. Ces dernières sont de l'ordre plus de 160% pour des concentrations en volume de 1% (Choi en 2001). Une manière simple de se représenter l'effet de nanotubes de carbone en solution est de considérer les nanotubes en suspension comme autant de nano-ponts thermiques susceptibles de conduire rapidement l'énergie d'un point à l'autre de l'échantillon comme montre la figure (I.4).

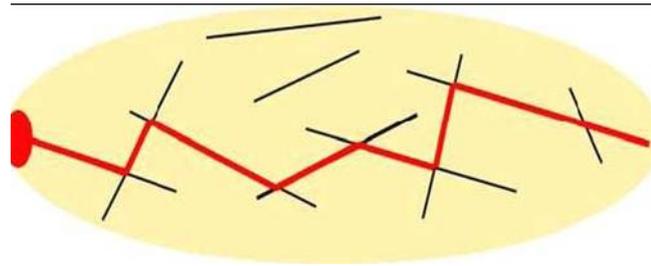


Figure I. 5. Explication schématisée de la création d'un réseau de ponts thermiques (trait rouge) créée par une dispersion de nano-fibres (trait noir) dans un liquide (Beige) qui permet la propagation de la chaleur d'une zone chaude (ovale rouge) vers

Cette augmentation de conductivité thermique peut être prédite par la théorie du milieu effectif qui prévoit de fortes augmentations de conductivité thermique pour des fluides contenant des nanoparticules ayant un grand rapport d'aspect (Kebinski en 2005). Cette théorie permet de calculer l'augmentation de la conductivité thermique du liquide en fonction du rapport d'aspect des nanotubes utilisés. Elle prédit que la conductivité thermique du nano fluide devrait augmenter fortement avec le rapport d'aspect des nanotubes.

L'augmentation de conductivité thermique prévue (jusqu'à 6000%) par cette théorie est largement supérieure à celle obtenue expérimentalement (150%). Ceci pourrait-être expliqué par la forte résistance inter faciale entre le nanotube et le liquide résultant de la faible affinité entre les liquides et les nanotubes de carbone qui provoque une déplétion des molécules de liquide environnant, autour du nanotube. Ceci a pour effet de réduire le couplage thermique entre les nanotubes et le liquide environnant, ce qui réduit la conductivité thermique du mélange. Pour limiter cet effet, des travaux sont en cours pour obtenir une meilleure adéquation entre le nanotube et le fluide porteur. Ces travaux de recherche ont un double intérêt : ils permettent d'une part d'améliorer la stabilité de la suspension et d'autre part l'obtention de nano-fluides meilleurs conducteurs de la chaleur. En revanche, les molécules greffées à la surface du nanotube peuvent également induire une résistance inter faciale supplémentaire Shenogin [24].

La principale difficulté rencontrée avec les nano-fluides à base de nanotubes de carbone est de disperser de manière stable dans le temps les nanotubes de carbone dans le liquide de base **Wang et al.** [25]. Le rapport d'aspect des nanotubes, les méthodes de préparation et d'ensemencement sont différents d'une publication à l'autre, entraînant une grande différence entre les valeurs des conductivités thermiques mesurées pour les nano-fluides avec des nanotubes de carbone. Ainsi la conductivité thermique augmente de 10% pour une concentration de 1% de nanotube dans l'eau (Xie 2003) à 38% pour une concentration de 0.6% de nanotubes dans l'eau (Assael 2005) ou encore de 150% pour une concentration de 1% de nanotubes dans l'éthylène glycol (Choi 2001).

L'utilisation de nanotube de carbone en suspension dans un liquide pour l'amélioration de la conductivité thermique est faite par Choi et al. [2] qui ont dispersé des multi couches de nanotubes de carbone de taille de 25nm et une longueur de 50 $\mu$ m dans l'huile Polyoléfine (PAO) à la température ambiante. L'amélioration de rapport de conductivité thermique était plus de 160% avec  $\varphi = 1\%$ , ceci indique que l'interaction entre les fibres conduit à une plus grande valeur de la conductivité thermique.

D'autres études ont conduit à des résultats différents pour des nanotubes de carbone dispersé dans l'eau.

**Xie et al.** [26] ont dispersé des (MNTC) dans l'eau, l'amélioration de la conductivité thermique du nano-fluide est de 20% pour une concentration de 1% de volume.

**Wen et Ding** [27] ont mesuré l'amélioration de (MNTCs) en suspension dans l'eau en fonction de la température et de la concentration. Ils ont trouvé qu'en dessous de 30°C la conductivité thermique du nano-fluide augmente linéairement avec l'augmentation de la température. L'amélioration maximum obtenue est de 31% pour  $\varphi = 0.84\%$  et à la température de 60°C. La même expérience a été menée par Ding et al. [28] qui ont trouvé une amélioration de 80% pour  $\varphi = 1\%$  et à une température de 30°C.

**Assael et al.** [29] ont obtenu 38% pour une fraction volumique de 0.6% de nanotubes dans l'eau ou encore de 150% pour une concentration de 1% de nanotubes dans l'éthylène glycol.

Les Nano-fluides	Fraction volumique	$k_{nf}/k_f$	Référence
MWCNTs+PAO	1	160	Choietal.2001
MWCNTs+eau	1	6	Xieetal.2003
MWCNTs+EG	1	12	Xieetal.2003
MWCNTs+Decène	1	20	Xieetal.2003
MWCNTs+eau	0.84	21	WenetDing2004b
MWCNTs+PAO	0.35	200	Yangetal.2006
DWCNTs+eau	1	8	Assaeletal.2004et2005
MWCNTs+eau	0.6	34	Assaeletal.2004et2005
MWCNTs+huilesynthétique	2	30	Liuetal.2005
MWCNTs+EG	1	12.4	Liuetal.2005

Tableau I. 4.Valeurs mesurées de la conductivité thermique des nanofluides avec des nanotubes de carbone pour différents fluides de base et pour différentes valeurs de la fraction volumique en nanotubes.

### I.3.9. Propriétés thermiques à l'échelle nanométrique :

Dans ce chapitre nous allons donner un bref aperçu des différents types de transferts thermiques et de leur influence respective dans des dispositifs nano fluidiques. Aux échelles nanométriques les relations fondamentales régissant les transferts thermiques restent inchangées. En effet la loi de Fourier reste valable pour des échelles de longueur grandes devant le libre parcours moyen des atomes. Ainsi, l'équation de la chaleur en régime conductif reste inchangée. Il convient de comprendre quels sont les types de transferts thermiques prédominant dans les nano fluides.

### I. 3.10. Convection forcée :

**Pak et al.** [17] se sont intéressés au transfert de chaleur par convection avec un fluide contenant en suspension des particules d'oxydes métalliques  $Al_2O_3$  (13nm) et  $TiO_2$  (27nm)). Les mesures sont effectuées dans une configuration de tube chauffé à flux constant en régime turbulent et les résultats les plus significatifs sont obtenus avec une fraction volumique de nanoparticules de 3%. A nombre de Reynolds égale, ils ont montré que le coefficient de transfert de chaleur est accru de

75% par rapport à celui de l'eau pure. Cependant, à vitesse débitante identique, le même paramètre  $h$  devient inférieur de 12% à celui de l'eau pure. Ce résultat est dû au fait que la viscosité du nano fluide est nettement supérieure à celle de l'eau pure.

**Xuan et Li** [20] ont utilisé le nano fluide (eau + Cu) pour mesurer le coefficient d'échange en convection forcée pour des nombres de Reynolds variant de 104 à 2.5.104. Ils ont trouvé que l'ajout des nanoparticules améliore grandement le transfert convectif. Ainsi pour une fraction volumique des nanoparticules de 2% le nombre de Nusselt du nano fluide croit de 39% comparé à celui dans l'eau. Ce nombre de Nusselt augmente quand on augmente  $Re$  ou quand on augmente le nombre Reynolds. L'inconvénient du recours aux nano-fluides dans ce cas est lié à l'augmentation de la viscosité du nano-fluide. Il faudrait alors rechercher un compromis pour augmenter le coefficient d'échange convectif en augmentant  $Re$  et ne pas trop augmenter la viscosité du nano-fluide pour pouvoir le mettre plus facilement en mouvement.

**Qiang et Li** [30] ont procédé à une expérimentation similaire de celle réalisée Xuan et Li [18]. Ils ont également mesuré le facteur d'échange en convection forcée pour le même type de nano fluide (eau Cu) pour différentes valeurs du nombre de Reynolds et pour  $Re$  variant de 0% à 1.2%.

**Maiga et al.** [31] ont étudié numériquement l'hydrodynamique (convection forcée) et les caractéristiques thermiques des nano-fluides dans un tube chauffé en utilisant un modèle à une seule phase pour les régimes laminaire et turbulent. Leurs résultats montrent que l'addition des nanoparticules conduit à une augmentation du transfert de chaleur comparé au fluide seul. Ils ont trouvé que le nano-fluide obtenu avec (l'éthylène glycol +  $Al_2O_3$ ) assure un meilleur transfert de chaleur que le nano-fluide (eau +  $Al_2O_3$ ). Ils ont rapporté que le coefficient de transfert de chaleur augmente de 80% pour l'éthylène glycol +  $Al_2O_3$  tandis qu'il augmente de 60% pour le nano-fluide (eau +  $Al_2O_3$ ) pour une fraction volumique 10% de nanoparticule  $Al_2O_3$ .

### I.3.11. Domaines d'applications des nano-fluides :

Les nano-fluides peuvent être employés 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.3.11.1. 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 [32] 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 [33] 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.3.11.2. Refroidissement des systèmes électroniques :

Dans les circuits intégrés, les nano-fluides ont été considérés comme fluides de refroidissement. Pour cela plusieurs études ont été effectuées. Tsai et col [34] ont employé un nano-fluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur.

De leur côté, Ma et col [35] ont étudié l'effet du nano-fluide 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.3.11.3. 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  $1000 \text{ W/cm}^2$ ), où les nano-fluides 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.3.11.4. Refroidissement des systèmes spatiaux :**

Pour les applications dans l'espace, You et col [36] et Vassallo et col [37] 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.3.11.5. Refroidissement des systèmes nucléaires :**

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

### **I.3.11.6. La biomédecine :**

Les nano fluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédicale. Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement 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 [38] ont effectué une étude où les nano fluides pourraient être employés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines.

### **I.3.11.7. 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 nano fluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur à partir des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité d'énergie. Les liquides réfrigérants de nano-fluide ont une application potentielle dans la majorité des industries de transformation, telles que les matériaux, la production chimique, la nourriture, la boisson, le pétrole et le gaz.

## **I.4. Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre introductif la différente classification des échangeurs et les différents nano fluides utilisés lors de cette décennie, leurs domaines d'applications



## Chapitre II :

# Caractéristiques thermo-physiques des nano-fluides



## II.1. Introduction :

L'essor actuel des nanosciences a pour origine la mise en évidence des propriétés spécifiques de la matière aux dimensions nanométriques. Ceci a suscité de nouveaux champs d'étude dans de très nombreux laboratoires et a permis le développement des fluides aux propriétés originales appelés nano-fluides composés des nanoparticules dont leur diamètre est typiquement inférieur à 100 nanomètre en suspension dans un liquide appelé fluide de base. Les premiers travaux traitant le transfert de chaleur en présence des nano-fluides ont pratiquement commencé en 1995 dans le laboratoire national d'Argonne avec l'étude de Choi, qui ont permis plus tard de déterminer expérimentalement et numériquement leurs propriétés thermo-physiques.

## II.2. Les propriétés thermo-physiques des nano fluides :

Les propriétés thermo-physiques des solutions sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de facteurs ont un effet non négligeable sur cette modification en citant : le type de matériau, la taille et la forme des nanoparticules utilisées

Ainsi que la concentration volumique des particules en suspension et la conductivité du fluide de base. De nombreux groupes de recherche tentent de comprendre quels sont le ou les mécanismes à l'origine de telles différences mais aucune phénoménologie n'a pu être encore formulée de manière concise et satisfaisante. Amina [39]

### II.2.1. La fraction volumique :

C'est la propriété la plus importante pour un nano fluide, elle est définie comme étant le rapport entre le volume des nanoparticules dispersées ) sur le volume total ( $V_T$ ). La valeur de la fraction volumique varie de 0 (fluide de base pur) et 1 (entièrement nanoparticules). La relation est donnée comme suit :

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} \qquad \varphi = \frac{\text{Volume solide}}{\text{Volume totale nanofluide}} = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.2. La masse volumique et la capacité thermique:

La masse volumique et la capacité thermique de nano fluide sont assumées à être des fonctions linéaire de la fraction volumique à une température donnée.

La masse volumique est calculée par une relation classique de Xuan et Roetzel [40] comme suit :

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

### II.2.3. la capacité thermique :

En outre, la chaleur spécifique est définie par deux formules, l'une est celle de Roetzel et Xuan donnée en fonction de la masse volumique, elle est définie comme suit :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (\text{II.3})$$

D'autre part, Pak et Cho [41] présentent la chaleur spécifique des nano-fluides sous l'équation

Suivante :

$$C_{p_{nf}} = (1 - \phi)C_{p_f} + \phi C_{p_p} \quad (\text{II.4})$$

### II.2.4. La conductivité thermique:

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau de conduire ou de transmettre de la chaleur, c'est la propriété la plus importante pour l'amélioration des performances thermique d'un fluide caloporteur, la plupart des recherches théoriques et expérimentales ont été consacré pour estimer la valeur de la conductivité thermique d'un nano-fluide. Cette propriété dépend de multiples paramètres tels que la température de milieu, la conductivité de fluide de base, les propriétés thermo-physiques des nanoparticules, la taille et la forme des particules, le mouvement Brownien et la fraction volumique des particules en suspension. Les études menées dans cet axe ont fourni une riche bibliographie, mais très variée.

**Maxwell** [42] (1881) a étudié théoriquement la conductivité thermique d'un nano-fluide contient uniquement des nanoparticules de forme sphérique. Il a supposé que les particules ont le même diamètre et elles sont séparées d'une distance suffisante conduisant à l'absence d'interaction mutuelle entre elles, la conductivité thermique dans son modèle dépend seulement de la fraction volumique des nanoparticules en suspension, la conductivité thermique de fluide de base et celle des nanoparticules.

$$\lambda_{nf} = \lambda \frac{\lambda_p + 2\lambda_f - 2\phi(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_p)} \quad (\text{II.5})$$

**Bruggeman** [43] (1935) a présenté théoriquement la conductivité thermique d'un nano-fluide contenant des nanoparticules de forme sphérique avec une concentration volumique élevée, il a déclaré la relation suivante dépend des trois variables la conductivité thermique du fluide et des nanoparticules ainsi que la fraction volumique. Ce modèle semble mieux approximer certains résultats expérimentaux pour le cas des nanoparticules sphérique.

$$\lambda_{nf} = \frac{1}{4} \left[ (3\phi - 1)\lambda_p + (2 - 3\phi)\lambda_f \right] + \frac{\lambda_f^2}{4} \sqrt{\Delta} \quad (\text{II.6})$$

Où :

$$\Delta = \left[ (3\phi - 1)^2 \frac{\lambda_p}{\lambda_f} + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \right] \quad (\text{II.7})$$

**Hamilton et Crosser** [44] (1962) ont modifié la formule proposée par Maxwell en introduisant le facteur de forme des nanoparticules. Pour prendre en considération la forme géométrique des nanoparticules, Hamilton et Crosser ont utilisé le coefficient de sphéricité ( $\psi$ ) définit comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. Cette relation est applicable dans le cas où le rapport entre la conductivité thermique des nanoparticules et celle de fluide de base est supérieur à 100.

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_p + (n-1)\lambda_f - \phi(n-1)(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + (n-1)\lambda_f - \phi(\lambda_f - \lambda_p)} \lambda_f \quad (\text{II.8})$$

Où : n est le facteur de forme calculé par la relation empirique donnée par :  $n = \frac{3}{\psi}$

Ce qui conduit à n=3 pour les particules sphérique et n=6 pour les particules cylindrique. Donc dans le cas ou les particules de forme sphérique le modèle de Hamilton est identique à celui de Maxwell.

Par la suite, **Xuan et Li** [40] ont développé le modèle de Hamilton pour estimer la valeur de la conductivité thermique en variant le coefficient de 0.5 à 1, les résultats obtenu dans le cas où  $\psi = 0.7$  est compatible aux résultats expérimentaux. Par contre, Lee et al. Ont trouvé que leurs résultats expérimentaux sont identique à ceux théorique dans le cas où  $\psi = 0.1$  pour le nano-fluide (Alumine/eau).

**Lu et Lin** [45] (1996) ont proposé une nouvelle formule pour n'importe quelle forme des nanoparticules en introduisant des variables dépendant de la conductivité thermique des nanoparticules dispersées, la relation étant donnée comme suit :

$$\lambda_{nf} = [1 + a\phi + b\phi^2] \lambda_f \quad (\text{II.9})$$

$\lambda_p=10$	a = 2.25	b = 2.27
$\lambda_p > 10$	a = 3.00	b = 4.51

**Yu et Choi** [46] (2003) ont proposé une nouvelle formule pour calculer la conductivité d'un nano-fluide. Ils ont proposé de modéliser les nano-fluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. En plus ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique est supérieure à celle du liquide.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \frac{\lambda_p + 2\lambda_f - 2\phi(\lambda_f - \lambda_p)(1 + \beta^2)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_p)(1 + \beta^2)} \quad (\text{II.10})$$

**BHATTACHARYA et al.** [47] (2004) Ont représenté théoriquement une nouvelle relation ressemble à la formule de Xuan and Roetzel définissant la masse volumique d'un nano-fluide, en prenant en considération le mouvement Brownien des particules. On définit le mouvement Brownien autant qu'une description mathématique des déplacements aléatoires des nanoparticules au sein du liquide de base. Ce mouvement est causé par les collisions avec les

molécules du liquide de base qui se déplacent dans toutes les directions sous l'effet de l'excitation thermique. Les nanoparticules sont suffisamment petites pour être poussées par les chocs reçus et elles peuvent alors parcourir une certaine distance (très petite), avant de repartir dans une autre direction suite à de nouveaux chocs et ainsi de suite. Il en résulte un mouvement d'ensemble chaotique que l'on appelle le mouvement brownien. La formule de la conductivité thermique calculée par BHATTACHARYA et al. est exprimée comme suit :

$$\lambda_{nf} = \lambda_p \phi + (1 - \phi) \lambda_f \quad (\text{II.11})$$

**Keblinski et al.** [48] (2005) ont investigué la conductivité de plusieurs nano fluides et les mécanismes contribuant à l'augmentation de cette propriété. Ils ont présenté les relations empiriques suivantes :

$$\text{Pour le nano fluide : EG+ } Al_2O_3 \quad \lambda_{nf} = \lambda_f (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1) \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Pour le nano fluide : eau+ } Al_2O_3 \quad \lambda_{nf} = \lambda_f (-13\phi^2 + 6.3\phi + 1) \quad (\text{II.13})$$

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

**Koo et Kleinstreuer** [49] (2005) ont discuté théoriquement la conductivité thermique d'oxyde de cuivre de 28.8 nm de diamètre dispersées dans l'eau. Ils ont modifié la formule de Maxwell en introduisant le Rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules, la masse volumique, la chaleur spécifique ainsi que le diamètre des nanoparticules et une fonction dépend de la température et la fraction volumique.

$$\lambda_{nf} = \lambda \frac{\lambda_p + 2\lambda_f - 2\phi(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_p)} + 5 \times 10^4 \beta \rho_p C_p \sqrt{\frac{K_B T}{\rho_p d_p}} f(T, \phi) \lambda_f \quad (\text{II.15})$$

Ou les paramètres  $\beta$  et  $f(T, \phi)$  sont donnés comme suit :

$$f(T, \phi) = (134.63 + 1722.3\phi) + (0.4705 - 6.04\phi) \frac{T}{T_0} \quad (\text{II.16})$$

$$\begin{cases} \beta = 0.0137(100\phi)^{-0.8229} & \text{pour } \phi < 0.01 \\ \beta = 0.0011(100\phi)^{-0.7272} & \text{pour } \phi > 0.01 \end{cases}$$

La formule de Koo et Kleinstreuer est valable dans le cas où la fraction volumique des nanoparticules est comprise entre 1 et 4% et la température varie de 300 à 325 K.

**Xue** [50] (2005) a étudié la conductivité thermique d'un nano fluide contenant des nanotubes de carbone, il a discuté l'influence de diamètre des nanoparticules, concluant que la taille des nanoparticules n'influence pas trop sur l'augmentation de la conductivité thermique. Il a établi une formule classique dépend uniquement des trois variables de base la conductivité thermique des nanoparticules et de fluide de base ainsi que la fraction volumique.

$$\lambda_{nf} = \frac{1 - \phi + 2\phi \frac{\lambda_p}{\lambda_p - \lambda_f} \ln \frac{\lambda_p + \lambda_f}{2\lambda_f}}{1 - \phi + 2\phi \frac{\lambda_f}{\lambda_p - \lambda_f} \ln \frac{\lambda_p + \lambda_f}{2\lambda_f}} \quad (\text{II.17})$$

**Li et Peterson** [51] (2006) ont expérimentalement étudié l'influence de la variation de température ainsi que la fraction volumique des nanoparticules en suspension sur la conductivité thermique de deux nano fluides Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / eau et CuO / eau. Pour effectuer cette étude les diamètres des Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et CuO étaient prise 29 et 36nm respectivement suspendu dans l'eau distillé avec une fraction volumique de 2, 4, 6 et 10%. Ils ont proposé deux formules différentes pour chaque nano fluide.

$$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{eau} : \quad \lambda_{nf} = \lambda_f [0.764\phi + 0.0187(T - 371.15) - 0.462] + \lambda_f \quad (\text{II.18})$$

$$\text{CuO} / \text{eau} : \quad \lambda_{nf} = \lambda_f [3.761\phi + 0.0179(T - 371.15) - 0.307] + \lambda_f \quad (\text{II.19})$$

**Timofeeva et al.** [52] (2007) Ont étudié expérimentalement et théoriquement la conductivité thermique de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans l'eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans l'éthylène glycol, ils ont rapporté une corrélation qui dépend seulement de la conductivité thermique du fluide de base et la concentration volumique de l'alumine suspendu.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f (1 + 3\phi) \quad (\text{II.20})$$

**Avsec et Oblak** [53] (2007) ont expérimentalement investigué la conductivité thermique de trois différents nano-fluides : l'alumine dans l'eau, le cuivre dans l'éthylène glycol et le dioxyde de titanium dans l'eau, la formule proposée par Avsec et Oblack est une extension de la formule de Hamilton et Crosser ainsi que le modèle de Yu et Choi.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \frac{\lambda_p (n-1)\lambda_f - (n-1)\phi(\lambda_f - \lambda_p)(1+\beta)^3}{\lambda_p + (n-1)\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_p)(1+\beta)^3} \quad (\text{II.21})$$

**Duangthongsu et Wongwises** [54] (2009) ont expérimentalement discuté l'influence de la température sur la conductivité thermique des nanoparticules de dioxyde de titanium de forme sphérique et de diamètre  $d_p=21\text{nm}$  dispersée dans l'eau. Ils ont formulé les relations suivantes dépendant de la fraction volumique ainsi que des coefficients varient en fonction de la température.

$$\lambda_{nf} = (a + b\phi)\lambda_f \quad (\text{II.22})$$

T = 15°C	a = 1.0225	b = 0.0272
T = 25°C	a = 1.0204	b = 0.0249
T = 35°C	a = 1.0139	b = 0.0250

**Patel et al.** [55] (2010) Ont expérimentalement étudié l'influence de la température et la taille des nanoparticules, en utilisant des nanoparticules de forme sphérique de diamètre, ils ont proposé une corrélation de la conductivité thermique d'un nano-fluide valable pour une température comprise entre 293 et 323K, et une fraction volumique varie de 0.1 à 3%.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \left( 1 + 0.135 \left( \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \right)^{0.273} \left( \frac{T}{20} \right)^{0.547} \left( \frac{100}{d_p} \right)^{0.234} \beta^{0.467} \right) \quad (\text{II.23})$$

**Godson et al.** [56] (2010) Ont expérimentalement mesuré la conductivité thermique de nano-fluide contenant des nanoparticules métallique (Argent) suspendu dans l'eau. Ils ont exprimé la conductivité thermique en fonction de la fraction volumique et la conductivité thermique du fluide.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f (0.9692\phi + 0.9508) \quad (\text{II.24})$$

**Corcione et al.** [57] (2011) Ont présenté une corrélation pour la prédiction de la conductivité d'un nano-fluide contenant des nanoparticules de type métallique ou oxyde métallique dispersées soit dans l'eau ou dans l'éthylène glycol. La plage de température, diamètre des nanoparticules ainsi que la fraction volumique étaient respectivement : 294-324 K, 10-150

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \left( 1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \left( \frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left( \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \right)^{0.03} \beta^{0.66} \right) \quad (\text{II.25})$$

Où :  $\text{Re} = \frac{2K_B \rho_f T}{\pi \mu_f^2 d_p}$  et  $T_{fr}$  est la température de fusion de fluide de base.

**Azmi et al.** [58] (2012) Ont développé une nouvelle corrélation pour les nano-fluides qui contiennent des nanoparticules d'oxyde métallique incorporées dans l'eau, cette formule est valable pour une concentration volumique inférieur à 4% et une température comprise entre 293 et 343K.

$$\lambda_{nf} = 0.8938 \lambda_f \left( 1 + \frac{\phi}{100} \right)^{1.37} \left( 1 + \frac{T}{70} \right)^{0.2777} \left( 1 + \frac{d_p}{150} \right)^{-0.0336} \left( \frac{\alpha_p}{\alpha_f} \right)^{0.01737} \quad (\text{II.26})$$

Dont la température est exprimée en °C et la fraction volumique en %.

### II.2.5. La viscosité dynamique :

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler, c'est un paramètre important pour les applications pratiques car elle affecte directement la chute de pression à convection forcée. L'ajout de particules solides dans un liquide provoque une augmentation, plus ou moins importante de la viscosité du mélange obtenu. Là encore, de nombreux facteurs peuvent être à l'origine des disparités constatées. Pour des nanoparticules identiques (nature, taille) et un même fluide de base, la qualité de la dispersion, et la température peuvent influencer considérablement sur la viscosité. Par conséquent, pour permettre l'utilisation de nano-fluides dans des applications pratiques, le degré d'augmentation de la viscosité des nano-fluides par rapport aux fluides purs doivent être soigneusement étudiée. Afin d'expliquer l'effet des nanoparticules sur la viscosité, de nombreuses corrélations ont été présentées.

**Einstein** [59] (1906) a été le premier qui a étudié la viscosité dynamique d'un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides en faible concentration volumique (moins que 0.02). La relation est présentée comme suit :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi) \quad (\text{II.27})$$

**Brinkman** [60] (1952) a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de

Concentrations volumiques. Sa relation conduit à la relation d'Einstein pour les faibles fractions volumique.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 + \phi)^{2.5}} \quad (\text{II.28})$$

Ces deux premières relation n'intègre pas les effets de mouvement Brownien ni de la taille des nanoparticules en suspension.

**Batchelor** [61] (1977) a étudié théoriquement la viscosité dynamique d'un nano-fluide en tenant en compte l'effet de l'interaction hydrodynamique entre deux nanoparticules sphériques, il a montré que la viscosité dynamique d'un nano-fluide n'est pas une fonction linéaire de la fraction volumique comme les relations de « Einstein et Brinkman ».

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2) \quad (\text{II.29})$$

**Wang et al.** [62] (1999) Ont expérimentalement discuté la viscosité dynamique d'un nano-fluide se composant de l'eau comme fluide de base et des nanoparticules d'alumine, ils ont confirmé la proposition de Batchelor en présentant l'équation suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad (\text{II.30})$$

**Tseng et Lin** [63] (2003) ont mené une étude expérimentale pour mesurer la viscosité de deux nano-fluides Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ éthylène glycol et TiO<sub>2</sub>/ eau. Leur formule prend la forme exponentielle suivante :

$$\mu_{nf} = 13.47\mu_f \exp(35.98\phi) \quad (\text{II.31})$$

**Maiga et al.** [64] (2005) Ont présenté expérimentalement la viscosité dynamique des nanoparticules d'alumine dispersées dans l'eau et dans l'éthylène glycol. La corrélation de la viscosité dynamique du nano fluide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ eau) était identique à l'équation (I.33) pour l'autre nano fluide la relation s'identifie comme suit :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - 0.19\phi + 306\phi^2) \quad (\text{II.32})$$

**Song et al.** [65] (2005) Ont calculé la viscosité dynamique du nano-fluide (SiO<sub>2</sub>/ eau), ils ont montré que la viscosité dynamique d'un nano-fluide est une fonction linéaire de la fraction volumique.

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 56.5\phi) \quad (\text{II.33})$$

**Kulkarni et al.** [66] (2006) Ont étudié l'influence de la température sur la viscosité d'un nano-fluide contenant des nanoparticules d'oxyde de cuivre dispersées dans l'eau, ils ont proposé une relation valable dans une gamme de température variant de 5 à 50°C.

$$\mu_{nf} = \exp \left[ -(2.8751 + 53.548\phi - 107.12\phi^2) + (1078.3 + 15857\phi + 20587\phi^2) \frac{1}{T} \right] \quad (\text{II.34})$$

**Buongiorno** [67] (2006) a estimé la viscosité dynamique de deux nano-fluides ( $Al_2O_3$ /eau) et ( $TiO_2$ /eau) en concluant deux corrélations non-linéaire de la fraction volumique définit comme suit :

$$\text{Pour le nano fluide : } TiO_2/\text{eau} \quad \mu_{nf} = \mu_f (1 + 5.45\phi + 108.2\phi^2) \quad (\text{II.35})$$

$$\text{Pour le nano fluide : } TiO_2/\text{eau} \quad \mu_{nf} = \mu_f (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2) \quad (\text{II.36})$$

**Nguyen et al.** [68] (2007) Ont étudié l'influence de la taille des nanoparticules sur la viscosité dynamique d'un nano-fluide contenant  $Al_2O_3$  en variant leurs diamètre  $d_p$ , ils ont présenté deux formules différentes montrant l'effet de la taille des nanoparticules sur la viscosité effective.

$$\mu_{nf} = 0.904\mu_f \exp(0.1483\phi) \quad \text{Pour } d_p = 47nm$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 0.025\phi + 0.015\phi^2) \quad \text{Pour } d_p = 36nm$$

**Duangthongsu et Wongwises** [54] (2009) ont discuté l'effet de la variation de température sur la viscosité dynamique de  $TiO_2$  suspendu dans l'eau, en changeant la température de 15 à 35°C.

$$\mu_{nf} = \mu_f (a + b\phi + c\phi^2) \quad (\text{II.37})$$

T = 15°C	a = 1.0226	b = 0.0477	c = -0.0112
T = 25°C	a = 1.0130	b = 0.0920	c = -0.0150
T = 35°C	a = 1.0180	b = 0.1120	c = -0.0177

**Chandrasekar et al.** [69] (2010) Ont investigué expérimentalement et théoriquement la viscosité dynamique de (alumine/ eau) nano-fluide, en contribuant les aspects électromagnétique et mécanique ils ont conclu la formule suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f + 1631\mu_f \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^{2.8} \quad (\text{II.38})$$

**Corcione** [57] (2011) Ont présenté expérimentalement la viscosité dynamique d'un nano-fluide contenant des nanoparticules de dioxyde de silicium dispersées des l'éthanol. Le diamètre des nanoparticules ainsi que la fraction volumique étaient respectivement : 10-150 nm, 0.2 à 9%.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{1 - 34.87 \left( \frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{-1.03}} \quad (\text{II.39})$$

Où :  $d_f$  est le diamètre moléculaire du fluide de base donné par la relation

$$d_f = 0.1 + \left( \frac{6M}{N\pi\rho_f} \right)^{\frac{1}{3}}$$

On donne :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{1 - 34.87 \left( \frac{d_p}{0.1 + \left( \frac{6M}{N\pi\rho_f} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)^{-0.3} \phi^{-1.03}}$$

**Masoumi et al.** [70] (2009) Ont expérimentalement mesuré la viscosité du nano-fluide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/eau) en prenant en compte l'effet de mouvement Brownien, ils ont proposé l'expression suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72C\delta} \quad (\text{II.40})$$

Où : C'est une constante et  $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi}} d_p$

On donne

$$\mu_{nf} = \mu_f + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72C \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi}} d_p}$$

**Koo et Kleinstreuer** [49] (2005) ont étudié expérimentalement et théoriquement la viscosité dynamique d'oxyde de cuivre de 28.8 nm de diamètre dispersées dans l'eau, en prenant en considération l'effet de l'agitation Brownienne et l'épaisseur de la couche nanométrique (mentionné dans [38]).

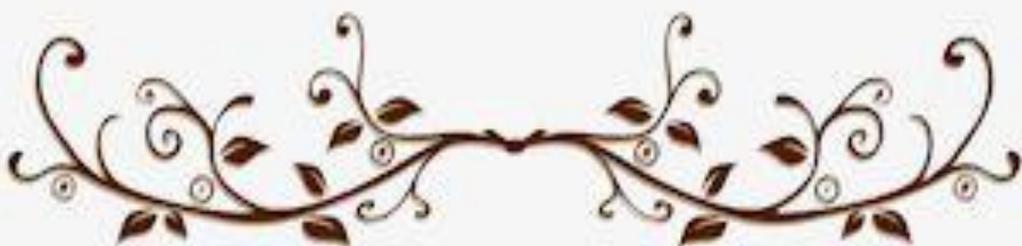
$$\mu_{nf} = 5 \times 10^4 \beta \rho_f \phi \sqrt{\frac{K_B T}{\rho_p d_p} \left[ (-134.63 + 1722.3\phi)(0.4705 - 6.04\phi) \frac{T}{T_0} \right]} \quad (\text{II.42})$$

### II.3.Conclusion :

L'utilisation de nano-fluides en tant que fluide caloporteur est un nouveau domaine qui est encore en phase de recherche. Les nano-fluides contribuent à l'amélioration du transfert thermique de plusieurs dizaines de pour-cent, l'augmentation du transfert thermique a une dépendance directe de type, taille et la concentration volumique des nanoparticules utilisé. Néanmoins, compte tenu des diverses méthodes de synthèse et de caractérisation, les résultats expérimentaux ne sont pas reproductibles entre les différents groupes de recherche travaillant sur le sujet



**Chapitre III :**  
**Modélisation et position du**  
**problème**



### III.1. Introduction :

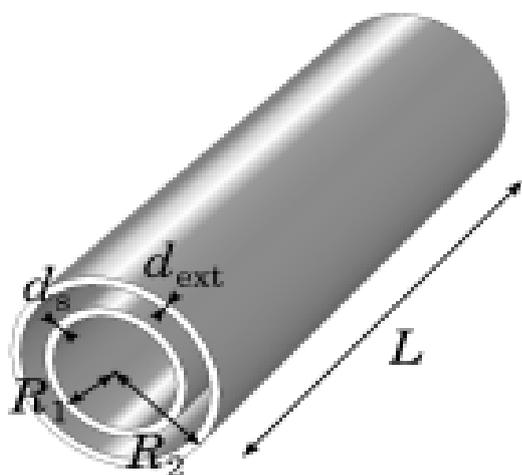
Trouver les bonnes dimensions pour un échangeur de chaleur est impératif pour assurer son efficacité. D'autres propriétés doivent également être prises en compte afin de concevoir un échangeur de chaleur de la bonne taille et fournissant un fluide chauffé ou refroidi de la bonne température.

L'application Échangeur de chaleur à tubes concentriques calcule ces quantités pour un échangeur de chaleur composé de deux tubes concentriques. Les fluides peuvent circuler en parallèle ou à contre-courant.

Les propriétés du fluide, les caractéristiques de transfert de chaleur et les dimensions de l'échangeur de chaleur peuvent toutes être modifiées. L'interface multi physique à flux non iso thermique , qui comprend un flux turbulent, est utilisée pour modéliser le transfert de chaleur.

### III.2. Modèle géométrique :

Notre modèle géométrique est un échangeur de chaleur à tubes concentriques présenté dans la figure (III.1) dont les dimensions sont illustrées dans le tableau (III.1)



Désignation	Valeur	Description
<b>Ri</b>	0,025 m	Rayon du tube intérieur
<b>Re</b>	0,04 m	Rayon du tube extérieur
<b>L</b>	10 m	Longueur du tube
<b>Di</b>	0,001 m	Épaisseur du tube intérieur
<b>De</b>	0,001 m	Épaisseur du tube extérieur
<b>S</b>	1,58 m	Surface d'échange thermique

Figure III. 1.model géométrique d'échangeur de chaleur à tube concentrique.

Tableau III. 1..Dimensions du modèle géométrique d'échangeur à tubes concentriques étudié.

### III.3 CONDITIONS AUX LIMITES :

Les conditions aux limites sont présentées dans le tableau suivant

Prénom	Expression	Valeur	La description
<b>Ti</b>	360 [K]	360 K	Température d'entrée intérieure
<b>Te</b>	300 [K]	300 K	Température d'entrée externe
<b>mi</b>	0,1 [kg / s]	0,1 kg / s	Débit massique interne
<b>me</b>	0,25 [kg / s]	0,25 kg / s	Débit massique externe
<b>pi</b>	2 [bar]	2E5 Pennsylvanie	Pression absolue de sortie intérieure
<b>Pe</b>	2 [bar]	2E5 Pennsylvanie	Pression absolue à la sortie externe

Tableau III. 2 Les conditions aux limites.

### III.3.MATÉRIAUX :

#### III.3.1.Fluide intérieur :

Le fluide qui circule dans le tube intérieur est de l'eau avec les caractéristiques thermo physiques suivantes :

DESIGNATION	Conductivité k [w/(m.k)]	Masse volumique $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosité dynamique $\mu$ [Pa.s]	Chaleur spécifique [J/(kg.k)]	Cp
L'eau	0.6	1000	4200	3.296e-4	

Tableau III. 3.Les caractéristiques thermo-physiques de l'eau.

#### III.3.2. Fluide extérieur :

Nous avons pris en premier lieu de l'eau comme fluide du tube extérieur que nous avons remplacé par un nano fluide (nanoparticules + eau). Nous avons pour notre étude choisis un exemple de chaque type de nanoparticules présenté dans le chapitre précédent.

Les nanoparticules (associées à l'eau) étudiées sont :

-Un oxyde métallique : l'alumine  $Al_2O_3$

-Un métal : le cuivre

-Les nano tubes de carbone :NTC.

Leurs caractéristiques thermo-physiques (tableau III) sont calculées à partir de la théorie de BHATTACHARYA pour une fraction volumique  $\phi = 8\%$ .

DESIGNATION	Conductivité k [w/(m.k)]	Masse volumique $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosité dynamique $\mu$ [Pa.s]	Chaleur spécifique Cp [J/(kg.k)]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +EAU	3.432	1232	3.9552E-4	3837.2
Cu+eau	32.632	1636.8	3.9552 <sup>E</sup> -4	3843.7
NTC+EAU	160.55	1096	3.9552 <sup>E</sup> -4	3698.9

Tableau III. 4.Caractéristiques thermo-physiques des différent nano-fluide.

### III.3.3.Les tubes :

Le matériau des tubes est de cuivre de construction avec les caractéristiques données dans le tableau III.

DESIGNATION	Conductivité k [w/(m.k)]	Masse volumique $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Chaleur spécifique Cp [J/ (kg.k)]
cuivre	401	8933	383

Tableau III. 5.Caractéristiques thermo-physiques de cuivre .

### III.4.MAILLAGE :

1017511 éléments quadrilatéraux libres ont été utilisés pour la discrétisation de notre model.

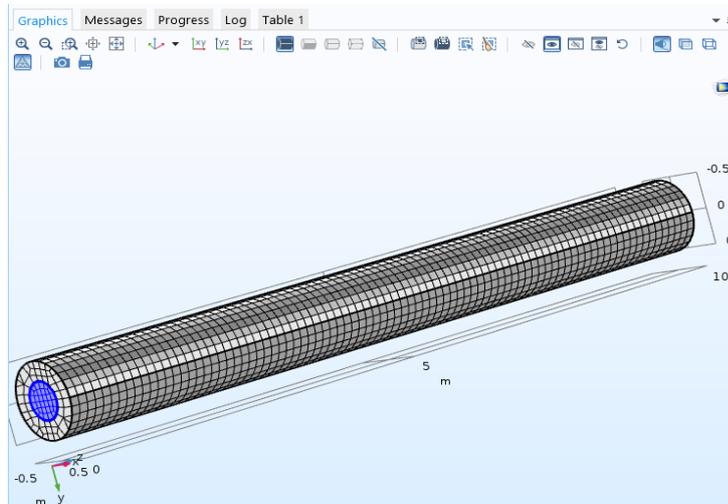


Figure III. 2 Maillage de notre tube conconrique.

### III.5.Description du problème :

#### III.5.1.Hypothèses :

- ✓ écoulement incompressible et newtonien.
- ✓ régime permanant.
- ✓ les propriétés thermo physiques ne changent pas dans l'intervalle de températures considéré.
- ✓ les forces de volume sont négligeables.
- ✓ Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

Le phénomène étudié dans notre travail est un phénomène multi physique .il s'agit d'une part de l'écoulement d'un fluide dans un tube et d'autre part d'un phénomène d'échange de chaleur entre les deux fluides à travers le tube interne. Les équations régissant le phénomène sont les équations de base de Navier-Stokes, l'équation de conservation de la masse et l'équation de conservation de l'énergie.

**III.5.2. Les équations du problème :****III.5.2.1 Régime laminaire :****III.5.2.1.1. L'équation de quantité de mouvement (Navier-Stokes) :**

-Selon r :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}u_r)}{\partial t} + \frac{\partial(u_r \bar{\rho}u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z \bar{\rho}u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}$$

-selon z :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}u_z)}{\partial t} + \frac{\partial(u_r \bar{\rho}u_z)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z \bar{\rho}u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{zz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}$$

**III.5.2.1.2. L'équation de continuité :**

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\bar{\rho}ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_z)}{\partial x_z} = 0$$

**III.5.2.1.3. L'équation d'énergie :**

$$\frac{\partial(\bar{\rho}E)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \bar{\rho}H)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z \bar{\rho}H)}{\partial z} = \frac{\partial(\bar{\sigma}_{ir}u_i + \bar{\sigma}_{rr}u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\bar{q}_r + C_p \bar{\rho}u_r T' - u_i \tau_{ij} + \frac{1}{2} \bar{\rho}u_j u_i u_j)}{\partial r}$$

**III.5.2.2. Régime turbulent :****III.5.2.2.1. L'équation de continuité :**

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_j)}{\partial x_j} = 0$$

## III.5.2.2.2.L'équation de quantité de mouvement :

-selon r :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}u_r)}{\partial t} + \frac{\partial(u_r \bar{\rho}u_r)}{\partial r} = \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}$$

-selon z :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}u_z)}{\partial t} + \frac{\partial(u_r \bar{\rho}u_z)}{\partial r} = \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{zz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}$$

## III.5.2.2.3.L'équation d'énergie :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}E)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \bar{\rho}H)}{\partial x_j} = \frac{\partial(\bar{\sigma}_{ij}u_i + \overline{\sigma_{ij}u_i})}{\partial x_j} - \frac{\partial(\bar{q}_j + C_p \overline{\rho u_j T} - u_i \tau_{ij} + \frac{1}{2} \overline{\rho u_j u_i u_j})}{\partial x_j}$$

$$H = E + \bar{P} / \bar{\rho}$$

$$\bar{q}_j = -k_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \approx -\frac{C_p \mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

$$\bar{\sigma}_{ij} \approx 2\mu \left( S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)$$



# Chapitre IV :

## Résoltats et discussions



### IV.1. Introduction :

Nous présentons et discutons dans ce chapitre les résultats de notre étude numérique réalisé grâce au code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS version 5.3a .L'objectif de ce travail est de montrer l'efficacité de l'utilisation des nano-fluides comme fluide caloporteur dans l'intensification du transfert convectif au sein des échangeurs de c

haleur. Pour cela notre étude paramétrique débutera par une comparaison entre les différents modèles de calcul des propriétés thermo-physique ,nous verrons par la suite l'influence de la fraction volumique des nanoparticules dans les performance de notre échangeur de chaleur .par la suite la variation du débit et donc du nombre de Reynolds et son influence sur le flux thermique échangé ainsi que sur les pertes de charges sont misent en évidences .une dernière partie est consacrée à l'effet la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide) dans l'amélioration des qualités de notre échangeur.

**VI.2. VERIFICATION DE L'AMELIORATION DU TRANSFERT CONVECTIF PAR LES NANOFLUIDES :**

Dans cette première partie de notre étude on considère d'une part l'échangeur concentrique travaillant à contre-courant avec de l'eau pure comme fluide chaud (tube interne) et fluide froid (tube externe) et de l'autre part le même échangeur avec de l'eau pure comme fluide chaud (tube interne) et un nano-fluide (eau+ Cu) comme fluide froid (tube externe).

Les résultats des simulations (COMSOL) sont les suivantes :

La figure VI.2.1. Montre le profil des températures des deux tubes le long de l'échangeur.

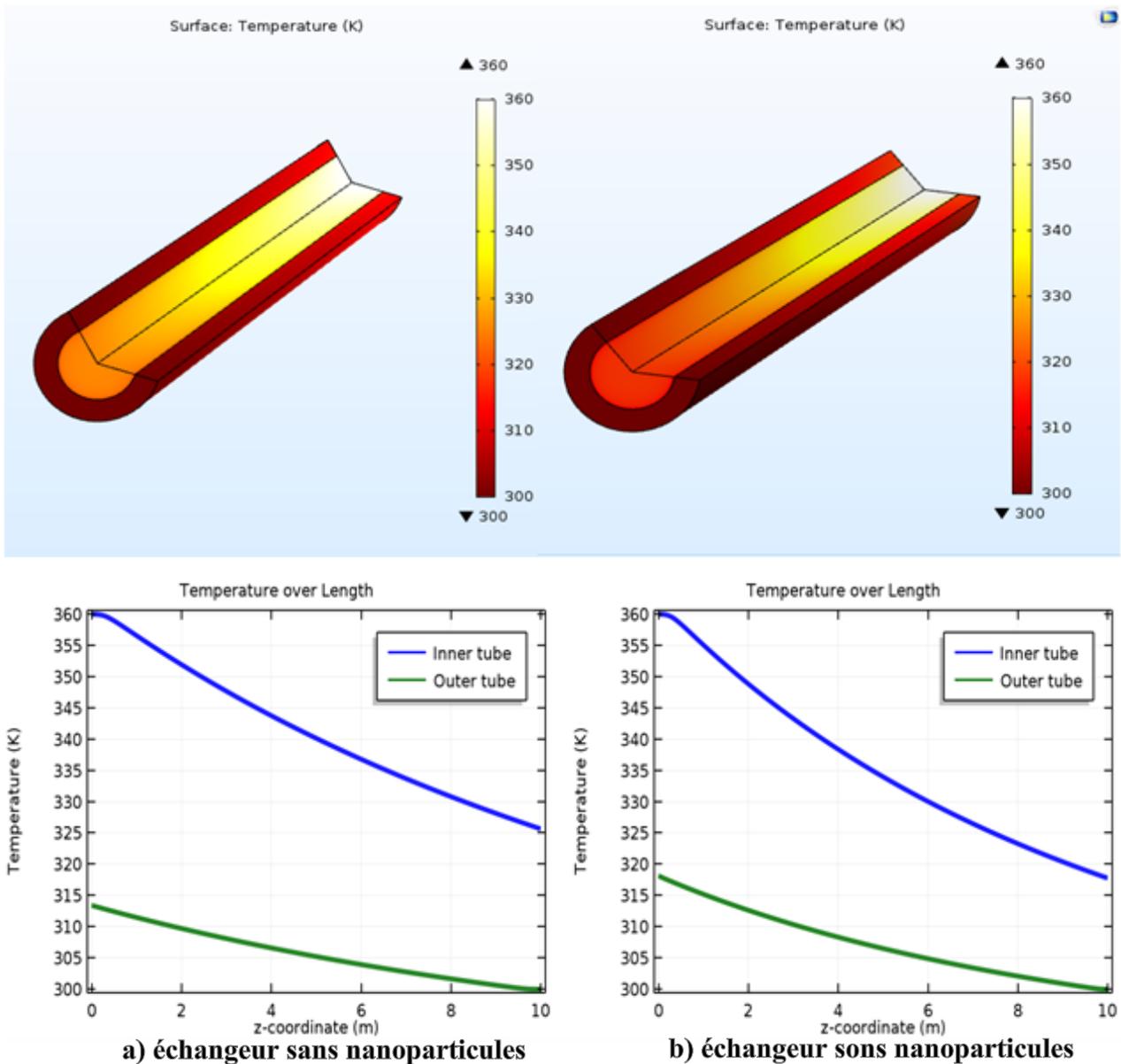


Figure IV. 2.1. Profil des températures des deux fluides (chaud et froid) le long de l'échangeur.

En examinant les deux graphes obtenu dans cette étude nous pouvons affirmer d'une part que la présence de nano particule dans le fluide de base(eau pur) fait augmenter notablement le transfert de chaleur(convectif) dans l'échangeur par rapport au fluide de base (eau pur).

La figure IV.2.2 Montre les pertes des charges dans les deux tubes de l'échangeur concentrique dans les deux cas étudiés (avec et sans nano-fluide)

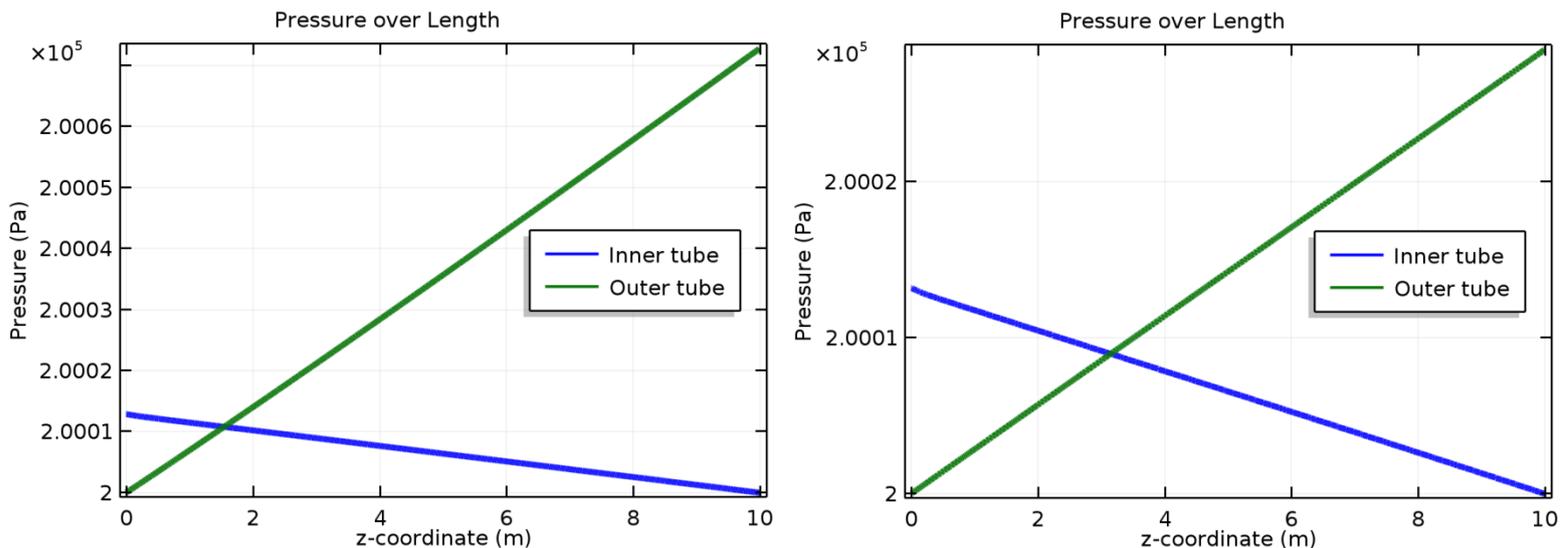


Figure IV.2.2.évolution des pertes de charges le long des deux tubes de l'échangeur.

On remarque que les pertes de charge pour le fluide chaud (tube interne) dans les deux cas (échangeurs) (avec et sans nano-fluide) sont presque les mêmes, par contre pour le fluide froid (tube externe) la perte de charge pour l'échangeur à nano-fluide est considérablement inférieure à celle relevée pour l'échangeur sans nano-fluide.

### IV.3. COMPARAISON ENTRE DIFFERENTS MODELES DE CALCUL DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUE :

Nous débutons notre étude par une comparaison entre quelques modèles de calcul des propriétés thermo-physique à savoir :

- la théorie de MAXWELL
- la théorie de HAMILTON
- Et la théorie de BHUTTACHARYA

La figure IV.3.1. Montre la variation du flux de chaleur échangé entre les deux fluides en fonction de la fraction de volume ( $\phi$ ) pour différentes théories de calculs des nano-fluides.

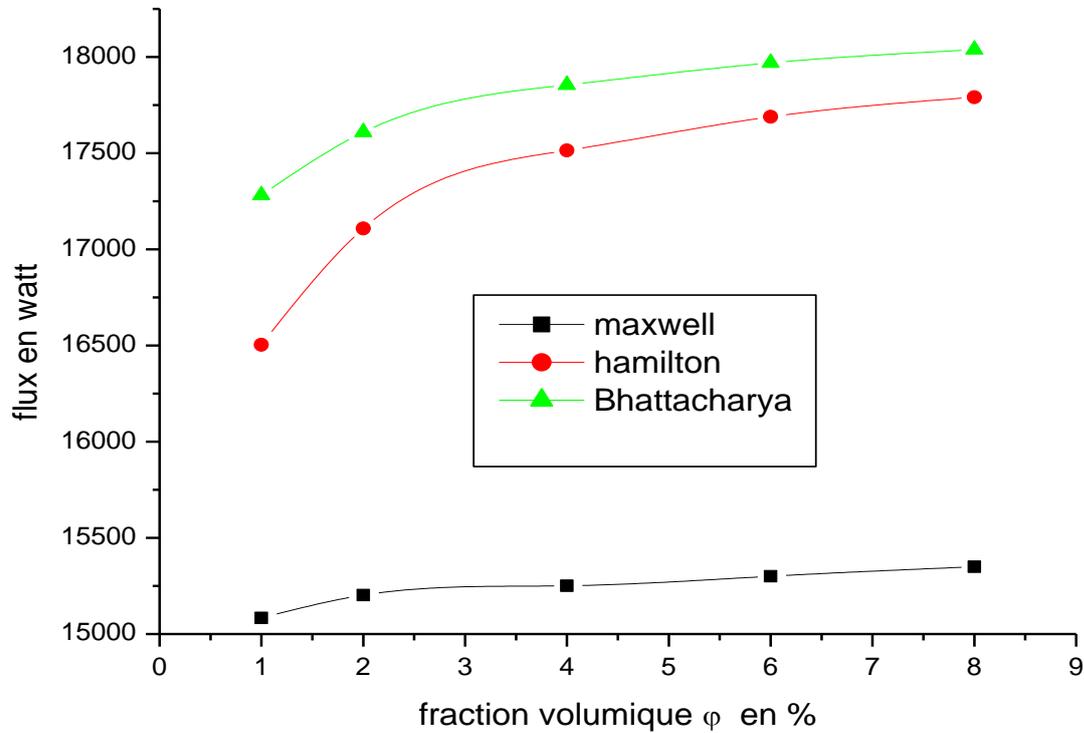


Figure IV. 3.1.Profils des flux de chaleur échangés en fonction de la fraction volumique pour différentes théories de calcul.

On remarque nettement qu'on obtient un meilleur échange thermique en considérant la théorie de BHATTACHARYA d'autant plus que les trois théories donnent presque les mêmes pertes de charges ( $\Delta p$  allant de 28 jusqu'à 42 Pa) coté froid et chaud (figure IV.3.2) ce qui est logique puisque le modèle de calcul de BHATTACHARYA donne la meilleure conductivité thermique pour notre nano fluide.

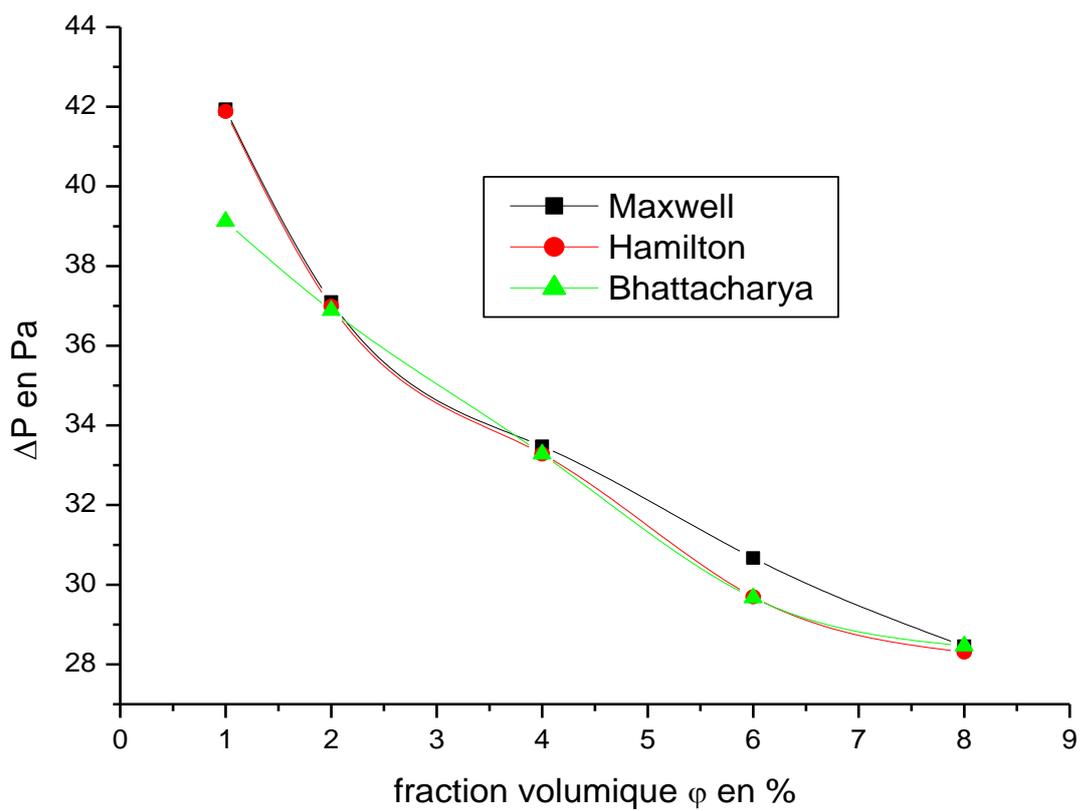


Figure IV. 3.2.Évolution des pertes de charge en fonction de la fraction volumique pour différents modèle de calcul.

La figure IV.3.3 montre la variation du coefficient d'échange globale  $U$  en fonction de la fraction volumique pour différents modèles de calcul des nano-fluides.

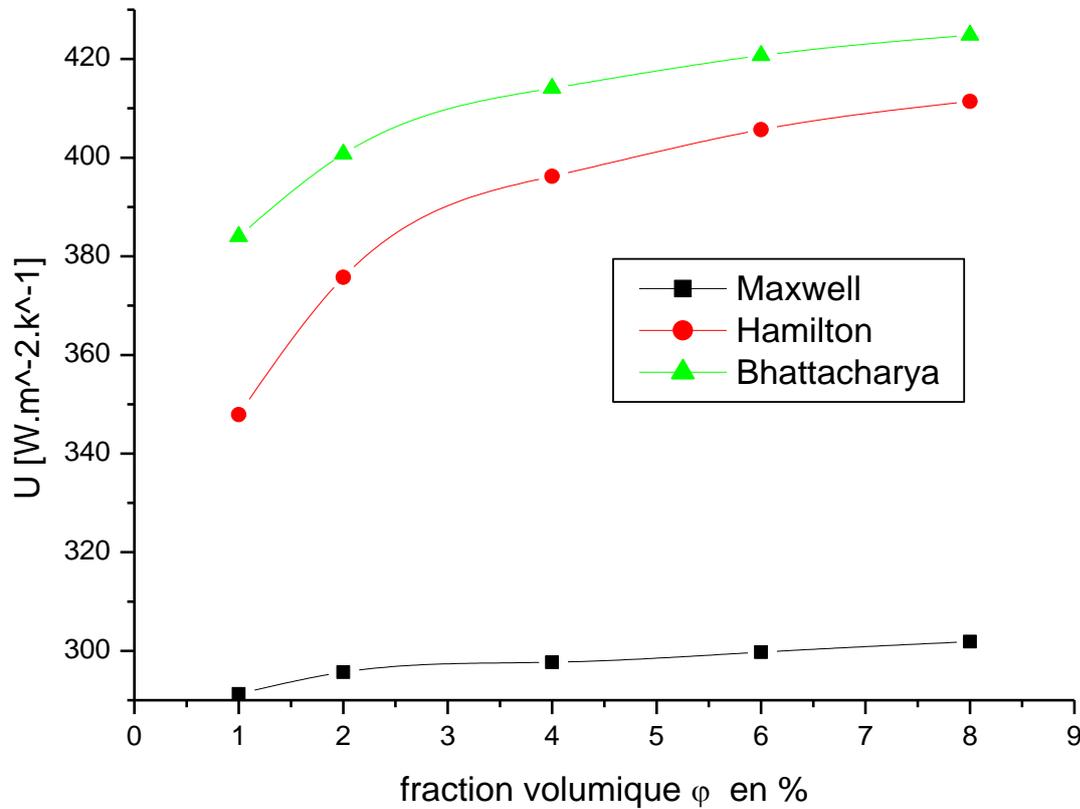


Figure IV. 3.3. Variation de coefficient d'change global en fonction de la fraction volumique pour différentes théorie de calcul

Comme pour la courbe du flux échangé le modèle de calcul de BHATTACHARYA présente le meilleur coefficient d'échange global  $U$  par rapport aux autres modèles. Ce qui implique que nous aurons les meilleures performances de notre échangeur si nous considérons cette théorie.

Par contre on remarque que l'inverse se produit pour le  $\Delta TLM$  puisque ses plus hautes valeurs ( $\Delta TLM = 32$  à  $33$  K) sont relevés pour la théorie de Maxwell (figure VI.3.4).

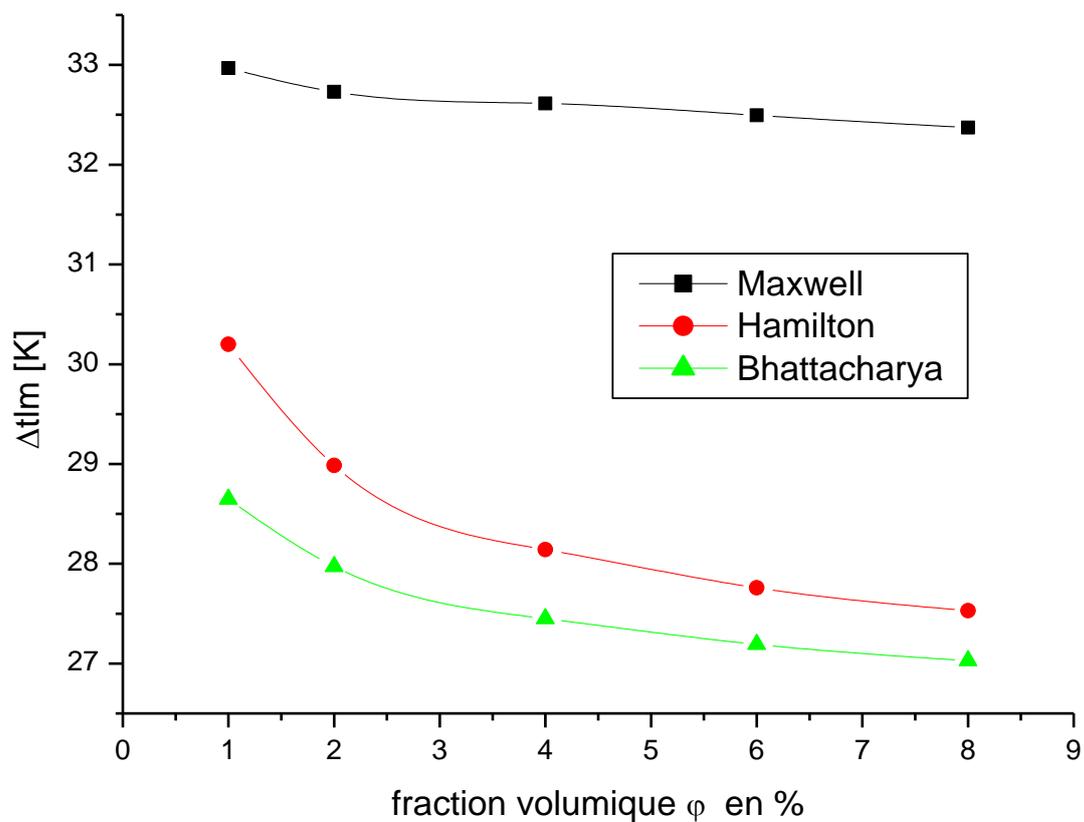


Figure IV.3.4. Variation de  $\Delta T_{LM}$  en fonction de la fraction volumique pour différentes théorie de calcul.

#### IV.4. EFFET DU NOMBRE DE REYNOLDS :

Dans cette partie nous allons voir l'effet du nombre de Reynolds (donc du débit du fluide froid [nano-fluide]) sur le rendement de notre échangeur.

L'étude est faite pour des nanoparticules en cuivre à une fraction volumique de 8% associées à l'eau pour cinq valeurs du nombre de Reynolds (à savoir  $10$ ,  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^4$ , et  $10^5$ ).

La figure VI.4.1 montre la variation du flux échangé en fonction du nombre de Reynolds. On remarque clairement que l'échange convectif est meilleur en régime turbulent qu'en régime laminaire. Ce qui confirme le fait que le coefficient d'échange convectif ( $h$ ) en régime turbulent est supérieur à celui du régime laminaire. Le flux de chaleur échangé passe de quelque centaine de watt en régime laminaire à environ 55000 watt pour un régime turbulent.

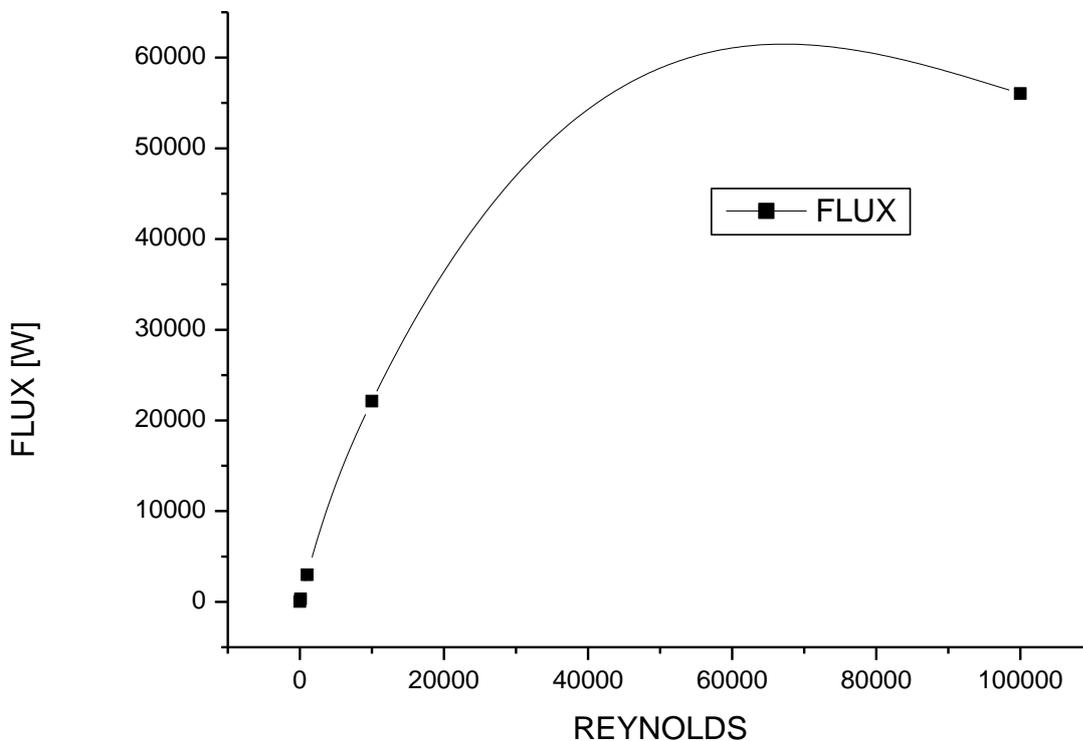


Figure IV. 4.1. Variation du flux de chaleur échangé en fonction du nombre de Reynolds ( $\phi=8\%$ ).

### IV.5. EFFET DE LA TEMPERATURE :

Nous considérons dans ce cas le même échangeur de chaleur travaillant toujours à contre-courant avec la même température d'entrée du fluide chaud (eau pure) et varions la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide= eau +nanoparticules de cuivre) à une fraction volumique de 8%.

La figure IV.5.1. Montre l'influence de la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide) sur le flux de chaleur échangé .il est clair que si on diminue l'écart des deux températures d'entrée (fluide chaud et froid) la quantité de chaleur échangée va diminuée, chose que l'on remarque sur la figure .

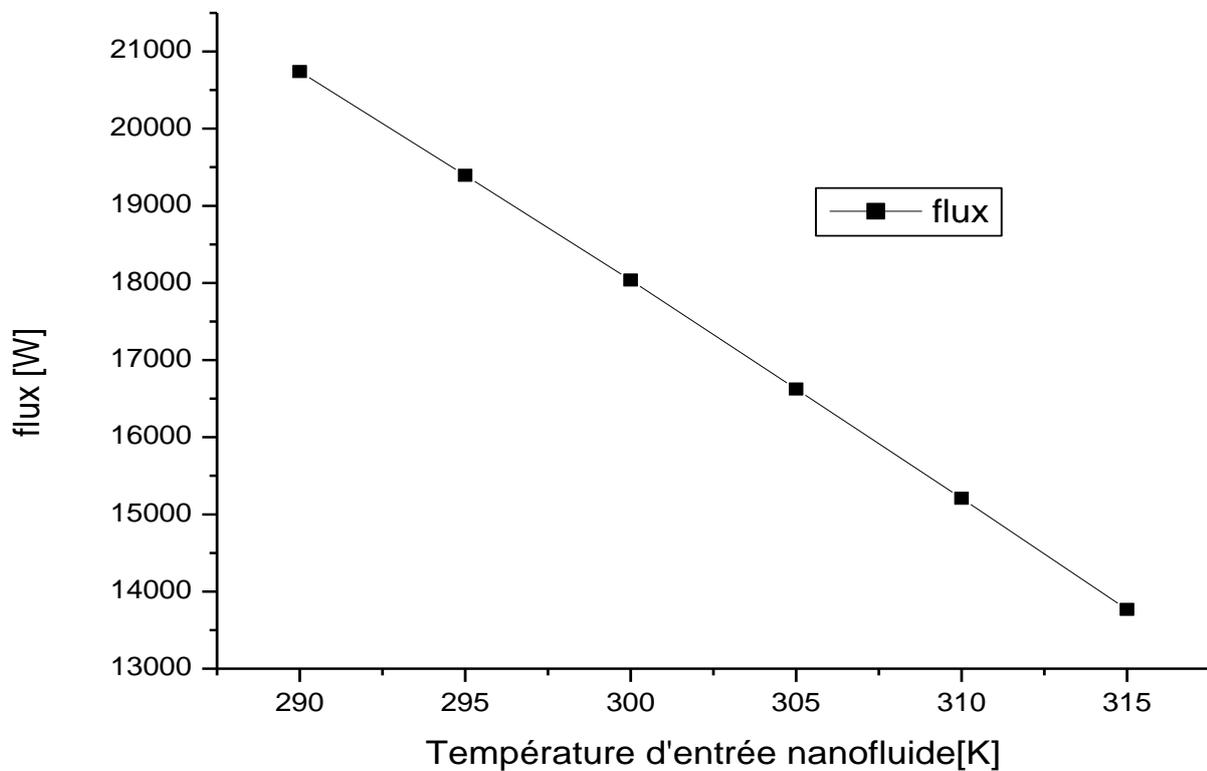


Figure IV. 5.. Variation du flux échangé en fonction de la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide).

La figure IV.5.2. Montre l'influence de la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide) sur le coefficient d'échange globale de notre échangeur.

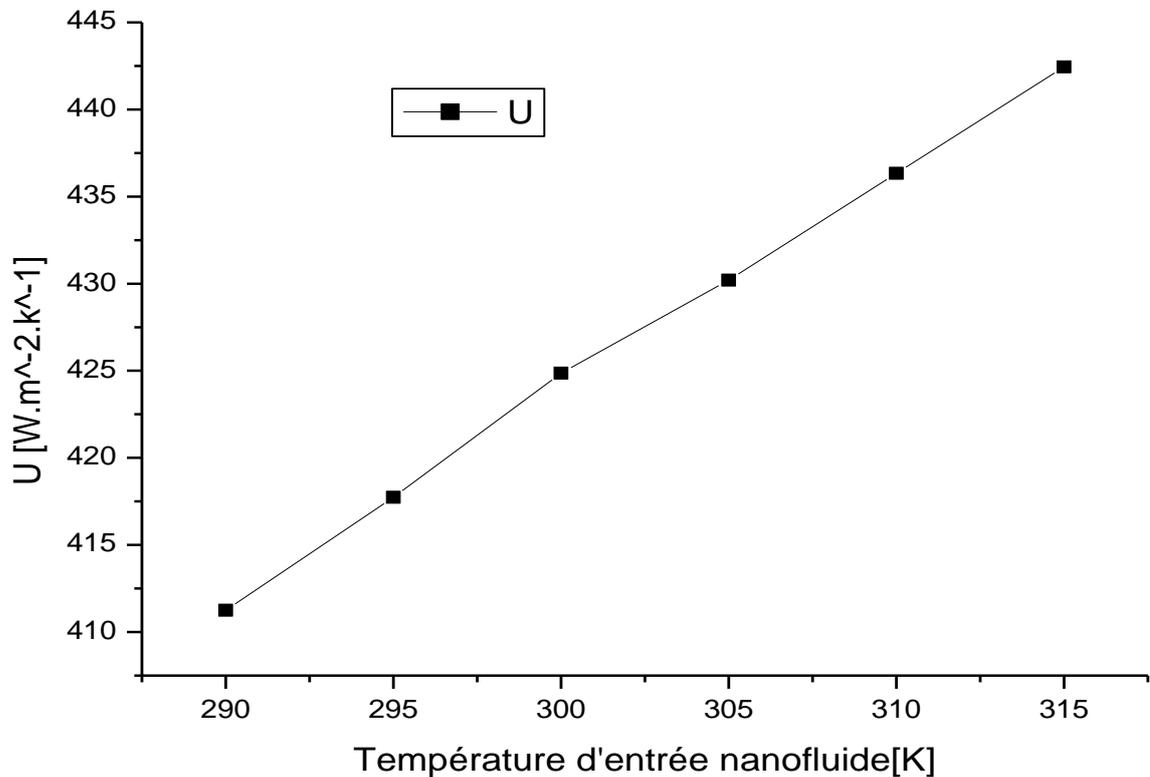


Figure IV. 5.2. Montre l'influence de la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide) sur le coefficient d'échange globale de notre échangeur.

On remarque que la diminution de l'écart des deux températures d'entrée (coté chaud et coté froid) implique une augmentation du coefficient d'échange globale

La figure IV.5.3. Montre l'influence de la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide) sur la différence logarithmique moyenne de la température  $\Delta T_{LM}$ .

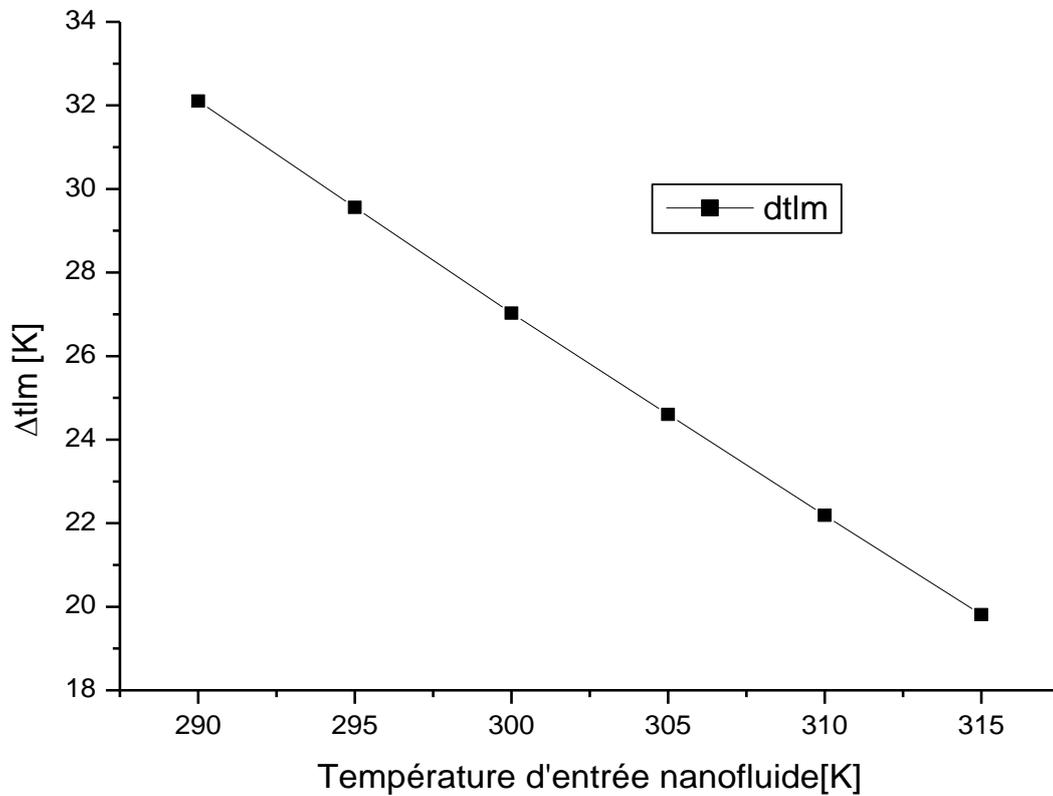


Figure IV. 5.3. Variation de la différence logarithmique moyenne de la température DTLM par rapport à la température d'entrée du fluide froid(nano-fluide).

Comme pour le flux de chaleur échangé , une diminution de l'écart des deux températures d'entrée engendre une diminution du  $\Delta T_{LM}$ .

La figure IV.5.4. Montre l'influence de la température d'entrée du fluide froid (nano-fluide) sur les pertes de charges dans le tube froid(partie annulaire). On distingue qu'une diminution de l'écart des deux températures provoque une croissance des pertes de charges coté froid .

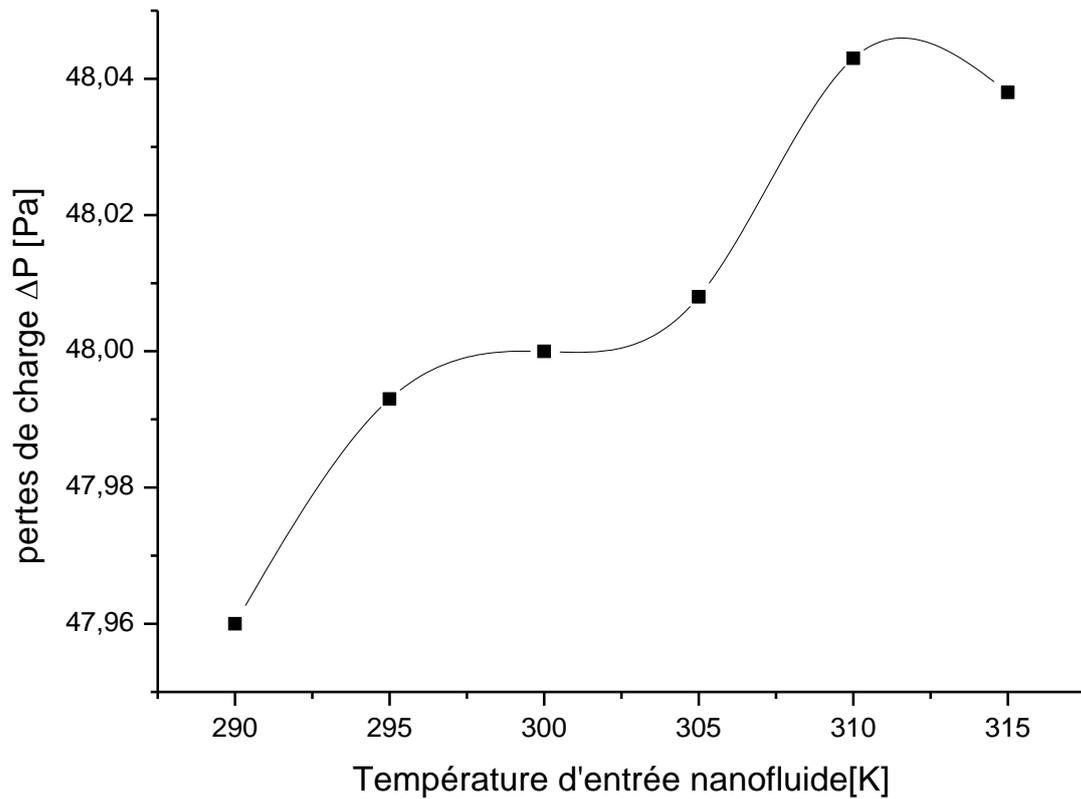


Figure IV. 5.4. Évolution des pertes de charges dans l'espace annulaire (fluide froid) par rapport à sa température d'entrée.

#### IV.6. EFFET DU CHOIX DES NANOPARTICULES :

Figure IV.6.1. Montrer la variation de flux en fonction de la fraction volumique pour différentes nanoparticules.

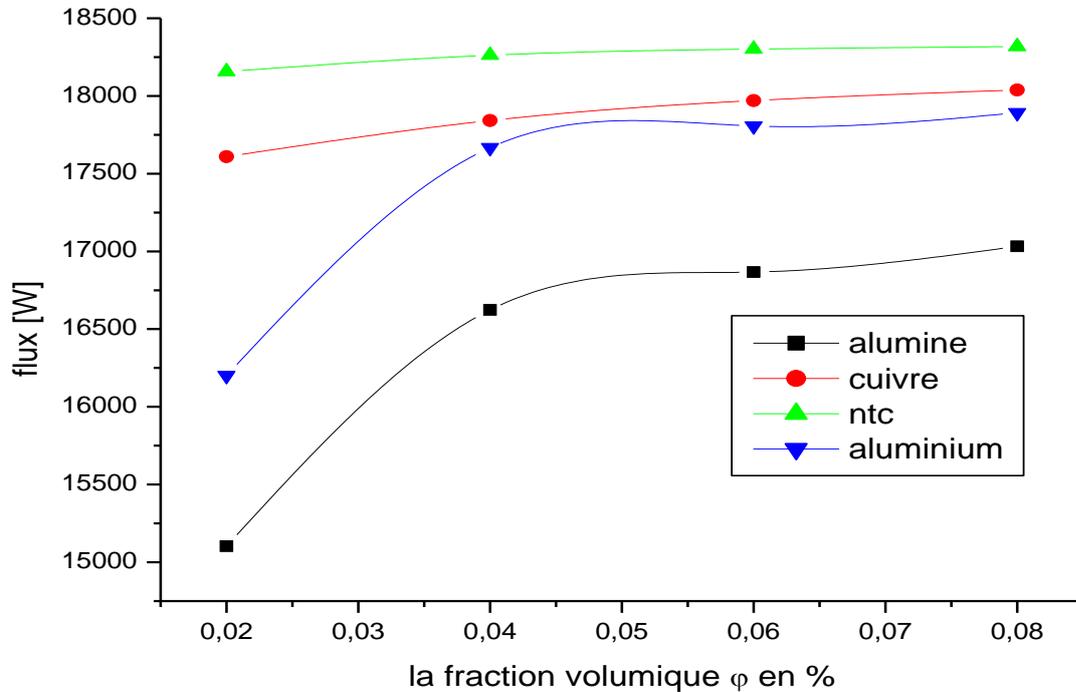


Figure IV.6.1 Montrer la variation de flux en fonction de la fraction volumique pour différentes nanoparticules

En peu tiré les remarques suivent :

-le flux augmente avec la fraction volumique dans tous les cas

-les nano tube de carbone donne les meilleurs résultats para port aux autres nanoparticules

Donc, coté performance (rendement) les nanotube de carbone viennent en premier lieu ensuite viennent les nanoparticules métalliques alors que les nanoparticules d'oxydes métalliques viennent en dernier.

#### IV. Conclusion :

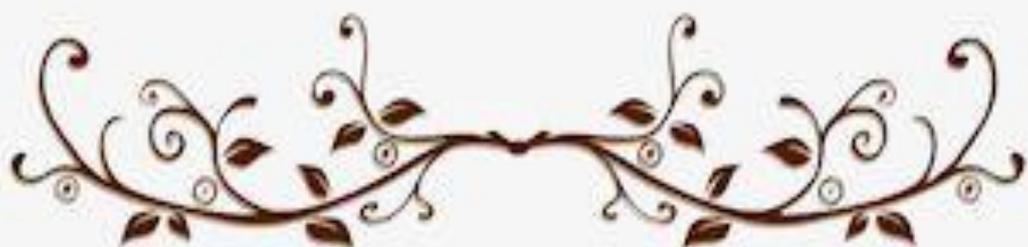
Dans cette partie nous avons étudié l'amélioration de transfert de chaleur convectif par les nano fluide grâce au code de calcul COMSOL

En examinant les résultats obtenus on peut tirer la conclusion suivant :

- La présence de la nanoparticule dans le fluide de base (eau pur) fait augmenter le transfert de chaleur.
- L'ajout des nanoparticules dans le fluide de base (eau pur) fait diminuer les pertes de charge.
- L'utilisation de théorie de calcul de BHATTACHARYA à donner un flux supérieur par rapport aux autres théories de calculs (Maxwell , Hamilton).
- L'échange convectif est meilleur en régime turbulent par rapport au régime laminaire.
- L'augmentation de l'écart entre température d'entrée des deux fluides induit une augmentation de la quantité de chaleur échangée ainsi qu'une diminution des pertes de charges.
- Les échangeurs de chaleur utilisant des nano-fluides à base de nanotubes de carbone NTC sont plus performants que ceux utilisant des nano-fluides à base de nanoparticules



# Conclusion générale



### Conclusion générale

Ce mémoire récapitule notre étude menée sur l'intensification du transfert thermique et donc l'amélioration d'un échangeur de chaleur à tubes concentriques en utilisant la technique des nano-fluides. Il a été décomposé en quatre chapitres dont les principales conclusions et les perspectives de recherches sont les suivantes :

Le chapitre I nous a permis de définir les nano-fluides ainsi que leurs différents types et classes.

Le chapitre II nous a éclairé sur les propriétés thermo physiques des nano-fluide ainsi que les différentes théories pour les calculer.

Les résultats de notre étude numérique nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

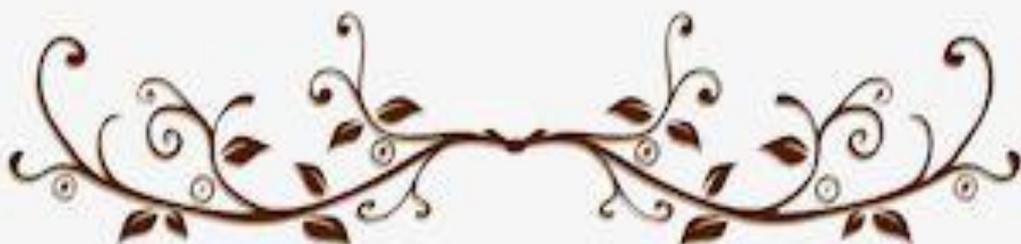
Dans cette partie nous avons étudié l'amélioration de transfert de chaleur convectif par les nano fluide grâce au code de calcul COMSOL

En examinant les résultats obtenus on peut tirer la conclusion suivant :

- ✓ la présence de la nanoparticule dans le fluide de base (eau pur) fait augmenter le transfert de chaleur.
- ✓ l'ajout des nanoparticules dans le fluide de base (eau pur) fait diminuer les pertes de charge.
- ✓ l'utilisation de théorie de calcul de BHATTACHARYA à donner un flux supérieur par rapport aux autres théories de calculs (Maxwell, Hamilton).
- ✓ l'échange convectif est meilleur en régime turbulent par rapport au régime laminaire.
- ✓ l'augmentation de l'écart entre température d'entrée des deux fluides induit une augmentation de la quantité de chaleur échangée ainsi qu'une diminution des pertes de charges.
- ✓ Les échangeurs de chaleur utilisant des nano-fluides à base de nanotubes de carbone NTC sont plus performants que ceux utilisant des nano-fluides à base de nanoparticules métalliques et d'oxydes métalliques.



# Bibliographie



## Bibliographie :

- [1]S.U.S. Choi. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Developments and applications of Non-Newtonian Flows. D.A. Siginer and H.P. Wang (Eds.), FED-vol. 231/MD-vol. 66, ASME, New York, 99-105, 1995.
- [2]S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, and E.A Grulke. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension. *Applied Physics Letters*, 79(14):2252-2254, 2001.
- [3]J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu, and L.J. Thompson. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 78(6): 718-720, 2001.
- [4] P. Koblinski, J.A. Eastman, and D.G. Cahill. Nanofluids for thermal transport. *Materials today*, 8, 36, 2005.
- [5]Y. Yang, Z.G. Zhang, E.A. Grulke, W.B. Anderson, and G. Wu. Heat transfer properties of nanoparticle in fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1107, 2005.
- [6]W. Daungthongsuk, S. Wongwises. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. *Renewable Sustainable Energy Review*, 11,797, 2005.
- [7]P. Vadasz. Heat conduction in nanofluids suspension. *Journal of Heat Transfer*, 128,465, 2006.
- [8]A maoussi. Intensificationdes échangeurs de chaleur par l'utilisation des nanofluides .magister,2012 boumerdes
- [9]H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma. Alteration of Thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing Ultra-fine Particles (dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, and TiO<sub>2</sub> Ultra-fine particles). *Netsu Bussei (Japan)*, 7(4): 227-233, 1993.
- [10]J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, L.J. Thomson, and S. Lee. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 457, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, 3-11,1997.
- [11]X.W. Wang, X.F. Xu, and S.U.S. Choi. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of Thermophysic and Heat Transfer*, 13(4): 474-480, 1999.
- [12]S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, and J.A. Eastman. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *ASME J. Heat Transfer*, 121, 280-289, 1999.
- [13]S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel. Temperature depended of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of Heat transfer transaction of the ASME*, 125(4): 567-574, 2003.
- [14]H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, and F. Ai. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *Journal of Applied Physics*, 91 (7): 4568-4572, 2002.
- [15]R. Prasher, P.E. phelan, and P. Bhattacharya. Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). *Nano Letters*, 6(7):1529-1534, 2006.
- [16]C.H. Li 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), 084314, 2006.
- [17]B.C. Pak and Y.I. Cho. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151-170,1998.

- [18] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, and C. Yang. Thermal conductivity of nanoparticle suspensions. *International Journal of thermal science*, Singapore 2007.
- [19] B. Glades. contribution a l'étude de la convention naturelle dans les nanofluides en configuration de rayleigh Bénard. *toulouse*. 2010.
- [20] Y. Xuan and Q. Li. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat fluid flow*, 21(1), 58–64, 2000.
- [21] H.E. Patel, S.K. Das, T. Sundararajan, A.S Nair, B. George, and T. Pradeep. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. *Applied Physics Letters*, 83(14), 2931–2933, 2003.
- [22] D.H. Kumar, H.E. Patel, V.R.R. Kumar, T. Sundararajan, T. Pradeep, and S.K. Das. Model for heat conduction in nanofluids. *Physical Review Letter*, 93, 144301, 2004.
- [23] S. Berber, Y.K. Kwon, and T. David. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes. *Physical Review Letters*, 84(20):4613-4616, 2000.
- [24] S. Shenogin, A. Bodapati, L. Xue, R. Ozisik, and P. Keblinski. Effect of chemical functionalization on thermal transport of carbon nanotube composites. *Appl. Phys. Lett.*, 85, 2229, 2004.
- [25] Y. Wang, Z. Iqbal, and S. Mitra. Rapidly functionalized water-dispersed carbon nanotubes at high concentration. *J. AM. CHEM. SOC. E*, 128, 95, 2005.
- [26] H. Xie, H. Lee, W. Youn, and M. Choi. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. *J. Appl. Phys*, 94(8):4967–71, 2003.
- [27] D.S. Wen and Y.L. Ding. Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotubes nanofluids). *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 18(4):481-485, 2004.
- [28] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, and R.A. Williams. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (1-2): 240-250, 2006.
- [29] M.J. Assael, C.F. Chen, I. Metaxa, and W.A. Wakeham. Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water. *International Journal of Thermophysics*, 25(4): 971-985, 2004.
- [30] Q. Li. and Y. Xuan. Convective heat transfer performances of fluids with nanoparticles. *Proc of twelfth International Heat Transfer*, 483-488, 2002.
- [31] S.E.B. Maiga, C.T. Nguyen, N. Galanis, and G. Roy. Heat transfer behaviors of nanofluids in a uniformly heated tube. *Super lattices and Microstructures* 35: 543-557, 2004.
- [32] K. Khanafer, K. Vafai, and M. Lightstone. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46:3639-3653, 2003.
- [33] N. Putra, W. Roetzel, and S. DAS. Natural convection of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(8-9): 775-784, 2003.
- [34] G. Roy, C.T. Nguyen, and 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: 497-511, 2004.
- [35] D. Wen and Y. Ding. Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26: 855-864, 2005.
- [36] J. Kim, Y.T. Kang, and C.K. Choi. Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids. *Physics of Fluids*, 16(7): 2395-2401, 2004.

- [37] B.X. Wang, L.P. Zhou, and X.F. Peng, A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14): 2665-2672, 2003.
- [38] J. Rong and T. Sheng-Chung. Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, 727–736, 2006.
- [39] R.K. Tiwari and M.K. Das. Heat Transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 2002-2018, 2007.
- [40] K.S. Hwang, J.H. Lee, and S.P. Jang. Buoyancy-driven heat transfer of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in a rectangular cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 4003-4010, 2007.
- [41] C.J. Ho, M.W. Chen, and Z.W. Li. Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. *Int. J. of heat and Mass Transfer*, 51, 4506-4516, 2008.
- [32] Tzeng S.C, C.W Lin and K.D Huang, Heat Transfer Enhancement of Nanofluids in Rotary Blade Coupling of Four-Wheel-Drive Vehicles. *Acta Mechanica* 179(2005): 11-23.
- [33] Zhang Z and Q Que, Synthesis, Structure and Lubricating Properties of Dialkydithiophosphate-Modified Mo-S Compound Nanoclusters, *Wear* 209(1997): 8-12
- [34] 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.
- [35] Ma H.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.
- [36] Yu C.J, A.G Richter, A Datta, M.K DuTbin and P Dutta, Molecular Layering in a Liquid on a Solid Substrate: an X-Ray Reflectivity Study. *Physica B* 283(2000): 27-31.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] A. Benabderahmene. Etude numérique de l'application des nano fluide dans l'amélioration du transfert de thermique dans les capteur solair .belabbess .2016.
- [40] Y. Xuan and W. Roetzel. Conception for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701-3707, 2000.
- [41] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer* 11 (1998) 151.
- [42] Maxwell JCA. *Treatise on electricity and magnetism*. Oxford, UK: Clarendon Press; 1881.
- [43] Bruggeman DAG. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen, I—Dielektrizitätskonstanten and leitfähigkeiten der mischkörper aus isotropen substanzen. *Annalender Physik, Leipzig* 1935;24:636–79.
- [44] Hamilton RL, Crosser OK. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *I&EC Fundamentals* 1962; 1(3):187–91.

- [45] Lu S, Lin H. Effective conductivity of composites containing aligned spherical inclusions of finite conductivity. *Journal of Applied Physics* 1996; 79: 6761–9.
- [46] W. Yu, S.U.S. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *J. Nanoparticle Res* 5: 167–71, 2003.
- [47] Bhattacharya P, Saha SK, Yadav A, Phelan PE, Prasher RS. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. *Journal Applied Physics* 2004; 95(11):6492–4.
- [48] P. Keblinski, J.A. Eastman, and D.G. Cahill. Nanofluids for thermal transport. *Materials today*, 8, 36, 2005.
- [49] Koo J, Kleinstreuer C. A new thermal conductivity model for nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research* 2004; 6(6):577–88.
- [50] Xue QZ. Model for thermal conductivity of carbon nano tube-based composites. *Physica B: Condensed Matter* 2005; 368(1–4):302–7.
- [51] Li CH, Peterson GP. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *Journal of Applied Physics* 2006; 99(8):084314.
- [52] Timofeeva EV, Gavrilov AN, McCloskey JM, Tolmachev YV. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. *Physical Review* 2007; 76:061203.
- [53] Avsec J, Oblak M. The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for nanofluids on the basis of statistical nano-mechanics. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2007; 50(19): 4331–41.
- [54] Duangthongsuk W, Wongwises S. Measurement of temperature dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>–water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2009; 33(4):706–14.
- [55] Patel HE, Sundararajan T, Das SK. An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research* 2010; 12:1015–31.
- [56] Godson Raja L, Mohan Lal B, Wongwises D.S. Experimental investigation on the thermal conductivity and viscosity of silver—deionized water nanofluid. *Experimental Heat Transfer* 2010; 23:317–32.
- [57] Corcione M. Rayleigh–Benard convection heat transfer in nanoparticle suspensions. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2011; 32:65–77.
- [58] Azmi, Das D K, Namburu PK. Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2010; 31:613–21.
- [59] Einstein A. Eine neue bestimmung der molekul dimensionen. *Annalen der Physik, Leipzig* 1906; 19:289–306.
- [60] Brinkman HC. The viscosity of concentrated suspensions and solution. *Journal of Chemical Physics* 1952; 20:571–81.
- [61] Batchelor GK. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics* 1977; 83(1): 97–117.
- [62] Wang X, Xu X, Choi S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticles–fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 1999; 13(4):474–80.
- [63] Tseng W, Lin KC. Rheology and colloidal structure of aqueous TiO<sub>2</sub> nanoparticle suspensions. *Material Science Engineering: A* 2003; 355:186–92.
- [64] Maiga S, Palm SJ, Nguyen CT, Roy G, Galanis N. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2005; 26:530–46.

- [65] Song S, Peng C, Gonzalez-Olivares AM, Lopez-Valdivieso A. Study on hydration layers near nanoscale silica dispersed in aqueous solutions through viscosity measurement. *Journal of Colloid and Interface Science* 2005;287:114–20.
- [66] Kulkarni DP, Das DK, Chukwu G. Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (Nanofluid). *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 2006;6:1150–4.
- [67] Buongiorno J. Convective transport in nanofluids. *Journal of Heat Transfer* 2006;128:240–50.
- [68] Nguyen CT, Desgranges F, Roy G, Galanis N, Mare T, Boucher S, et al. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water based nanofluids—hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2007; 28:1492–506.
- [69] Chandrasekar M, Suresh S, Chandra Bose A. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2010;34:210–6.\*
- [70] Masoumi N, Sohrabi N, Behzadmehr A. A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2009;42:055501.