

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie mécanique

Spécialité : Installation énergétique et Turbomachine

Thème

**Détermination des corrélations des
Caractéristique des nanofluides
pour améliorer les calculs CFD :
application aux les échangeurs de chaleur**

Promoteur:

DR. SALHI MEROUANE

Réalisé par:

MOUSSI ABDELGHANI

SARI SAMIR

Promotion : 2022/2023

Dédicaces

Je remercie **Dieu** le Généreux pour m'avoir guidé vers la lumière de la recherche. du savoir et De la science

Du plus fond du cœur et avec l'intensité de mes émotions. je dédie ce travail :

À mon père **omar**. Pour ses sacrifices qu'il a consentis pour ma réussite. Qu'il trouve ici le témoignage de mon profond respect. de ma profonde reconnaissance. de ma gratitude .

À ma mère . En témoignage de mon amour éternel et de ma grande reconnaissance pour tous les efforts et les encouragements qu'elle a consentis pour moi tout au long de mes études. Qu'elle trouve dans ce travail le témoignage de ma profonde gratitude et infini dévouement

À mes chers frères **mohamed et** sa femme . Et ma sœur fella . et mon oncle brahim Pour toute l'affection qu'ils m'ont toujours témoignée. je leur souhaite une vie pleine de bonheur. de gloire. de triomphe et de succès. Que Dieu nous garde toujours unis et heureux.

À tous mes enseignants depuis l'école primaire jusqu'à ce jour.

Je tiens particulièrement à exprimer mes respects à monsieur **salhi marouane**. pour avoir bien voulu me coencadrer dans ce travail de mémoire. de m'accorder sa confiance et de m'avoir fait bénéficier de son expérience. de ses discussions constructives et commentaires. toujours très pertinents. sa contribution précieuse pour la réalisation de ce travail. mais aussi pour sa gentillesse illimitée et sa générosité infinie. Toute au long de ces années. j'ai beaucoup apprécié ses hautes qualités humaines et scientifiques. Qu'elle trouve ici l'expression de mes sincères reconnaissances et mon immense gratitude

À mes amis et mes collègues mohamed, moncef, akram, mourad, malek, oussama, elhadi et mon amie marwa et tous ceux qui me sont chers qui sont nombreux et que je ne citerais pas ici volontairement de peur d'oublier l'un d'entre eux avec tout mon respect.

ABDELGHANI

Dédicaces

Avec les sentiments de gratitude les plus profonds, on dédie ce travail à mes parents, Pour leur soutien constant, leurs encouragements et leurs efforts pour assurer le bon déroulement de nos études ont été inestimables. On espère d'être à la hauteur de leurs attentes.

On dédie également ce travail à mon frère walid et à nos sœurs manel qui ont toujours été présents pour nous , ainsi qu'à tous mes collègues et professeurs qui ont contribué à ma parcours académique.

Je tiens particulièrement à exprimer mes respects à monsieur **salhi marouane** .pour avoir bien voulu me coencadrer dans ce travail de mémoire.de m'accorder sa confiance et de m'avoir fait bénéficier de son expérience.de ses discussions constructives et commentaires.toujours très pertinents.sa contribution précieuse pour la réalisation de ce travail.

On souhaite exprimer nos reconnaissances à mes amis elhadi , mourad ,akram,mohamed,malek,oussama ,moncef ,houssem ,hichem,boulem et aussi ziad , abdou rahime aussi et mes cousin et cousine pour leur aide avec qu'on a partagé des moments inoubliables.

Enfin, on tient à dédier ce travail à toutes les personnes qui occupent une place spéciale dans mon cœur et dont les noms n'ont pas été mentionnés. Votre soutien et votre amitié ont été précieux tout au long de mon parcours

SAMIR

REMERCIEMENTS

Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promoteur **SALHI MEROUNAE** qui a beaucoup aidé, ce projet de fin d'étude n'aurait pas été possible sans lui.

Nous remercions le président de jury ainsi que notre examinateur d'avoir acceptée de lire et d'examiner ce modeste travail et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de ce projet.

Enfin nous tenons à adresser un remerciement à nos très chères familles et aussi nos enseignants du département de Génie Mécanique qui ont été toujours présents pour nous encourager et nous soutenir.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	2
Chapitre I : Généralités sur Les nanofluides	5
I.1 Introduction	6
I.2 Nanofluides	6
I.2.1 Définition	6
I.2.2 Taille des nanoparticules	7
I.2.3 Types des nanoparticules	8
I.2.4 Classes des nanoparticules	10
I.2.5 Application des nanoparticules	11
I.3 Propriétés thermophysiques des nanofluides	13
I.3.1 Conductivité thermique	14
I.3.1.1 Effet de la température	15
I.3.2 Viscosité dynamique des nanofluides	15
I.3.2.1 Effet de la température	16
I.3.3 Chaleur spécifique	17
I.3.4 Masse volumique	19
I.4 Bilan sur les nanofluides	21
Conclusion	22
CHAPITRE II : Transferts thermique dans Les échangeurs des chaleurs	23
II.1 Generalités sur les transferts de chaleur	24
II.1.1 Flux de chaleur	24
II.1.2 La convection	25
II.2 Les échangeurs de chaleurs	26
II.3 Écoulement à travers les bancs de tubes	28
II.4 La chute de pression	34
CHAPITRE III : Développement des corrélations des caractéristiques des nanofluides pour améliorer les calculs CFD sur les échangeurs de chaleurs	38

III.1 Introduction	39
III.2 Caractérisation de la viscosité dynamique des nanofluides	39
III.3 Caractérisation de la conductivité thermique des nanofluides	40
III.4 Caractérisation expérimentale de la masse volumique des nanofluides	42
III.5 Caractérisation de la chaleur spécifique des nanofluides	43
III.6 Caractérisation du nombre de prandtl Pr des nanofluides	44
III.7 Caractérisation du coefficient de volume d'expansion β des nanofluides	45
III.8 Bilan et Conclusions sur les mesures des propriétés thermophysiques des nanofluides	46
III.9 L'interpolation des graphes des corrélation des caractéristique des nanofluides	46
Chapitre IV : Résultats et discussion	47
IV.1 Introduction	48
IV.2 Résultats et discussion pour le CFD	48
IV.2.1 Présentation des contours de pression pour chaque nanofluide cas du fluide de base ($\phi = 0.$) et le cas d'un nanofluide avec la variation de concentration et de débit massique	48
IV.2.2 Présentation des contrôleurs de la température pour chaque nanofluide cas du fluide de base ($\phi = 0.$) et le cas d'un nanofluide avec la variation de concentration et de débit massique	57
IV.2.3 Présentation des contours de la vitesse pour chaque nanofluide cas du fluide de base ($\phi = 0.$) et le cas d'un nanofluide avec la variation de concentration et de débit massique :	65
IV.3 Résultats et discussion pour le transfert thermique	73
Conclusion générale	91

LISTEDESTABLEAUX

Tableau I.1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base	9
Tableau I.2 : Applications des nanotechnologies et des nanomatériaux en fonction des secteurs d'activité .	13
Tableau I.3 : Models sur la conductivité thermique	14
Tableau I.4 : Models sur la viscosité dynamique	16
Tableau I.5 : Models sur la chaleur spécifique	18
Tableau I.6 : Models sur la masse volumique	20
Tableau I.7 : avantages et inconvénients des nanofluides	22
Tableux II.8 : Constantes des équations pour le débit d'air sur un banque de tubes de 10 rangées ou plus	29
Tableux II.9 : Facteur de correction C2 pour $N_L < 10$	31
Tableux II.10 : Constantes de le banc de tubes en courant croisé	31

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Symboles latins

A : Surface d'échange m^2

C_p : Chaleur spécifique $J/kg.K$

F : Facteur de friction

H : Coefficient d'échange convectif $W/m^2.K$

L : Longueur m

\dot{m} : Débit massique kg/s

Nu : Le nombre de Nusselt

Pr : Le nombre de Prandtl

Q : Flux thermique W

R : Résistance thermique K/W

T : Température K

U : Coefficient d'échange global $W/m^2.K$

ΔT_{lm} : Ecart de température logarithmique moyen (DTLM) _

β : Coefficient de dilatation

Symboles Grecs

K : Conductivité thermique $W/m.K$

\varnothing : Concentration %

μ : Viscosité dynamique Pa.s

ρ : Masse volumique kg/m^3

Indices

A : Annulaire

Ch : Chaud

Fr : Froid

conv : Convectif

np : Nanoparticule

fb : Fluide de base

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : les nanoparticules dans un tube.	7
Figure I.2 : nanoparticules sphériques ; nanotubes de carbone	8
Figure I.3 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température	15
Figure I.4 : Evolution de la viscosité dynamique avec la température et la concentration ϕ	17
Figure I.5 : Evolution de la chaleur spécifique massique avec la température	19
Figure I.6 : Evolution de la masse volumique avec la fraction volumique	20
Figure II.7 : Schéma du transfert de chaleur convectif	25
Figure II.8 : <u>Le principe de fonctionnement</u>	26
Figure II.9 : Schéma d'un banc de tubes en écoulement transversal.	28
Figure II.10 : Dispositions de tubes dans une rangée. (a) Alignés. (b) En quinconce.	28
Figure II.11 : Conditions d'écoulement pour les tubes alignés	32
Figure II.12 : Conditions d'écoulement pour les tubes en quinconce	32
Figure II.13 : Facteur de frottement et correction facteur x pour bancs de tubes en disposition en ligne	35
Figure II.14 : Facteur de frottement et correction facteur x pour bancs de tubes en Disposition en quinconce	35
Figure II.15 : Evolution du flux transféré en fonction du débit du fluide chaud	36
Figure II.16 : Amélioration du flux échangé en fonction du nombre de Reynolds dans l'espace central	37
Figure III.17 : Evolution de la viscosité en fonction de la température pour une concentration de NP déférente	40
Figure III.18 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température pour une concentration de NP déférente	41
Figure III.19 : Evolution de la masse volumique en fonction de la température pour une concentration de NP déférente	42
Figure III.20 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température pour une concentration de NP déférente	43
Figure III.21 : Évolution du nombre Pr en fonction de la température pour une concentration de NP déférente	44
Figure III.22 : Evolution du coefficient de volume d'expansion en fonction de la température pour une concentration de NP déférente.	45
Figure IV.23 : contour de pression pour concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (SiO_2)	48
Figure IV.24 : contour de pression pour concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (SiO_2)	49
Figure IV.25 : contour de pression pour concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO_2)	49

Figure IV.26 : contour de pression pour concentration $\emptyset=1\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}(\text{SiO}_2)$	50
Figure IV.27 : contour de pression pour concentration $\emptyset=2\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL_2O_3)	50
Figure IV.28 : contour de pression pour concentration $\emptyset=2\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Cu)	51
Figure IV.29 : contour de pression pour concentration $\emptyset=2\%$ et débit massique $m=0.05\text{ kg/s}$ (TiO_2)	51
Figure IV.30: contour de pression pour concentration $\emptyset=2\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)	51
Figure IV.31 : contour de pression pour concentration $\emptyset=3\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (CuO)	52
Figure IV.32 : contour de pression pour concentration $\emptyset=3\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (TiO_2)	52
Figure IV.33 : contour de pression pour concentration $\emptyset=3\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO_2)	53
Figure IV.34 : contour de pression pour concentration $\emptyset=3\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (CuO)	53
Figure IV.35 : contour de pression pour concentration $\emptyset=3\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (SiO_2)	53
Figure IV.36 : contour de pression pour concentration $\emptyset=4\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (Cu)	54
Figure IV.37 : contour de pression pour concentration $\emptyset=4\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Tio_2)	54
Figure IV.38 : contour de pression pour concentration $\emptyset=4\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (AL_2O_3)	54
Figure IV.39 : contour de pression pour concentration $\emptyset=4\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (Cu)	55
Figure IV.40 : contour de pression pour concentration $\emptyset=5\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (TiO_2)	55
Figure IV.41 : contour de pression pour concentration $\emptyset=5\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (AL)	56
Figure IV.42 : contour de pression pour concentration $\emptyset=5\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (AL_2O_3)	56
Figure IV.43 : contour de pression pour concentration $\emptyset=5\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (TiO_2)	56
Figure IV.44 : contour de température pour concentration $\emptyset=1\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL_2O_3)	57
Figure IV.45 : contour de température pour concentration $\emptyset=2\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Cu)	57
Figure IV.46 : contour de température pour concentration $\emptyset=1\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO_2)	58
Figure IV.47 : contour de température pour concentration $\emptyset=1\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (Cu)	58
Figure IV.48 : contour de temperature pour concentration $\emptyset=2\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL)	59
Figure IV.49 : contour de température pour concentration $\emptyset=2\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Cu)	59

Figure IV.50 : contour de température pour concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (AL ₂ O ₃)	59
Figure IV.51 : contour de température pour concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL ₂ O ₃)	60
Figure IV.52 : contour de température pour concentration $\varnothing=3\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (Cu)	60
Figure IV.53: contour de température concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL ₂ O ₃)	60
Figure IV.54 : contour de température concentration $\varnothing=3\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (TiO ₂)	61
Figure IV.55: contour de température concentration $\varnothing=3\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)	61
Figure IV.56 : contour de température concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (SiO ₂)	62
Figure IV.57 : contour de température concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (CuO)	62
Figure IV.58 : contour de température concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (TiO ₂)	62
Figure IV.59 : contour de température concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)	63
Figure IV.60 : contour de température concentration $\varnothing=5\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (Cu)	63
Figure IV.61 : contour de température concentration $\varnothing=5\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (SiO ₂)	64
Figure IV.62 : contour de température concentration $\varnothing=5\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO ₂)	64
Figure IV.63 : contour de température concentration $\varnothing=5\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (CuO)	64
Figure IV.64 : contour de vitesse concentration $\varnothing=1\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (CuO)	65
Figure IV.65 : contour de vitesse concentration $\varnothing=1\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (SiO ₂)	65
Figure IV.66 : contour de vitesse concentration $\varnothing=1\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL)	66
Figure IV.67 : contour de vitesse concentration $\varnothing=1\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (SiO ₂)	66
Figure IV.68 : contour de vitesse concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (Cu)	67
Figure IV.69 : contour de vitesse concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)	67
Figure IV.70 : contour de vitesse concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (SiO ₂)	67
Figure IV.71: contour de vitesse concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (TiO ₂)	68
Figure IV.72 : contour de vitesse concentration $\varnothing=3\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (Cu)	68
Figure IV.73 : contour de vitesse concentration $\varnothing=3\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)	68
Figure IV.74 : contour de vitesse concentration $\varnothing=3\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (CuO)	69
Figure IV.75 : contour de vitesse concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO ₂)	69
Figure IV.76 : contour de vitesse concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (Cu)	70
Figure IV.77 : contour de vitesse concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)	70
Figure IV.78 : contour de vitesse concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL ₂ O ₃)	70
Figure IV.79 : contour de vitesse concentration $\varnothing=4\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Cu)	71
Figure IV.80 : contour de vitesse concentration $\varnothing=5\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (TiO ₂)	71

Figure IV.81 : contour de vitesse concentration $\Phi=5\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (SiO ₂)	71
Figure IV.82 : contour de vitesse concentration $\Phi=5\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL)	72
Figure IV.83 : contour de vitesse concentration $\Phi=5\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (AL ₂ O ₃)	72
Figure IV.84 : Variation du temperature T ₂ (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$	73
Figure IV.85: Variation du temperature T ₂ (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05\text{ Kg/S}$	74
Figure IV.86 : Variation du nombre de reynolds Re (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1\text{ Kg/S}$	75
Figure IV.87 : Variation du nombre de reynolds Re (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05\text{ Kg/S}$	75
Figure IV.88 : Variation du vitesse maximale (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1\text{ Kg/S}$	76
Figure IV.89 : Variation du vitesse maximale (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05\text{ Kg/S}$	77
Figure IV.90 : Variation du nombre de nusselt (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1\text{ Kg/S}$	77
Figure IV.91 : Variation du nombre de reynolds Re (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05\text{ Kg/S}$	78
Figure IV.92 : Variation du coeficient de convection h (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1\text{ Kg/S}$	78
Figure IV.93 : Variation du coeficient de convection h (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05\text{ Kg/S}$	79
Figure IV.94 : Variation du flux de chaleur Q (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1\text{ Kg/S}$	79
Figure IV.95 : Variation du flux de chaleur Q (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05\text{ Kg/S}$	80
Figure IV.96 : Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1\text{ Kg/S}$	80
Figure IV.97 : Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05$	81
Figure IV.98: Variation du travail de pompage W (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1\text{ Kg/S}$	81
Figure IV.99 : Variation du travail de pompage W (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05\text{Kg/S}$	82
Figure IV.100: Variation du température T ₂ (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$	82
Figure IV.101 : Variation du température T ₂ (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	83
Figure IV.102 : Variation du nombre de reynolds (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$	83
Figure IV.103 : Variation du nombre de reynolds (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	84
Figure IV.104: Variation du vitesse maximale (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$	84
Figure IV.105 : Variation du vitesse maximale (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	85
Figure IV.106: Variation du nombre de nusselt (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$	85

Figure IV.107 : Variation du nombre de nusselt (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	86
Figure IV.108: Variation du coefficient de convection h (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$	86
Figure IV.109 : Variation du coefficient de convection h (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	87
Figure IV.110: Variation du flux de chaleur Q (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$	87
Figure IV.111: Variation du flux de chaleur Q (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	88
Figure IV.112: Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$	88
Figure IV.113: Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	89
Figure IV.113: Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	89
Figure IV.115: Variation du travail de pompage W (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$	90

Résumé

L'amélioration des calculs du transfert de chaleur par convection est l'objet principal de ce travail, les nano-fluides sont une nouvelle classe de fluides caloporteurs. Ils sont constitués d'un fluide de base (par exemple, l'eau), qui sert de liquide porteur pour les particules de taille nanométrique. Ce travail vise à corriger la plus grosse erreur commise par les chercheurs de tous niveaux aujourd'hui, c'est le problème des caractéristiques des nano-fluides et leurs exploitations dans les logiciels CFD. Dans ce mémoire nous sommes concentrés sur la clarification de toutes les étapes à suivre qui doivent être franchies pour mener à bien toute étude correcte. À partir de calcul des propriétés des nano-fluides par les modèles adaptés à ce cas des études, faire des interpolations de ces propriétés selon la variation de la température, injection ces fonctions dans un logiciel CFD, et finalement affichage des résultats. Sachant que l'échangeur de chaleur à courant croisé est le cas d'étude de ce travail, avec l'utilisation de six nanoparticules différents (Al, Al₂O₃, Cu, CuO, TiO₂, SiO₂). Les résultats obtenus sur deux axes de recherche, sur le comportement des écoulements MCF et sur le transfert de chaleur TC c'était satisfaisant et encourageant, c'est la bonne voie à suivre pour les études futures dans le domaine des nano-fluides.

Mots clés : _____

Nano-fluides, écoulement externe, convection thermique, CFD, Concentration, propriétés des nano-fluides.

الملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحسين حسابات نقل الحرارة بالحمل ، والسوائل النانوية هي فئة جديدة من سوائل نقل الحرارة. وهي تتكون من سائل أساسي (مثل الماء) ، والذي يعمل بمثابة سائل ناقل للجسيمات بحجم النانو. يهدف هذا العمل إلى تصحيح أكبر خطأ ارتكبه الباحثون من جميع المستويات اليوم ، وهو مشكلة خصائص السوائل النانوية واستغلالها في برمجيات CFD. ركزنا في هذا الموجز على توضيح جميع الخطوات التي يجب اتخاذها لاستكمال أي دراسة مناسبة. من حساب خصائص الموائع النانوية من خلال النماذج التي تم تكييفها مع هذه الحالة من الدراسات ، لعمل استيفاء لهذه الخصائص وفقاً لتغير درجة الحرارة ، وحقن هذه الوظائف في برنامج CFD ، وأخيراً عرض النتائج. مع العلم أن المبادل الحراري المتقاطع هو دراسة الحالة لهذا العمل ، باستخدام ستة جسيمات نانوية مختلفة (TiO_2 ، CuO ، Cu ، Al_2O_3 ، Al ، SiO_2). كانت النتائج التي تم الحصول عليها على خطين من البحث ، حول سلوك تدفقات MDF ونقل الحرارة TC مرضية ومشجعة ، وهذا هو المسار الصحيح الذي يجب اتباعه للدراسات المستقبلية في مجال السوائل

الكلمات المفتاحية:،السوائل النانوية ، التدفق الخارجي ، الحمل الحراري ، CFD ، التركيز ، خصائص السوائل النانوية..

ABSTRACT

Improving convective heat transfer calculations is the main purpose of this work, nano-fluids are a new class of heat transfer fluids. They consist of a basic fluid (eg water), which serves as a carrier liquid for the nano-sized particles. This work aims to correct the biggest mistake made by researchers of all levels today, it is the problem of the characteristics of nano-fluids and their exploitations in CFD software. In this brief we have focused on clarifying all the steps that must be taken to complete any proper study. From calculation of the properties of nano-fluids by the models adapted to this case of the studies, to make interpolations of these properties according to the variation of the temperature, injection these functions in a CFD software, and finally display of the results. Knowing that the cross-current heat exchanger is the case study of this work, with the use of six different nanoparticles (Al, Al₂O₃, Cu, CuO, TiO₂, SiO₂). The results obtained on two lines of research, on the behavior of MFD flows and on TC heat transfer were satisfactory and encouraging, this is the right path to follow for future studies in the field of nano-fluids.

Keywords: *Nano-fluids, external flow, thermal convection, CFD, Concentration, properties of nano-fluids.*



*Introduction
Générale*

Introduction générale

Les transferts de chaleur constituent la base de nombreux processus industriels qui sont présents dans notre vie quotidienne. L'intensification de ces échanges et l'amélioration du rendement sont devenues aujourd'hui une problématique majeure dans le monde industriel des organismes de réglementation mais aussi de la société dans son ensemble qui prend conscience de l'épuisement progressif des ressources énergétiques et qui se soucie de l'avenir en matière énergétique.

Face à ces enjeux énergétiques et environnementaux. Le défi technologique réside dans le développement de nouveaux processus pour une meilleure gestion de l'énergie. Ce travail de thèse s'inscrit dans ce cadre et concerne particulièrement les problèmes liés à l'amélioration des échanges thermiques dans les échangeurs de chaleur.

Il existe une réelle demande dans le monde industriel pour développer de nouvelles stratégies permettant d'améliorer le comportement thermique des fluides utilisés dans les échangeurs de chaleur. Des progrès importants en chimie ont permis dès la fin des années 90 de synthétiser des particules de taille nanométrique qui dispersées dans un liquide porteur constituent des nanofluides. Leur synthèse répond au besoin d'améliorer les propriétés thermiques en y insérant une phase solide de conductivité thermique très élevée. Même si le concept de nanofluide est en apparence simple il apparaît au fond d'une grande complexité en raison des mécanismes physiques mis en jeu. De nombreuses recherches ont été menées sur cette nouvelle génération de fluides afin d'apporter une meilleure compréhension de ces mécanismes et mettre ainsi au point des liquides caloporteurs plus performants.

Mehrez et al. (2015)[13]. ont effectué une étude numérique de la génération d'entropie et du transfert de chaleur par convection mixte d'un nano fluide (Cueau) dans une cavité ouverte inclinée et uniformément chauffée à partir de la paroi gauche. Les équations gouvernantes sont résolues en utilisant la méthode des volumes finis. L'étude a été réalisée pour une large gamme de l'angle d'inclinaison de la cavité ($0^\circ \leq \gamma \leq 360^\circ$) et la fraction volumique des nanoparticules ($0 \leq \phi \leq 0.06$) pour trois nombres de Reynolds $Re = 100, 300$ et 500 en fixant le nombre de Grashof à $Gr = 10^4$. Les résultats montrent que le champ d'écoulement la distribution de température le mode de transfert de chaleur les taux de transfert de chaleur et de la génération d'entropie sont fortement influencés par l'angle d'inclinaison. Cela dépend du nombre de Reynolds et de la fraction volumique des nanoparticules

Aminossadati et Ghasemi (2009)[14]. ont réalisé une étude numérique du refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur encastrée dans la paroi inférieure d'une enceinte remplie de nano fluide. Les parois supérieure et verticale de l'enceinte sont maintenues à une température relativement basse. L'influence des paramètres pertinents tels que le nombre de Rayleigh l'emplacement et la géométrie de la source de chaleur le type de nano fluide et la fraction volumique des nanoparticules sur la performance de refroidissement a été étudiée. Les résultats indiquent que l'ajout de nanoparticules dans l'eau pure améliore les performances de refroidissement en particulier aux faibles nombres de Rayleigh. En outre le type de nanoparticules et la longueur et l'emplacement de la source de chaleur affectent de manière significative la température maximale de la source de chaleur.

Les caractéristiques du transfert de chaleur et du coefficient de frottement d'un nano composite (MWCNTFe3O4) dispersé dans un tube rempli d'eau avec des inserts de bandes longitudinales ont été étudiées expérimentalement par **Sundar et al. (2016) [15]**. L'étude a été réalisée pour un nombre de Reynolds de 3000 à 22 000 des concentrations volumiques de 0% à 0.3% et des inserts de bandes longitudinales de rapport d'aspect égale à 1, 2, 4 et 12. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt maximal et les améliorations du coefficient de frottement ont été observés pour un écoulement de nanofluide de 0.3% dans un tube avec un insert de bandes longitudinales de rapport d'aspect égale à 1 à un nombre de Reynolds de 22 000.

Moumni et al. (2015) [16] ont étudié numériquement l'écoulement bidimensionnel et le transfert de chaleur par convection mixte de nano fluide (EauCu, Ag, Al2O3 et TiO2) dans une cavité partiellement chauffée par le bas. Deux sources de chaleur discrètes sont situées sur la paroi inférieure de l'enceinte ; cependant les parois verticales et la paroi supérieure sont refroidies à température constante. Les parties restantes de la paroi inférieure sont adiabatiques. Les effets des nombres de Reynolds ($1 \leq Re \leq 100$) de Richardson

($1 \leq Ri \leq 20$) de la fraction volumique des nanoparticules ($0 \leq \phi \leq 0.2$) des matériaux des nanoparticules ainsi que la position des deux sources de chaleur ont été étudiés. Il a été constaté que l'amélioration significative du transfert de chaleur dépend fortement de l'augmentation des nombres de Richardson et Reynolds de la présence et du type de nanoparticules et de la position des deux sources de chaleur situées sur la paroi inférieure de l'enceinte

Nayak et al. (2015) [17] ont réalisé une étude numérique sur la convection mixte du nanofluide Cu-eau à l'intérieur d'une enceinte inclinée différemment chauffée. Les caractéristiques des transferts de fluide et de chaleur sont étudiées pour une large gamme d'angles d'obliquité ($30^\circ \leq \gamma \leq 150^\circ$) de fraction volumique des nanoparticules ($0 \leq \phi \leq 0.2$) et du nombre de Richardson ($0.1 \leq Ri \leq 5$) à une valeur fixe du nombre de Reynolds. La génération d'entropie et le nombre de Bejan sont évalués pour démontrer l'optimisation thermodynamique de la convection mixte. Ils ont montré que le taux de transfert de chaleur augmente remarquablement par l'ajout de nanoparticules. Le champ d'écoulement est affecté par la variation de l'angle d'inclinaison. En outre l'augmentation du transfert de chaleur en présence des nanoparticules avec un taux d'augmentation plus faible de la génération d'entropie peut être obtenue dans une cavité asymétrique.

La convection mixte de l'air dans un canal vertical à plaques parallèles a été étudiée numériquement par **Desrayaud et Lauriat (2009) [18]**. Les résultats sont obtenus pour un écoulement laminaire dans un canal chauffé symétriquement avec une température uniforme et relativement élevée pour différents nombres de Grashof et de Reynolds ($300 \leq Re \leq 1300$). Ils ont montré que la longueur du canal n'a aucune influence sur l'écoulement lorsque le rapport hauteur/distance ($H/D \geq 10$)

Mohamed El hattab et al (2013) [1] ont mené une étude numérique de la convection naturelle des nano fluides confinés dans une chambre chauffée par une source thermique. Le type de nanoparticules la fraction de volume et le nombre de Rayleigh, qui sont les paramètres de l'effet du transfert de chaleur ont été étudiés. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du taux de transfert de chaleur de l'augmentation de la taille de la fracture dans les nanoparticules et du nombre de Rayleigh.

N. Belghar. S. Lebbihi (2014) [2] ont mené une étude numérique de la convection naturelle dans une enceinte carrée chauffée et remplie d'un nano fluide (Cu/eau). Ils ont utilisé la simulation numérique comme outil de calcul. Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finis. Une étude paramétrique a été montrée en considérant la concentration de nano fluide le nombre de Rayleigh.

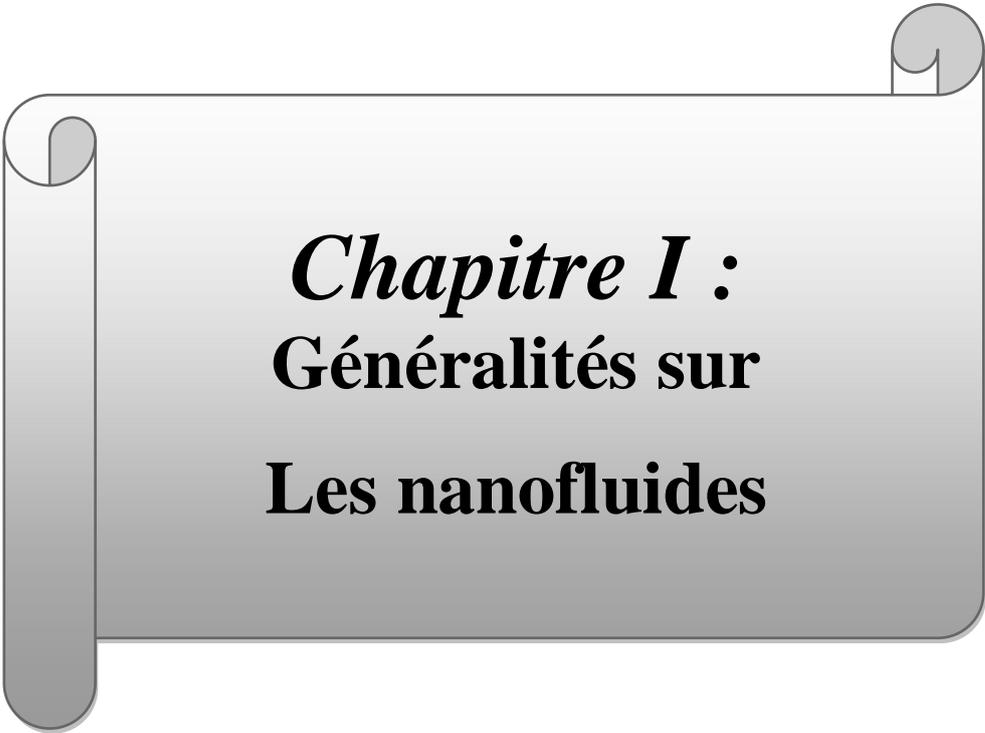
A.DAAS. S. DERFOUF. N. BELGHAR(2016) [3] ont fait une étude numérique de la convection libre dans une géométrie rectangulaire remplie d'un nano fluide (Cu/eau) est chauffée par une source thermique. Les équations de continuité masse et d'énergie sont discrétisées par la méthode numérique des volumes finies ont utilisé la simulation numérique comme un outil d'investigation. Les résultats obtenus analysent les champs thermiques en examinant le nombre de Nusselt qui compare l'effet de la convection par rapport à la conduction.

Mme Tabet Sara (2017) [4] a travaillé sur une étude numérique de convection naturelle dans un régime laminaire et turbulent à l'intérieur d'une géométrie de forme carrée avec un mur partiellement chauffé. La partie chauffée du mur varie entre 20% et 80% de la longueur totale. Les équations dominantes ont été résolues par la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis. La convection naturelle a été montrée à la fois dans les états laminaire et turbulents dans les courbes de température et Nusselt. Le chauffage partiel a un impact significatif sur le transfert de chaleur. Le nombre de Rayleigh est plus grand lorsque l'effet est plus intense le nombre de Rayleigh étant compris entre 106 109 dans système laminaire et système turbulence.

KROUMA Saadia. N.BELGHAR (2017) [5] ont atteint à travers cette étude numérique ont permis d'analyser en détail des échanges thermiques par des nanofluides afin de comprendre et de valoriser les différents mécanismes qui avèrent conditionner leurs propriétés thermophysiques ainsi que leurs améliorations thermiques au sein d'un microéchangeur de chaleur destiné au refroidissement des composants électroniques.

Les liquide de base les plus utilise sont : l'eau l'éthylène glycol les huiles les fluides de réfrigération (R12. R22etc.)[9].

Les applications potentielles des nanofluides sont multiples et très importantes dans plusieurs domaines : refroidissement électronique climatisation et froid aéronautique et spatial transports nucléaire... et pourraient constituer sous certaines conditions un débouché prometteur des nanosciences dans le domaine de l'énergie



Chapitre I :
Généralités sur
Les nanofluides

I.1 Introduction

Les nanotechnologies sont l'objet d'un intérêt considérable ces dernières années. Définie par Ferrari comme étant la science impliquant la manipulation de la matière fabriquée par l'homme à l'échelle nanométrique les nanoparticules (NPs) possèdent au moins une dimension comprise entre 1 et 100 nm. Les NPs possèdent des propriétés qui résultent du fait de leur très petite dimension qui se situe entre les atomes et les molécules. La taille nanométrique de ces particules leur confère une grande aire de surface car la majorité des atomes les composant se retrouvent à leur surface. Ainsi plus grande est l'aire de surface plus grand sera le nombre d'atomes se trouvant au pourtour des NPs. leur allouant des propriétés réactives prééminentes par rapport à leurs homologues micrométriques. De plus de nombreuses autres propriétés comme la chimie de surface la biodégradabilité le nombre la forme la solubilité la conductivité la charge de surface les composants chimiques la présence d'une couche externe protectrice leur confèrent des propriétés particulières telles que d'échapper au système immunitaire et la possibilité de traverser la barrière hématoencéphalique.

Les fluides caloporteurs de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent parfois leur capacité de transfert de chaleur [LIY/2009]. L'utilisation des nanofluides particules de taille nanométrique de conductivité thermique très élevée en suspension dans un fluide caloporteur est susceptible d'apporter des gains en performances thermiques très importants.

I.2 Nanofluides

I.2.1 Définition

La conception de cette nouvelle classe appelée nano fluide a été manifeste en premier lieu par de nombreuses recherches au sein du Laboratoire national d'Argonne en 1995. Le terme nano fluide est apparu après les séries de recherches faites au sein du laboratoire d'Argonne en collaboration avec Choi et Eastman sur des fluides contenant des nanoparticules qu'ils appelaient par le terme « nano fluides » ce qui après a gagné en popularité aux seins des communautés qui l'appelaient à leur tour nano fluide.

Les nanofluides sont des solutions colloïdales constituées de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide porteur. Ce type de solutions suscite un grand intérêt depuis la découverte de leurs propriétés thermiques particulières. En effet les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent leur capacité de transfert de chaleur. L'idée est alors d'insérer au sein des liquides de base des nanoparticules de conductivité très élevée afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer les performances thermiques.

Le choix des liquides de base est primordial pour un nanofluide il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégaions la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de la nanoparticule les solvants les plus utilisés sont :

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

- Les fluides de réfrigération.

Les liquides de base généralement utilisés dans la préparation des nanofluides sont ceux d'usage commun dans les applications de transfert de chaleur tels que l'eau. Les nanoparticules peuvent être à base de métaux d'oxydes de carbures de nitrures ou de carbone.

I.2.2 Taille des nanoparticules

Les procédés de fabrication sont de nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le coût de production qui reste parfois élevé vu les difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Diverses techniques chimiques et physiques sont donc disponibles pour élaborer des nanoparticules. Ces différentes méthodes permettent d'obtenir des nanoparticules libres ou enrobées encapsulées dans une matrice hôte. Si l'idée même d'utiliser des particules solides en suspension pour perfectionner l'échange thermique est ancienne puisqu'elle découle notamment des études analytiques de Maxwell vers 1873. Ce n'est que depuis les années 1990 que l'utilisation de particules d'échelle nanométrique est étudiée. Cela a été rendu possible grâce au développement de procédés de fabrication particuliers et novateurs.

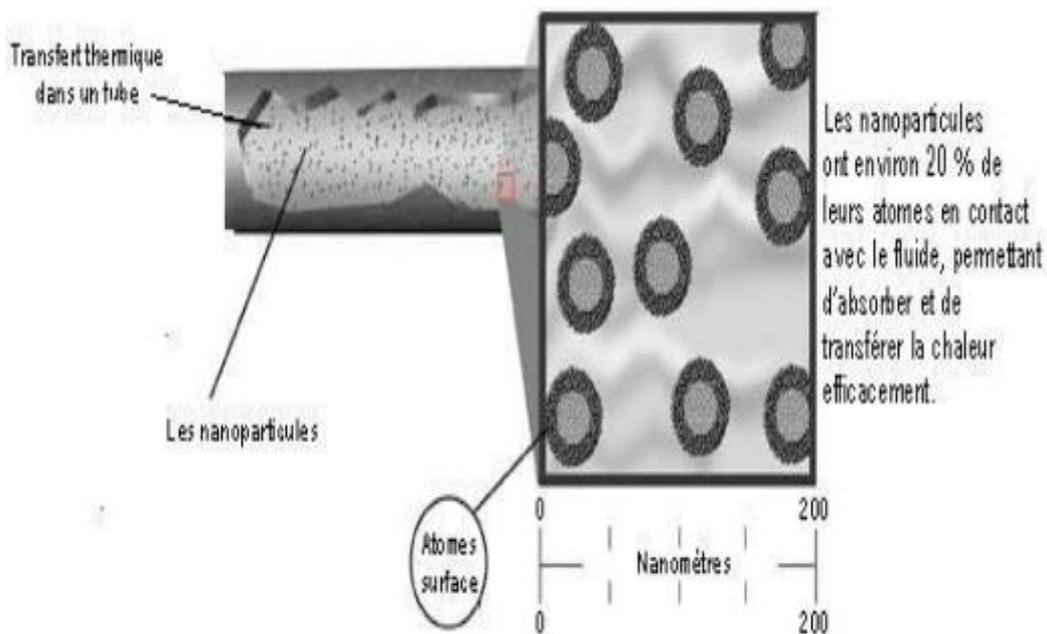


Figure I.1 : les nanoparticules dans un tube.

I.2.3 Types de nanoparticules

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

D'une manière générale les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories (figure I.2) :

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

Dans le cadre de cette synthèse bibliographique on s'intéressera principalement à l'étude des nanofluides sphériques.

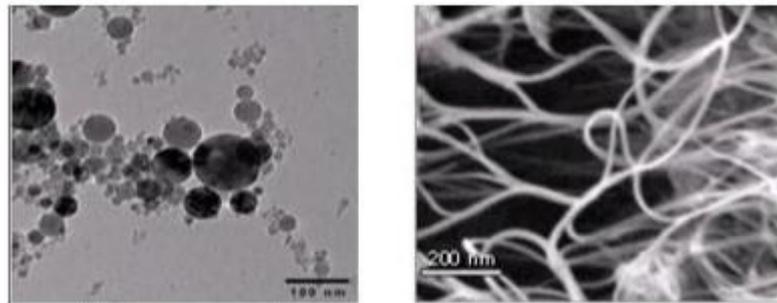


Figure I.2 : nanoparticules sphériques ; nanotubes de carbone

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont:

- Les nanoparticules des oxydes métalliques :
- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).

L'oxyde de cuivre (CuO)

L'oxyde de silicium (SiO_2).

L'oxyde de titane (TiO_2).

- Les nanoparticules métalliques :

L'aluminium (Al)

Le Cuivre (Cu)

L'or (Au)

L'argent (Ag)

Le silicone (Si).

Le tableau suivant regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparées par différents groupes de recherche.

	Acétone	Eau	Ethylène glycol	Huile	Toluène	Décène	éthanol
Ag		x		x			
AlN							x
Au		x			x		
Al ₇₀ Cu ₃₀			x				
Al ₂ O ₃		x	x	x			
Bi ₂ Te ₃							
C (diamant)		x					
C (graphite)		x		x			
C (NTC)		x		x		x	
C (fullerène)				x	x		
Cu	x	x	x	x			
CuO		x	x				
Fe			x				
SiC		x					
SiO ₂		x	x				
TiO ₂		x	x				
WO ₃			x				
ZrO ₂		x					

Tableau I.1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base .

Les nanofluides sont constitués d'un fluide de base (par exemple, l'eau) qui sert de liquide porteur pour les particules de taille nanométrique. Des nanoparticules spécialement conçues (par exemple, du CuO de taille nanométrique, du dioxyde de titane d'alumine, des nanotubes de carbone, de la silice ou des métaux tels que des nanotiges de cuivre ou d'argent) dispersées dans le fluide de base peuvent améliorer considérablement la capacité de transfert de chaleur du nanofluide résultant. Cela fait des nanofluides des liquides de refroidissement extraordinairement

performants. L'utilisation de nanofluides spécialement conçus contenant des nanoparticules thermoconductrices améliore considérablement le transfert et la dissipation de la chaleur par exemple des nanoparticules d'alumine à 0.1 % peuvent augmenter le flux de chaleur critique de l'eau jusqu'à 70 %. L'ajout de nanoparticules métalliques aux liquides de refroidissement utilisés dans les systèmes de contrôle thermique peut aider à augmenter considérablement la conductivité thermique du fluide de base. Ces matériaux composites métalliques nanoparticules fluides sont appelés nanofluides et leur utilisation comme réfrigérants peut réduire le poids et les besoins en énergie des systèmes de contrôle thermique des engins spatiaux.

I.2.4 Classes de nanoparticules

Les nanoparticules qui contiennent les nanofluides qui sont considérés comme des matériaux sont constituées de métaux, d'oxydes et de nanotubes de carbone de taille nanométrique. Cependant, l'étude des nano fluides est devenue très populaire parmi les chercheurs quant à la fenêtre que ces nano fluides fournissent en raison de ses diverses applications dans de nombreuses industries, l'ingénierie et les sciences médicales.

Il existe deux grandes familles de nanomatériaux :

Les nanoobjets : qui sont des matériaux dont une ou deux ou trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire approximativement entre 1 et 100 nm. Parmi les nanoobjets, il est possible de distinguer trois catégories :

Les nanoparticules : qui désignent des nanoobjets dont les trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique : nanoparticules de latex, d'oxyde de zinc, de fer et de cérium, d'alumine, de dioxyde de titane, de carbonate de calcium, etc. ;

Les nanofibres, nanotubes, nanofilaments ou nanobâtonnets : qui se rapportent à des nanoobjets dont deux dimensions externes sont à l'échelle nanométrique et la troisième dimension est significativement supérieure (nanotubes de carbone, nanofibres de polyester, nanotubes de bore, etc.). Ces termes désignent des nanoobjets longilignes de section comprise entre 1 et quelques dizaines de nm et de longueur comprise entre 500 et 10 000 nm ;

Les nanofeuillets, nanoplats ou nanoplaquettes qui définissent des nanoobjets dont une dimension externe se situe à l'échelle nanométrique et les deux autres dimensions sont significativement supérieures (nanofeuillets d'argile, nanoplaquettes de sélénium, de cadmium, etc.). Les nanofeuillets, nanoplats ou nanoplaquettes qui définissent des nanoobjets dont une dimension externe se situe à l'échelle nanométrique et les deux autres dimensions sont significativement supérieures (nanofeuillets d'argile, nanoplaquettes de sélénium, de cadmium, etc.).

Les matériaux nanostructurés : qui possèdent une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique. Parmi les matériaux nanostructurés, il est possible de distinguer plusieurs familles parmi lesquelles :

Les agrégats et agglomérats de nanoobjets : Les nanoobjets peuvent se présenter soit sous forme individuelle (c'est-à-dire sous forme de particules primaires) ou soit sous forme d'agrégats ou d'agglomérats dont la taille est sensiblement supérieure à 100 nm.

Les nanocomposites : Ces matériaux sont composés pour tout ou partie de nanoobjets qui leur confèrent des propriétés améliorées ou spécifiques de la dimension nanométrique. Les nanoobjets sont incorporés dans une matrice ou sur une surface afin d'apporter une nouvelle fonctionnalité ou de modifier certaines propriétés mécaniques magnétiques Bthermiques etc. Les polymères chargés de nanotubes de carbone utilisés dans le secteur des équipements sportifs afin d'améliorer leur résistance mécanique et de diminuer leur poids constituent un exemple de nanocomposites.

Les matériaux nanoporeux : Ces matériaux possèdent des pores de taille nanométrique. Les aérogels de silice sont des matériaux nanoporeux qui présentent d'excellentes propriétés d'isolation thermique. Les nanomatériaux produits de façon intentionnelle par l'Homme à des fins d'applications précises et possédant des propriétés spécifiques sont nommés « nanomatériauxmanufacturés ».

Parmi ces nanomatériaux manufacturés certains sont produits depuis déjà de nombreuses années dans des tonnages importants tels que le dioxyde de titane le noir de carbone l'alumine le carbonate de calcium ou la silice amorphe. D'autres plus récents sont fabriqués dans des quantités moindres tels que les nanotubes de carboneles quantum dots ou les dendrimères. Il existe également des nanomatériaux produits par l'homme de façon non intentionnelle appelés parfois particules ultrafines issus de certains procédés thermiques et mécaniques tels que les fumées de soudage ou de projection thermique les émissions de moteurs à combustion etc. Enfin des particules ultrafines naturelles sont présentes dans notre environnement à l'image des fumées volcaniques ou des virus.

I.2.5 Application des nanoparticules

Toutes les grandes familles de matériaux sont concernées : les métaux les céramiques,les diélectriques ,les oxydes magnétiques,les polymères ,les carbones , etc.

Du fait de leurs propriétés variées et souvent inédites les nanomatériaux recèlent des potentialités très diverses et leurs utilisations ouvrent de multiples perspectives. Les nanomatériaux permettent ainsi des innovations incrémentales et de rupture dans de nombreux secteurs d'activité tels que la santé , l'automobile, la construction, l'agroalimentaire ou encore l'électronique.

SECTEURS D'ACTIVITÉ	EXEMPLES D'APPLICATIONS ACTUELLES ET POTENTIELLES
Automobile, aéronautique et aérospatial	Matériaux renforcés et plus légers ; peintures extérieures avec effets de couleur, plus brillantes, anti-rayures, anti-corrosion et anti-salissures ; capteurs optimisant les performances des moteurs ; détecteurs de glace sur les ailes d'avion ; additifs pour diesel permettant une meilleure combustion ; pneumatiques plus durables et recyclables...
Electronique et communications	Mémoires à haute densité et processeurs miniaturisés ; cellules solaires ; bibliothèques électroniques de poche ; ordinateurs et jeux électroniques ultra-rapides ; technologies sans fil ; écrans plats...
Agroalimentaire	Emballages actifs ; additifs : colorants, anti-agglomérants, émulsifiants...
Chimie et matériaux	Pigments ; charges ; poudres céramiques ; inhibiteurs de corrosion ; catalyseurs multi-fonctionnels ; textiles et revêtements anti-bactériens et ultra-résistants...

Construction	Ciments autonettoyants et anti-pollutions, vitrages autonettoyants et anti-salissures ; peintures ; vernis ; colles ; mastics...
Pharmacie et santé	Médicaments et agents actifs ; surfaces adhésives médicales anti-allergènes ; médicaments sur mesure délivrés uniquement à des organes précis ; surfaces bio-compatibles pour implants ; vaccins oraux ; imagerie médicale...
SECTEURS D'ACTIVITÉ	EXEMPLES D'APPLICATIONS ACTUELLES ET POTENTIELLES
Cosmétique	Crèmes solaires transparentes ; pâtes à dentifrice abrasives ; maquillage avec une meilleure tenue...
Énergie	Cellules photovoltaïques nouvelle génération ; nouveaux types de batteries ; fenêtres intelligentes ; matériaux isolants plus efficaces ; entreposage d'hydrogène combustible...
Environnement et écologie	Diminution des émissions de dioxyde de carbone ; production d'eau ultrapure à partir d'eau de mer ; pesticides et fertilisants plus efficaces et moins dommageables ; analyseurs chimiques spécifiques...
Défense	Détecteurs d'agents chimiques et biologiques ; systèmes de surveillance miniaturisés ; systèmes de guidage plus précis ; textiles légers et qui se réparent d'eux-mêmes...

Tableau I.2 : Applications des nanotechnologies et des nanomatériaux en fonction des secteurs d'activité .

I.3 Propriétés thermophysiques des nanofluides

Un des objectifs de ce travail est la caractérisation expérimentale des propriétés thermophysiques des nanofluides en vue de la détermination de leurs performances comme fluide caloporteur dans un échangeur de chaleur. Il paraît ainsi nécessaire de recenser et analyser les principales approches déjà élaborées et existantes dans la littérature tant sur le plan théorique qu'expérimental pour l'évaluation de la conductivité thermique la viscosité dynamique la masse volumique et la chaleur spécifique des nanofluides.

Un nanofluide est un fluide dans lequel des particules de taille nanométrique sont en suspension dans un fluide de base tel que de l'eau du glycol ou de l'huile où elles forment une solution colloïdale. Les nanofluides peuvent augmenter considérablement la conductivité thermique par rapport aux liquides sans nanoparticules ou particules plus grosses. Le matériau, la taille, la viscosité, la charge de surface et la stabilité des fluides des nanoparticules dispersées affectent de manière significative les performances thermiques des nanofluides.

I.3.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique, notée k (W/m.K) est la capacité d'un matériau à conduire ou à transmettre de la chaleur. C'est une propriété très importante pour l'amélioration des performances thermiques d'un fluide caloporteur. La synthèse des nanofluides répond au besoin d'améliorer et d'amplifier la conductivité thermique des liquides. Aussi de nombreux travaux ont été menés pour mesurer mais aussi prédire et expliquer cette amélioration.

	Conductivité thermique	Articles
Equation 1 (Hamilton–Crosser)	$k_{nf} = k_f \left[\frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_s)}{k_s + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_s)} \right]$	(Maré et al., 2011), (Sahoo et al., 2009)
Equation 2 (maxwell)	$k_{nf(max\ well)} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\phi)}{k_s + 2k_f - 2(k_s - k_f)\phi} \right]$	(Longo and Zilio, 2011)
Equation 3 (Koo and Kleinstreuer)	$k_{nf} = k_{nf(max\ well)} + 5 \times 10^4 * \beta * \phi * \rho_f * Cp_f \left[\frac{\kappa T}{\rho_s d_s} \right]^{1/2} * f$ Avec: $\beta = 8,4407(100\phi)^{-1,017304} \text{ (for } Al_2O_3 \text{)}$ $f(T, \phi) = (2,8217 \times 10^{-2} \phi + 3,917 \times 10^{-3}) \frac{T}{273,15} + (-3,0669 \times 10^{-2} \phi - 3,91123 \times 10^{-3})$	(Longo and Zilio, 2011)
Equation 4 (Choi et Yu)	$k_{nf} = k_f \left[\frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1 + \delta)^3 \phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)(1 + \delta)^3 \phi} \right]$ Avec $k_f = 0,5473 + 2,14 \times 10^{-3} t - 9,6737 \times 10^{-6} t^2$ Avec $\delta = 0,1$	(Kulkarni et al., 2009)
Equation 5	$k_{nf} = k_f \left[\frac{2k_f + k_s + 2\phi(k_s - k_f)}{2k_f + k_s - \phi(k_s - k_f)} \right]$	(Longo and Zilio, 2011), (Maré et al., 2011)
Equation 6	$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_s + (2 - 3\phi)k_f + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta}]$ Avec $\Delta = [(3\phi - 1)^2(k_s/k_f)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_s/k_f)]$	(Maré et al., 2011)
Equation 7 (Timofeeva)	$k_{nf} = [1 + 3\phi]k_f$	(Maré et al., 2011)

Tableau I.3 : Modèles sur la conductivité thermique

I.3.1.1 Effet de la température

Dans la grande majorité des travaux existants il est établi que la conductivité thermique des nanofluides augmente avec la température [HAL1/2013] que ce soit pour les nanofluides spécifiques ou contenant d'autres types de nanoparticules. Ding et al. [DIN/2006] ont ainsi trouvé pour une solution aqueuse de NP stabilisée par de la gomme arabique (GA) comme

surfactant que l'amélioration de la conductivité thermique varie significativement avec la température. D'après leurs résultats l'augmentation de la conductivité thermique est de l'ordre de 15 % à 20°C, 30 % à 25°C et peut atteindre jusqu'à 79 % à 40 °C à une fraction massique de 1 % (figure 3). Pour le même type de nanofluide, Indhuja et al. [IND/2013] ont montré que la conductivité thermique relative croît avec la température dans une gamme de 28 à 60°C et que le taux d'amélioration de la conductivité thermique augmente significativement pour des températures supérieures à 45°C.

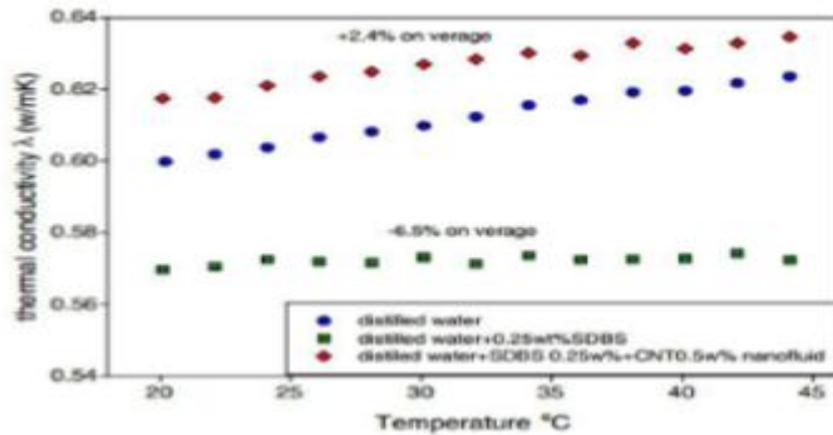


Figure I.3 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température

I.3.2 Viscosité dynamique des nanofluides

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nanofluide mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Ainsi ces deux propriétés sont étroitement corrélées et doivent être maîtrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluides dans des échangeurs.

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'estimer ou de mesurer la viscosité dynamique des nanofluides et de quantifier l'importance des principaux paramètres qui l'influencent [NGY/2008] [ALA/2012] [EST/2013].

	Viscosité dynamique	Articles
Equation 1 (Einstein, pour $\phi < 1\%$)	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2,5\phi)$	(Aladag et al., 2012), (Asirvatham et al., 2009), (Kole and Dey, 2011), (Longo and Zilio, 2011)
Equation 2 (Brinkman, pour $\phi < 4\%$)	$\mu_{nf} = \mu_f \left[\frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}} \right]$	(Aladag et al., 2012), (Duangthongsuk and Wongwises, 2009), Zhang – 2007
Equation 3 (Batchelor tenant compte du mvt Brownien)	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + \eta\phi + k_H\phi^2 + \dots)$ Avec $\eta = 2,5$ et $k_H = 6,5$ car les nanoparticules étudiées sont sphériques	(Aladag et al., 2012), (Duangthongsuk and Wongwises, 2009)
Equation 4 (Brenner, si les particules ne sont pas sphériques)	$\mu_{nf} = \mu_f (1 + \eta\phi)$ Avec $\eta = \frac{0,312r}{\ln 2r - 1,5} + 2 - \frac{0,5}{\ln 2r - 1,5} - \frac{1,872}{r}$	(Aladag et al., 2012)
Equation 5 (proposée si le fluide est newtonien)	$\tau = \mu_{nf} \dot{\gamma}$	(Aladag et al., 2012), (Sahoo et al., 2009)
Equation 6 (proposé si le fluide est non newtonien)	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	(Aladag et al., 2012)
Equation 7 (proposée pour TiO ₂ /Eau)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (a + b\phi + c\phi^2)$ Avec a, b et c des constantes évaluées pour 3 températures : 15, 25, 35°C.	(Duangthongsuk and Wongwises, 2009)
Equation 8 (proposée par Sahoo et al (2009))	$\mu_{nf} = Ae^{(B/T+C\phi)}$ où A, B et C sont des constantes déterminées chacune dans les cas basses températures (>0°C) et hautes températures (<0°C).	(Sahoo et al., 2009), (Kole and Dey, 2011)
Equation 9 (proposée par Namburu et al (2007))	$\text{Log}(\mu_{nf}) = Ae^{-BT}$ Avec	(Namburu et al., 2007), (Kole and Dey, 2011)
pour SiO ₂ /EG(40/60)	$A = 1,8375\phi^2 - 29,643\phi + 165,56$ $B = 4 \times 10^{-6} \phi^2 - 0,001\phi + 0,0186$ Pour $\phi = [0; 6.12\%]$	
Equation 10 (proposée par Kulkarni et al (2007a))	$\mu_{nf} = Ae^{B\phi}$ Avec $\ln(A) = 736,9e^{-0,01997T}$ et $B = 44,794 - 0,0765T$	(Kulkarni et al., 2007a)

Tableau I.4 : Modèles sur la viscosité dynamique

I.3.2.1 Effet de la température

De nombreux travaux ont montré que la viscosité dynamique des nanofluides diminue quand la température augmente. [CHE/2008] [ANO/2009] [MUR/2008]. Aladag et al. [ALA/2012] ont étudié le comportement rhéologique d'un nanofluide à basses températures (de 2 à 10°C) et ils ont observé que la viscosité dynamique du nanofluide diminue quand la température augmente et que le comportement rhéologique du nanofluide à ces températures est rhéofluidifiant à faibles

vitesses de cisaillement et devient newtonien pour des vitesses de cisaillement supérieures à 100 s.l. Gholarmeza et Donany [GHO/2012] ont étudié expérimentalement l'effet de la température (de 25°C à 100 °C) sur un nanofluide à base de SWCNT dispersés dans de l'huile sans présence de surfactant. D'après leurs résultats la viscosité dynamique du nanofluide dépend fortement de la température. Autrement dit quand la température croît la viscosité dynamique du nanofluide décroît sensiblement. Les résultats d'Indhuja et al. [IND/2013] montrent que l'effet de la température sur la viscosité dynamique d'une solution aqueuse de MWCNT est significatif à faibles concentrations.

Quand la concentration des particules augmente l'influence de la température sur la viscosité dynamique devient moins prononcée. Cependant Nguyen et al. [NGY/2008] ont observé qu'il existe une température critique à partir de laquelle l'évolution de la viscosité dynamique en fonction de la température est inversée. Meng et al. [MEN/2012] ont confirmé ces résultats sur un nanofluide dispersé dans de l'éthylène glycol à la concentration 4 %. Ils ont montré que la viscosité dynamique diminue quand la température augmente de 15 à 50°C et que la viscosité dynamique à 55°C est supérieure à celle à 50°C. Chen et al [CHE/2008] ont trouvé que la température n'a d'effet significatif sur la viscosité relative qu'à des températures supérieures à 55 °C.

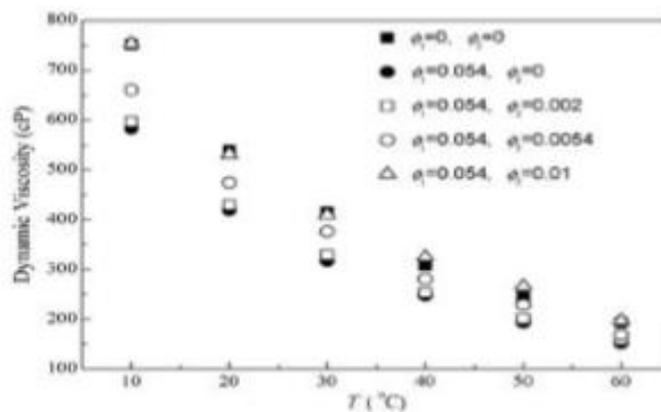


Figure I.4 : Evolution de la viscosité dynamique avec la température

I.3.3 Chaleur spécifique

La conductivité thermique et la viscosité dynamique sont les deux propriétés thermophysiques les plus étudiées dans le cas des nanofluides. La chaleur spécifique des nanofluides quant à elle est très rarement étudiée notamment sur le plan expérimental.

La chaleur spécifique ou la capacité thermique massique notée C_p (J/kg.K) est définie par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré Kelvin la température de l'unité de masse d'une substance [INT2]. Cette grandeur est incorporée dans l'équation de l'énergie et nécessite alors d'être déterminée d'une manière rigoureuse.

Zhou et al. [ZHO/2010] ont mesuré expérimentalement la chaleur spécifique d'un nanofluide à base de nanoparticules d'oxyde de cuivre dispersées dans de l'eau. D'après leurs résultats la

chaleur spécifique décroît progressivement avec la concentration volumique. Ils ont montré que la loi du mélange ne permet pas de modéliser la chaleur.

	Chaleur spécifique	articles
Equation 1	$c_{p,nf} = \varphi_v (c_p)_{np} + (1 - \varphi_v) (c_p)_{fb}$	[PAK/1998] et [O'HA/2012]. Zhou et al. [ZHO/2010]
Equation 2	$c_{p,nf} = \frac{\varphi_v (\rho c_p)_{np} + (1 - \varphi_v) (\rho c_p)_{fb}}{\varphi_v \rho_{np} + (1 - \varphi_v) \rho_{fb}}$	[XUA/2000] et Kumaresan et Velraj [KUM/2012] O'Hanley et al. [O'HA/2012]
Equation 3	$\frac{C_{p,fb} - C_{p,nf}}{C_{p,fb}} = (0.0128T + 1.8382) \varphi_m^{0.4779}$ <p>Avec φ_m est la concentration massique en nanoparticules.</p>	Pakdamana et al. [PAK/2012]

Tableau I.5 : Modèles sur la chaleur spécifique

Spécifique dans le cas des nanofluides étudiés et que le modèle est mieux adapté pour le calcul de la chaleur spécifique. O'Hanley et al. [O'HA/2012] ont confirmé expérimentalement ce résultat en utilisant un calorimètre différentiel à balayage.

Kumaresan et Velraj [KUM/2012] ont montré expérimentalement pour un nanofluide composé de MWCNT dispersés dans un mélange d'éthylène glycol et d'eau (70 % EG/30 % eau) que le modèle permet de reproduire leurs résultats expérimentaux avec une erreur relative de l'ordre de 8 % pour une fraction volumique de 0.15 % et de l'ordre de 3 % pour une fraction volumique de 0.45 %. La figure présente aussi l'évolution de la chaleur spécifique en fonction de la fraction volumique des nanofluides et de la température. Il est à noter que la chaleur spécifique du nanofluide est supérieure à celle de l'eau plus particulièrement à basse concentration. Les auteurs l'expliquent par la chaleur spécifique du surfactant (SDBS) utilisé dans cette étude.

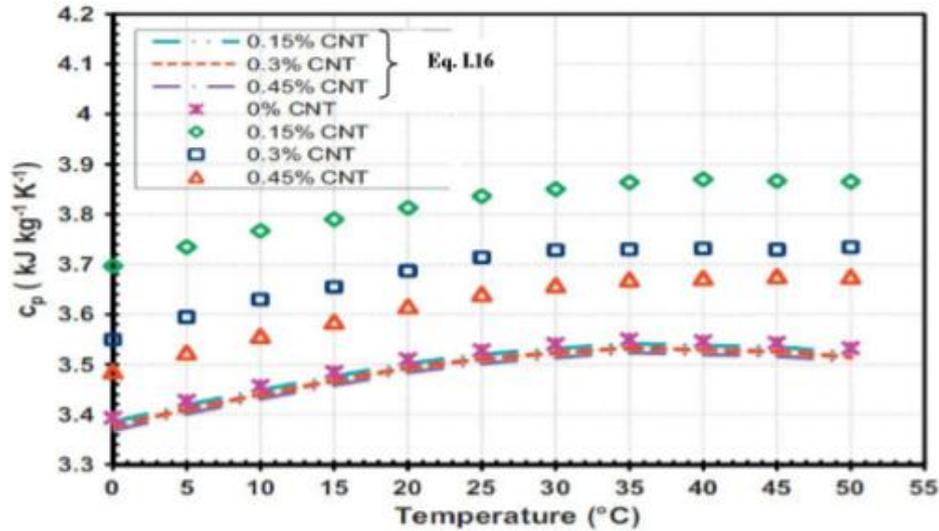


Figure I.5 : Evolution de la chaleur spécifique massique avec la température

Pakdamana et al. [PAK/2012] ont observé une chute de la chaleur spécifique de l'ordre de 42% due à l'ajout d'une fraction massique de 0.4% de MWCNT dans de l'huile. D'après leurs résultats l'écart maximal entre les mesures expérimentales et le modèle de la loi de mélange est de l'ordre de 40%.

I.3.4 Masse volumique

La masse volumique des nanofluides est proportionnelle à la fraction volumique en particules et augmente avec l'ajout des nanoparticules. Dans la littérature et en l'absence de résultats expérimentaux la masse volumique des nanofluides est souvent calculée à partir de la loi de mélange dans laquelle comme pour la chaleur spécifique, le nanofluide est supposé homogène [PAK/1998][FER/2011].

$$\rho_{nf} = \varphi_v \rho_{np} + (1 - \varphi_v) \rho_{fb}$$

Kumaresan et Velraj [KUM/2012] ont mené une étude expérimentale sur la masse volumique d'une solution composée de NP dispersés dans un mélange d'eau et d'éthylène glycol (30/70) et stabilisés par du SDBS. D'après leurs résultats la masse volumique du nanofluide croît avec la fraction volumique des particules et la déviation entre la loi de mélange et les mesures expérimentales est de l'ordre de 0.4 % à la fraction volumique 0.15 % de 0.9 % à 0.3 % et de 1 % à 0.45 %.

	Masse volumique	Articles
Equation 1	$\rho_{nf} = \varphi_v \rho_{np} + (1 - \varphi_v) \rho_{fb}$	[PAK/1998][FER/2011]. Kumaresan et Velraj [KUM/2012]
Equation 2	$(\rho_{nf})_{th} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_p + m_s + m_{bf}}{V_p + V_s + V_{bf}}$	[PAK/1998]et Pakdamana et al. [PAK/2012]
Equation 3	$(\rho_{nf})_{th} = (1 - \varphi_{vp} - \varphi_{vs}) \rho_{bf} + \varphi_{vp} \rho_p + \varphi_{vs} \rho_s$	[PAK/1998]et Pakdamana et al. [PAK/2012]

Tableau I.6 : Modèles sur la masse volumique

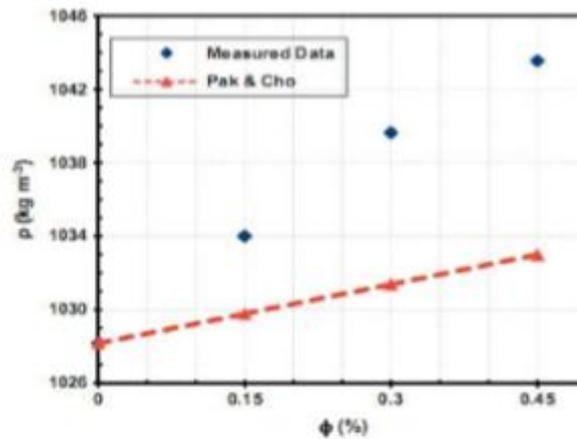


Figure I.6 : Evolution de la masse volumique avec la fraction volumique

Pakdamana et al. [PAK/2012] ont observé une déviation maximale entre la loi de mélange et leurs mesures expérimentales pour une solution aqueuse de NP de l'ordre de 1% à la fraction massique 0.4%. Ce qui confirme d'après eux que la loi de mélange permet de prédire l'évolution de la masse volumique.

I.4 Bilan sur les nanofluides

Nanofluide	Avantages	Inconvénients
Al ₂ O ₃	<p>réduit fortement la puissance de pompage (38% pour 6% en concentration (Kulkarni et al.. 2009)).</p> <p>viscosité diminue en augmentant la température</p> <p>Le mélange est stable et les agglomérats sont bien moins nombreux ((Maré et al.. 2011). Ho et al – 2010).</p> <p>Réduit beaucoup le débit massique (28% (Kulkarni et al.. 2009))</p> <p>augmente le transfert thermique ((Longo and Zilio. 2011). (Ho et al.. 2010))</p> <p>augmente la conductivité thermique (+23% (Longo and Zilio. 2011))</p>	<p>la viscosité augmente en baissant en température (à 35°C elle est au double du fluide de base (Kulkarni et al.. 2007b)).</p> <p>Les résultats d'augmentation sont plus notables à forte concentration d'où un prix plus élevé.</p>
SiO ₂	<p>réduit la puissance de pompage (27.6% (Kulkarni et al.. 2009))</p> <p>fabrication maîtrisée</p> <p>réduit le débit massique (16.3% (Kulkarni et al.. 2009))</p> <p>augmente le transfert thermique (+ 18.4% (Kulkarni et al.. 2009))</p> <p>augmente la conductivité thermique</p>	<p>augmentation des pertes de charges(Kulkarni et al.. 2007b).</p> <p>augmentation de la viscosité (à 35°C elle est multiplié par 1.5 (Kulkarni et al.. 2009))</p> <p>La viscosité varie en fonction de la taille des nanoparticules : plus les particules sont petites plus la viscosité est grande (Namburu et al.. 2008)</p>
TiO ₂	<p>réduit la puissance de pompage</p> <p>augmente la conductivité thermique (16% (Longo and Zilio. 2011))</p> <p>ramène à des résultats presque identiques à Al₂O₃</p>	<p>augmente la viscosité (+ 150% (Longo and Zilio. 2011))</p>

CuO	<p>diminue la puissance de pompage (11.7%) diminue le débit massique (6.5% (Asirvatham et al.. 2009)).</p>	<p>Pas de réel constat d'inconvénients sauf qu'il est moins performant en termes de réduction de débit massique et de puissance de pompage. Plus la concentration en nanoparticules augmente. plus la viscosité augmente (multipliée par 8 entre 0 et 6.12%) (Namburu et al.. 2008). (Kulkarni et al.. 2007b)(Kole and Dey. 2011)</p>
Cu	<p>augmente le transfert thermique. Pas d'informations supplémentaires précises si ce n'est qu'il se comporte de la même manière que CuO aussi bien pour les avantages qu'inconvénients malgré qu'il semble moins performant.</p>	

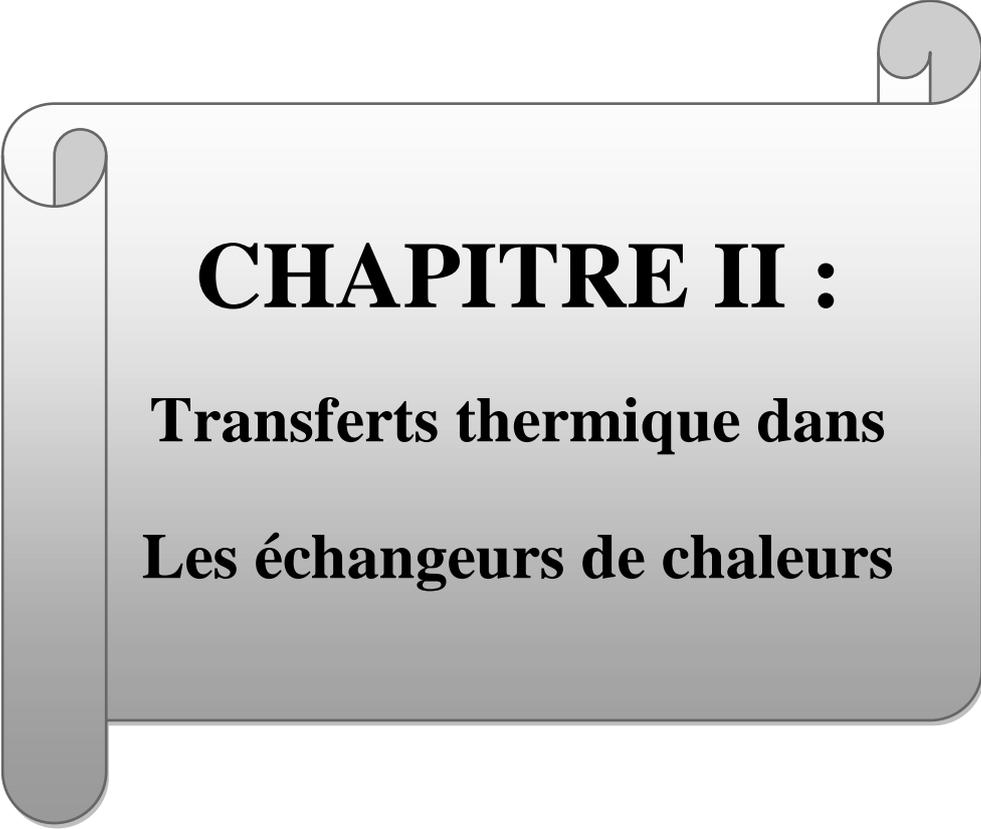
Tableau I.7 : avantages et inconvénients des nanofluides

CONCLUSION

Les nanotechnologies et les nanoparticules sont un domaine d'activité prometteur et en pleine croissance. Cette situation relève principalement du fait que les nanoparticules démontrent des propriétés chimiques et physiques différentes du même matériel à plus grande dimension. Les développements technologiques actuels dans ce domaine visent justement à tirer avantage de ces nouvelles propriétés souvent uniques.

Dans ce premier chapitre nous avons donné dans un premier temps une description générale des nanofluides et la caractérisation (structure et stabilité) de ces nanofluides. Une synthèse bibliographique de leurs propriétés thermophysiques et de leurs performances thermiques et hydrodynamiques a mis en évidence les facteurs qui influencent les propriétés thermiques rhéologiques et hydrodynamiques de ces matériaux à savoir : la température.

Dans cet objectif le chapitre suivant expose en détails après une description des nanofluides utilisés dans cette étude les différents dispositifs expérimentaux et méthodes mis en œuvre pour la caractérisation des principales propriétés thermophysiques des nanofluides (conductivité thermique. viscosité dynamique. masse volumique) et des propriétés thermiques dans un échangeur de chaleur.



CHAPITRE II :

**Transferts thermique dans
Les échangeurs de chaleurs**

II.1 Generalités sur les transferts de chaleur

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même 'électriques. centrales 'électriques au fuel au gaz. etc....électronique) ou domestiques (chauffage de l'habitat). Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspondra un d'emplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid.

Le transfert de chaleur est un processus d'une très grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies. Bien qu'il se manifeste sous diverses formes (rayonnement. conduction. convection) la convection est la plus adéquate dans certains domaines (refroidissement des processeurs. composantes électroniques. échangeur de chaleur des procédés industriels. etc.). Et si l'amélioration du transfert de chaleur par convection réside aux centres d'intérêt des chercheurs l'étude et l'amélioration du transfert thermique des fluides physicochimiques dites nano fluides est devenue un besoin.

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système en particulier la température entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x.y.z.t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température.

Nous distinguerons deux cas :

Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.

Évolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

II.1.1 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad \text{II.1}$$

Où S est l'aire de la surface (m^2).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad \text{II.2}$$

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide l'énergie étant transmise par déplacement du fluide il S'appelle

II.1.2 La convection

La convection correspond à des transports supportés par des mouvements macroscopiques de la matière.

Par exemple dans un fluide (gaz ou liquide) les différences de température au sein du milieu entraînent des mouvements convectifs. L'air chaud au voisinage d'un radiateur d'une pièce d'habitation est plus léger tend ainsi à s'élever et à être remplacé par de l'air plus froid provoquant de la sorte une convection qui tend à uniformiser la température de la pièce.

Transmission provoqué par le déplacement d'un fluide (liquide ou gazeux)

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

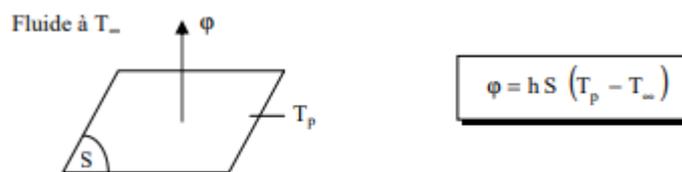


Figure II.7 : Schéma du transfert de chaleur convectif

Avec :

Φ Flux de chaleur transmis par convection (W)

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

T_p Température de surface du solide ($^\circ C$)

T_∞ Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ C$)

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

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection H est fonction de la nature du fluide de sa température de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

Ce type de transfert de chaleur est utilisé dans les échangeurs de chaleurs qui permet d'assurer le transfert de chaleur entre deux fluides sans que ces derniers ne se mélangent. Ce transfert se fait à travers une paroi aux capacités conductrices élevées.

II.2 Les échangeurs de chaleurs

Les échangeurs thermiques sont des éléments essentiels du domaine du chauffage et de la climatisation. Un échangeur thermique permet le transfert de chaleur entre deux fluides au travers d'une paroi. Le matériau qui compose l'échangeur thermique doit alors être le plus conducteur possible afin de limiter les pertes thermiques et favoriser l'échange.

Pour que l'échange soit possible il doit y avoir différence de température. Le delta de température (dT) est généralement exprimé en Kelvin (K) ou en degrés Celsius ($^{\circ}C$). De ce fait, au niveau de l'échangeur le premier fluide entre chaud et ressort refroidi tandis que le second fluide entre froid et ressort plus chaud.

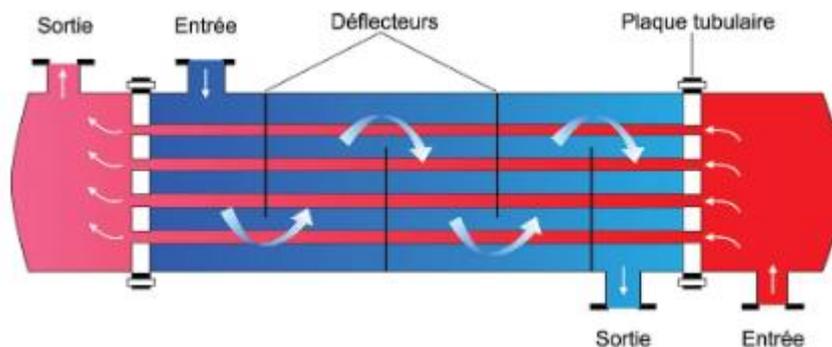


Figure II.8 : Le principe de fonctionnement

Il existe de nombreux types d'échangeurs thermiques à air ou à eau. On retrouve également le fluide caloporteur chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de températures. Ces fluides interviennent dans les échangeurs de chaleur propres à l'habitat des particuliers avec le radiateur électrique à inertie par exemple.

L'échange de chaleur se produit toujours par convection : plus la surface d'échange est grande plus l'échange est performant.

On peut distinguer trois types d'échangeurs de chaleur principaux :

- **à cocourant (ou échangeur antiméthodique) :** les deux fluides circulent parallèlement et dans le même sens. Dans un échangeur antiméthodique, la température de sortie du fluide froid est nécessairement moins élevée que la température de sortie du fluide chaud.
- **à contrecourant (on parle aussi d'échangeur méthodique) :** les deux fluides circulent parallèlement mais dans les sens opposés. Dans un échangeur méthodique, le coefficient d'échange est sensiblement supérieur à celui d'un échangeur antiméthodique et la température de sortie du fluide froid peut être plus élevée que la température de sortie du fluide chaud.
- **À courants croisés :** les deux fluides circulent dans des directions plus ou moins perpendiculaires.

Le courant croisé sur les bancs de tubes est couramment rencontré dans la pratique dans la chaleur les équipements de transfert tels que les condenseurs et les évaporateurs des centrales électriques, réfrigérateurs et climatiseurs. Dans un tel équipement un fluide se déplace à travers les tubes tandis que l'autre se déplace sur les tubes dans une direction perpendiculaire. Dans un échangeur de chaleur qui implique un banc de tubes les tubes sont généralement placés dans une coquille (et donc le nom d'échangeur de chaleur à calandre) en particulier lorsque le fluide est un liquide et le fluide s'écoule à travers l'espace entre les tubes et la coquille. Il existe de nombreux types d'échangeurs de chaleur à calandre et tube. Dans cette section nous considérons les aspects généraux d'écoulement sur un banc de tubes et essayons de développer une meilleure et plus intuitive supervision de la performance des échangeurs de chaleur impliquant une batterie de tubes. L'écoulement à travers les tubes peut être analysé en considérant l'écoulement à travers un single tube et en multipliant les résultats par le nombre de tubes.

Ce n'est pas le cas pour l'écoulement sur les tube cependant puisque les tubes affectent le modèle d'écoulement et le niveau de turbulence en aval et donc le transfert de chaleur vers ou depuis eux comme illustré à la Fig. Par conséquent lors de l'analyse du transfert de chaleur à partir d'un banc de tubes en courant croisé il faut considérer tous les tubes du faisceau à la fois.

Les tubes d'une banque de tubes sont généralement disposés en ligne ou en quinconce dans le sens de l'écoulement comme illustré à la Fig. Le diamètre extérieur du tube D est pris comme longueur caractéristique. La disposition des tubes dans le banc de tubes est caractérisée par le pas transversal ST , le pas longitudinal SL et le pas diagonal SD entre les centres des tubes. Le pas diagonal est déterminé par

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + (S_T/2)^2} \quad \text{II.3}$$

Le transfert de chaleur vers ou depuis une banque (ou un faisceau) de tubes en flux croisés est pertinent pour de nombreuses applications industrielles telles que la génération de vapeur dans une chaudière ou le refroidissement de l'air dans le serpentin d'un climatiseur. La disposition géométrique est représentée schématiquement

II.3 Écoulement à travers les bancs de tubes

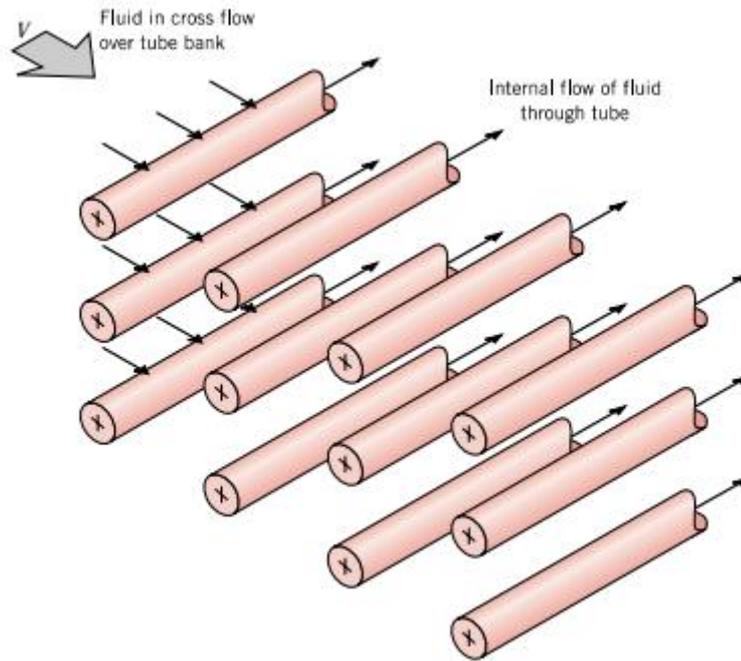


Figure II.9 : Schéma d'un banc de tubes en écoulement transversal.

Dans la figure. En règle générale un fluide se déplace sur les tubes tandis qu'un second fluide à une température différente passe à travers les tubes. Dans cette section nous nous intéressons au transfert de chaleur par convection associé à l'écoulement transversal sur les tubes. Les rangées de tubes d'un banc sont soit décalées soit alignées dans le sens de la vitesse du fluide V (figure). La configuration est caractérisée par le diamètre du tube D et par le pas transversal ST et le pas longitudinal S , mesurés entre les centres des tubes. Les conditions d'écoulement à l'intérieur de la berge sont dominées par les effets de séparation de la couche limite et par les interactions de sillage qui à leur tour influencent le transfert de chaleur par convection.

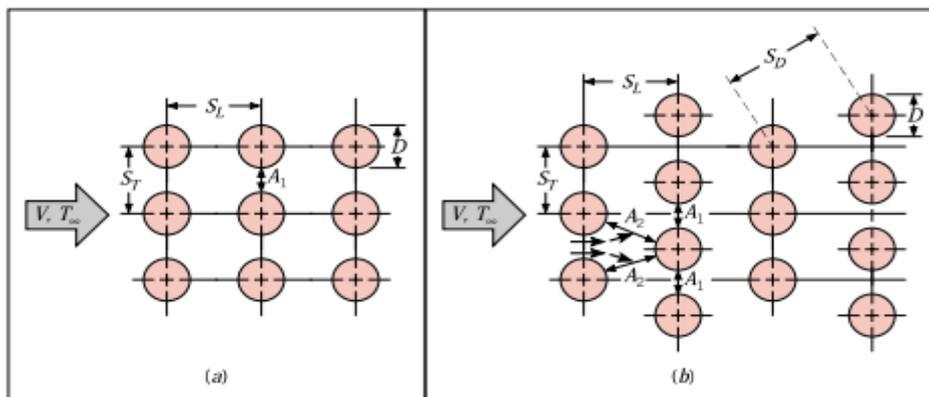


Figure II.10 : Dispositions de tubes dans une rangée. (a) Alignés. (b) En quinconce.

Le coefficient de transfert thermique associé à un tube est déterminé par sa position dans le banc. Le coefficient d'un tube de la première rangée est considéré égal à celui d'un tube unique en écoulement transversal tandis que des coefficients de transfert de chaleur plus importants sont associés aux tubes des rangées intérieures. Les tubes des premières rangées reçoivent comme une grille génératrice de turbulences ce qui augmente le coefficient de transfert de chaleur pour les tubes des rangées suivantes. Dans la plupart des configurations cependant les conditions de transfert de chaleur se stabilisent de sorte que peu de changement de se produit dans le coefficient de convection pour un tube au-delà de la quatrième ou cinquième rangée. Généralement on souhaite connaître le coefficient moyen de transfert de chaleur pour l'ensemble du faisceau de tubes. Pour le flux d'air à travers des faisceaux de tubes composés de 10 rangées ou plus ($N_1 = 10$). Grimison [19] a obtenu une corrélation de la forme

$$\overline{Nu}_D = C_1 Re_{D,max}^m \left[\begin{array}{l} N_L \geq 10 \\ 2000 \leq Re_{D,max} \leq 40,000 \\ Pr = 0.7 \end{array} \right] \quad \text{II.4}$$

où C_1 et la jument sont répertoriés dans le tableau II.8 et

$$Re_{D,max} \equiv \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad \text{II.5}$$

Il est devenu courant d'étendre ce résultat à d'autres fluides par l'insertion du facteur. auquel cas

S_L/D	S_T/D							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
	C_1	m	C_1	m	C_1	m	C_1	m
Aligned								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Staggered								
0.600	—	—	—	—	—	—	0.213	0.636
0.900	—	—	—	—	0.446	0.571	0.401	0.581
1.000	—	—	0.497	0.558	—	—	—	—
1.125	—	—	—	—	0.478	0.565	0.518	0.560
1.250	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.500	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2.000	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3.000	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

Tableux II.8 : Constantes des équations pour le débit d'air sur un banque de tubes de 10 rangées ou plus

$$\overline{Nu}_D = 1.13 C_1 Re_{D,\max}^m Pr^{1/3} \quad \text{II.6}$$

$$\left[\begin{array}{l} N_L \geq 10 \\ 2000 \leq Re_{D,\max} \leq 40,000 \\ Pr \geq 0.7 \end{array} \right] \quad \text{II.7}$$

Toutes les propriétés apparaissant dans les équations cidessus sont attribuées à la température du film. Si $N_L < 10$.un facteur de correction peut être appliqué tel que

$$\overline{Nu}_D|_{(N_L < 10)} = C_2 \overline{Nu}_D|_{(N_L \geq 10)} \quad \text{II.8}$$

où C_2 est donné dans le tableauII.9 . Le nombre de Reynolds Repmax pour les corrélations précédentes est basé sur la vitesse de fluide maximale se produit dans le banc de tubes. Pour la disposition alignée. Vmax se produit au plan transversal A. de la figureII.10.et à partir de l'exigence de conservation de masse pour un fluide incompressible

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad \text{II.9}$$

Pour la configuration en quinconce. la vitesse maximale peut se produire soit dans le plan transversal A. soit dans le plan diagonal A. de la Figure . Il se charge en A. si les rangées sont espacées de telle sorte que

$$2(S_D - D) < (S_T D) \quad \text{II.10}$$

Le facteur 2 résulte de la bifurcation subie par le fluide se fluide du plan A au plan A2. Donc Vmax se produit en A₂ si

$$S_D = \left[S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2} \right)^2 \right]^{1/2} < \frac{S_T + D}{2} \quad \text{II.11}$$

auquel cas il est donné par

$$V_{\max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \quad \text{II.12}$$

Si Vax se produit en A. pour la configuration échelonnée. il peut à nouveau être calculé à partir de l'équation .

N_L	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aligned	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99
Staggered	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

Tableux II.9 : Facteur de correction C2 pour $N_L < 10$

Configuration	$Re_{D,max}$	C	m
Aligned	$10-10^2$	0.80	0.40
Staggered	$10-10^2$	0.90	0.40
Aligned	10^2-10^3	Approximate as a single (isolated) cylinder	
Staggered	10^2-10^3		
Aligned ($S_T/S_L > 0.7$) ^a	$10^3-2 \times 10^5$	0.27	0.63
Staggered ($S_T/S_L < 2$)	$10^3-2 \times 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.60
Staggered ($S_T/S_L > 2$)	$10^3-2 \times 10^5$	0.40	0.60
Aligned	$2 \times 10^5-2 \times 10^6$	0.021	0.84
Staggered	$2 \times 10^5-2 \times 10^6$	0.022	0.84

Tableux II.10 : Constantes de le banc de tubes en courant croisé

Des résultats plus récents ont été obtenus et Zukauskas [15] a proposé une corrélation de la forme

$$Nu_D = C Re_{D,max}^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad \text{II.13}$$

$$\left[\begin{array}{l} N_L \geq 20 \\ 0.7 \leq Pr \leq 500 \\ 1000 \leq Re_{D,max} \leq 2 \times 10^6 \end{array} \right] \quad \text{II.14}$$

Où toutes les propriétés, sauf Pr, sont évaluées à la moyenne arithmétique des températures d'entrée et de sortie du fluide et les constantes C et m sont répertoriés dans le tableau II.10 . La nécessité d'évaluer les propriétés du fluide à la moyenne arithmétique des températures d'entrée ($T_i = T$) et de sortie (T) est dictée par le fait que la température du fluide diminuera ou augmentera respectivement, en raison du transfert de chaleur vers ou depuis les tubes .

Si le changement de température du fluide $|T_f - T_0|$ est important une erreur significative peut résulter de l'évaluation des propriétés à la température d'entrée. Si $N < 20$ un facteur de correction peut être appliqué tel que

$$\overline{Nu}_D|_{(N_i < 20)} = C_2 \overline{Nu}_D|_{(N_i \geq 20)}$$

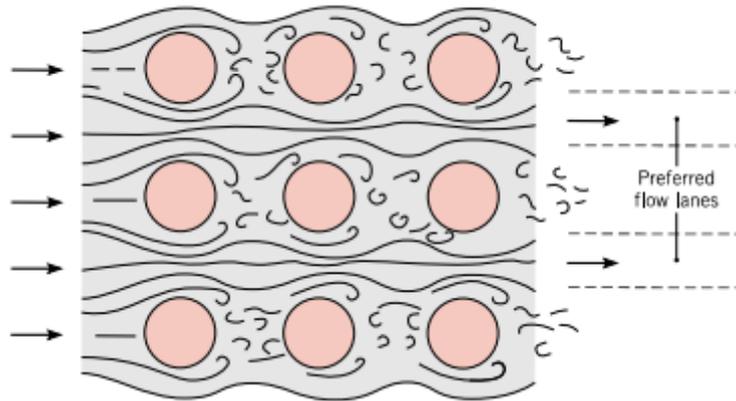


Figure II.11 : Conditions d'écoulement pour les tubes alignés

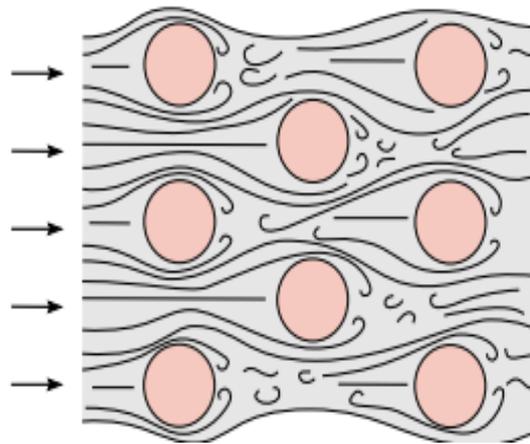


Figure II.12 : Conditions d'écoulement pour les tubes en quinconce

L'écoulement autour des tubes de la première rangée d'un banc de tubes correspond à celui d'un seul cylindre (isolé) en écoulement transversal. Cependant pour les rangées suivantes, le débit dépend fortement de la disposition du banc de tubes (Figure 10). Les tubes alignés au-delà de la première rangée se trouvent dans les sillages turbulents des tubes amont et pour des valeurs modérées de S , les coefficients de convection associés aux rangées aval sont renforcés par la turbulence de l'écoulement. Typiquement le coefficient de convection d'une rangée augmente avec l'augmentation du nombre de

rangées jusqu'à environ la cinquième rangée après quoi il y a peu de changement dans la turbulence et donc dans le coefficient de convection. Cependant pour de petites valeurs de S_T/S_L les rangées en amont en effet protègent les rangées en aval d'une grande partie du débit et le transfert de chaleur est affecté négativement. C'est-à-dire que le trajet d'écoulement préféré se trouve dans des couloirs entre les tubes et une grande partie de la surface du tube n'est pas exposée à l'écoulement principal. Pour cette raison le fonctionnement de batteries de tubes alignées avec $S_T/S_L < 0.7$ (tableau 10) n'est pas souhaitable. Pour le réseau étagé cependant le trajet du flux principal est plus tortueux et une plus grande partie de la surface des tubes aval reste dans ce trajet. En général l'amélioration du transfert de chaleur est favorisée par l'écoulement plus tortueux d'un agencement en quinconce en particulier pour les petits nombres de Reynolds ($Re_D \leq 100$). Étant donné que le fluide peut subir un grand changement de température lorsqu'il se déplace dans le banc de tubes, le taux de transfert de chaleur pourrait être considérablement surestimé en utilisant $\Delta T = T_s - T_\infty$ comme différence de température dans la loi de refroidissement de Newton.

Comme le fluide se déplace dans la berge sa température se rapproche de T et $[\Delta T]$ diminue. La forme appropriée de ΔT est indiquée comme étant une différence de température moyenne logarithmique

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_f) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{T_s - T_f}{T_s - T_o}\right)} \quad \text{II.15}$$

Où T_f et T_o sont les températures du fluide lorsqu'il entre et sort de la berge respectivement. La température de sortie, qui est nécessaire pour déterminer ΔT_{lm} , peut être estimée à partir

$$\frac{T_s - T_o}{T_s - T_f} = \exp\left(-\frac{\pi D N \bar{h}}{\rho V N_T S_T c_p}\right) \quad \text{II.16}$$

Où N est le nombre total de tubes dans la berge et N_T est le nombre de tubes dans le plan transversal. Une fois ΔT_{lm} connu le taux de transfert de chaleur par unité de longueur des tubes peut être calculé à partir de

$$q' = N(\bar{h}\pi D \Delta T_{lm}) \quad \text{II.17}$$

Les résultats précédents peuvent être utilisés pour déterminer les taux de transfert de masse associés à l'évaporation ou à la sublimation à partir des surfaces d'un banc de cylindres en écoulement transversal. Encore une fois il suffit de remplacer respectivement Nu_D et Pr par Sh et Sc . Nous terminons en reconnaissant qu'il y a généralement autant d'intérêt pour la pression baisse associée à l'écoulement à travers un banc de tubes comme dans le taux de transfert de chaleur global. La puissance nécessaire pour déplacer le fluide à travers la berge est souvent une dépense d'exploitation majeure et est directement proportionnel à la chute de pression qui peut être exprimée comme [15]

II.4 La chute de pression

Une autre quantité d'intérêt associée aux bancs de tubes est la perte de charge ΔP qui est la perte de charge irréversible entre l'entrée et la sortie du banc de tubes. C'est une mesure de la résistance que les tubes offrent pour s'écouler sur eux et s'exprime comme suit :

$$\Delta P = N_L f \chi \frac{\rho V_{\max}^2}{2} \quad \text{II.18}$$

Où f est le facteur de frottement et χ est le facteur de correction tous deux tracés en Figures. Contre le nombre de Reynolds basé sur la maximale vitesse de fluide V_{\max} . Le facteur de frottement de la Figure est pour un banc de tubes carrés en ligne ($S_T = S_L$) et le facteur de correction donné dans l'encart est utilisé pour tenir compte des effets de la déviation des dispositions rectangulaires en ligne de la disposition en carré. De même le facteur de frottement de la Figure est pour un banc de tubes équilatéral en quinconce ($S_T = S_D$) et le facteur de correction doit tenir compte des effets de l'écart par rapport à la disposition équilatérale. Notez que $\chi = 1$ pour les arrangements en carré et en triangle équilatéral. De plus la chute de pression se produit dans le sens de l'écoulement et nous avons donc utilisé N_L (le nombre de rangées) dans la relation ΔP . La puissance nécessaire pour déplacer un fluide à travers un banc de tubes est proportionnelle à la chute de pression et lorsque la chute de pression est disponible la puissance de pompage nécessaire pour surmonter la résistance à l'écoulement peut être déterminée à partir de

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{V} \Delta P = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \quad \text{II.19}$$

Où f est le facteur de frottement et χ est le facteur de correction tous deux tracés en Figures II.13 et II.14. Contre le nombre de Reynolds basé sur la max vitesse où $\dot{V} = V(N_T S_T L)$ est le débit volumique et $\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho V(N_T S_T L)$ est le débit massique du fluide à travers le banc de tubes. Notez que la puissance nécessaire pour maintenir un fluide circulant dans la batterie de tubes (et donc le coût de fonctionnement) est proportionnelle à la perte de charge. Par conséquent les avantages de l'amélioration du transfert de chaleur dans une batterie de tubes via un réarrangement doivent être mis en balance avec le coût des besoins en énergie supplémentaires.

Dans cette section nous avons limité notre considération aux bancs de tubes avec base surfaces (pas d'ailettes). Les bancs de tubes avec des surfaces à ailettes sont également couramment utilisés dans la pratique en particulier lorsque le fluide est un gaz et des corrélations de transfert de chaleur et de perte de charge peuvent être trouvées dans la littérature pour les bancs de tubes avec des ailettes à broches des ailettes à plaques des ailettes à bande etc.

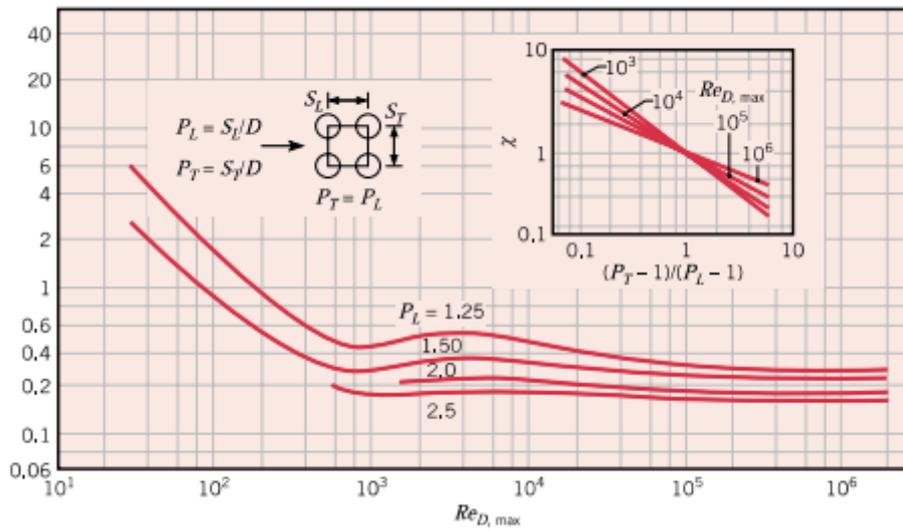


Figure II.13: Facteur de frottement et correction facteur χ pour bancs de tubes en disposition en ligne

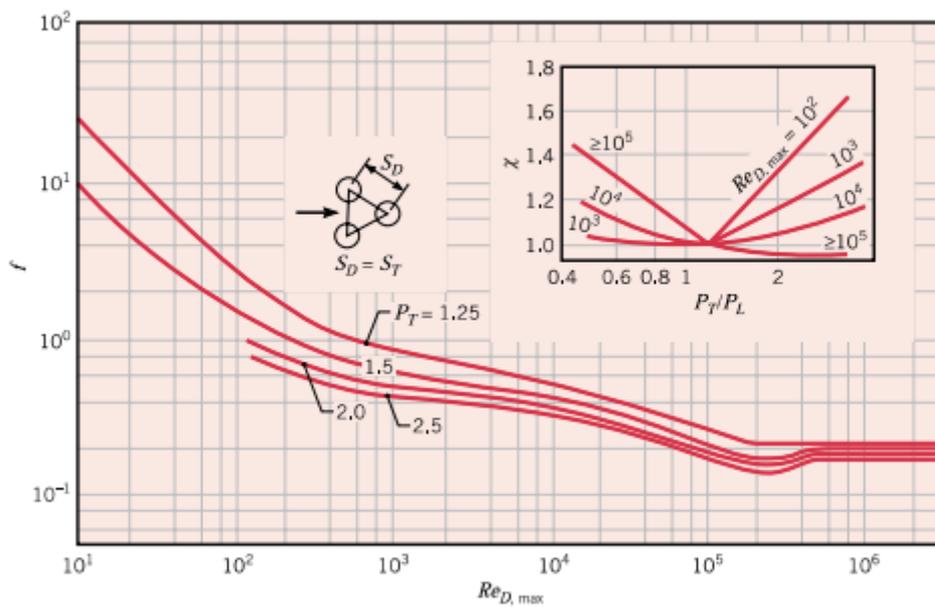


Figure II.14 : Facteur de frottement et correction facteur χ pour bancs de tubes en Disposition en quinconce

II.5 Bilans énergétiques

La figure montre l'évolution du flux de chaleur transféré du fluide chaud vers le fluide froid (en fonction du débit du fluide chaud. Ce flux a été évalué en intégrant les résultats obtenus de la caractérisation expérimentale des propriétés thermophysiques à la température moyenne (t). En observant la figure II.15 on s'aperçoit que le flux de chaleur transféré en présence des nanofluides dans l'espace central est légèrement supérieur à celui de l'eau déminéralisée notamment à forts débits volumiques.

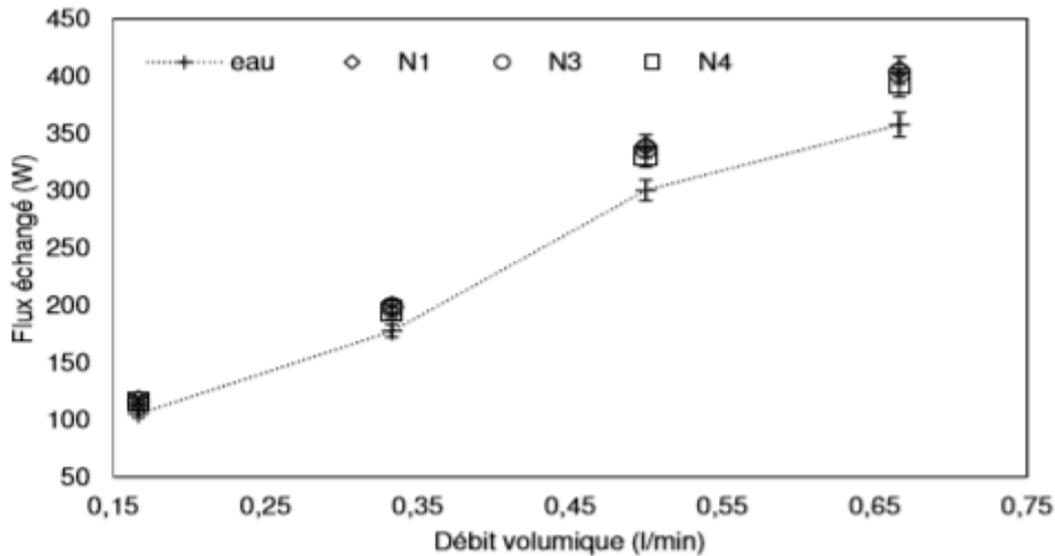


Figure II.15 : Evolution du flux transféré en fonction du débit du fluide chaud

Dans les conditions de fonctionnement de l'échangeur et les conditions de l'expérience fixées, la figure II.15 illustrant l'amélioration du flux échangé des nanofluides N1, N3 et N4 par rapport à l'eau en fonction du nombre de Reynolds dans le tube central montre pour les trois nanofluides un gain sur le flux échangé. Ce gain thermique varie entre 11 et 13 % pour le nanofluide N1 entre 10 et 12,5 % pour le nanofluide N3 et il est de l'ordre de 10 % pour le nanofluide N4. Cette amélioration du flux échangé est en adéquation avec celle évaluée par les mesures de la conductivité thermique.

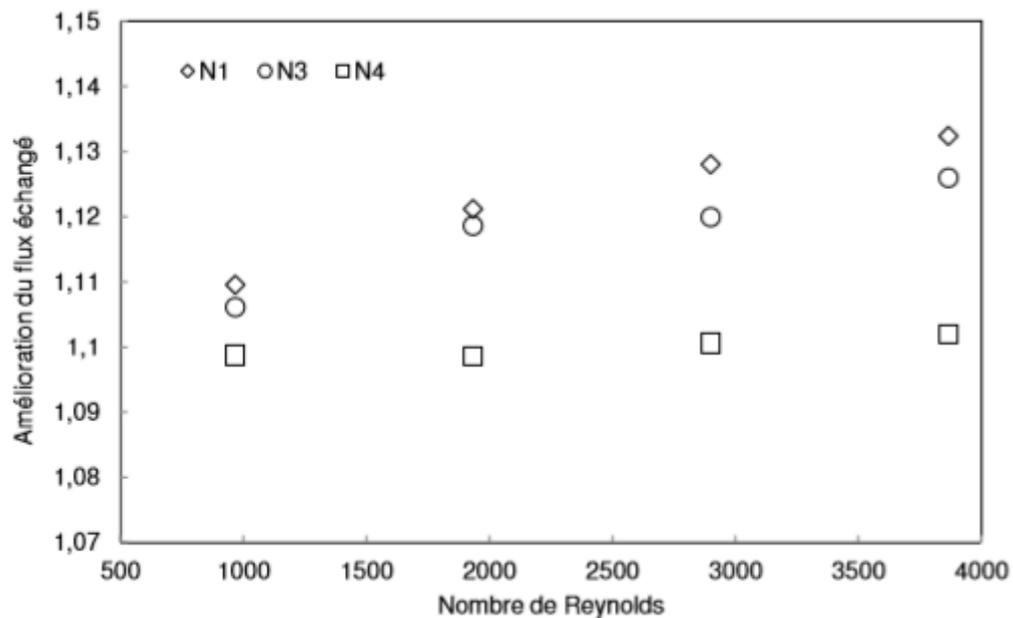
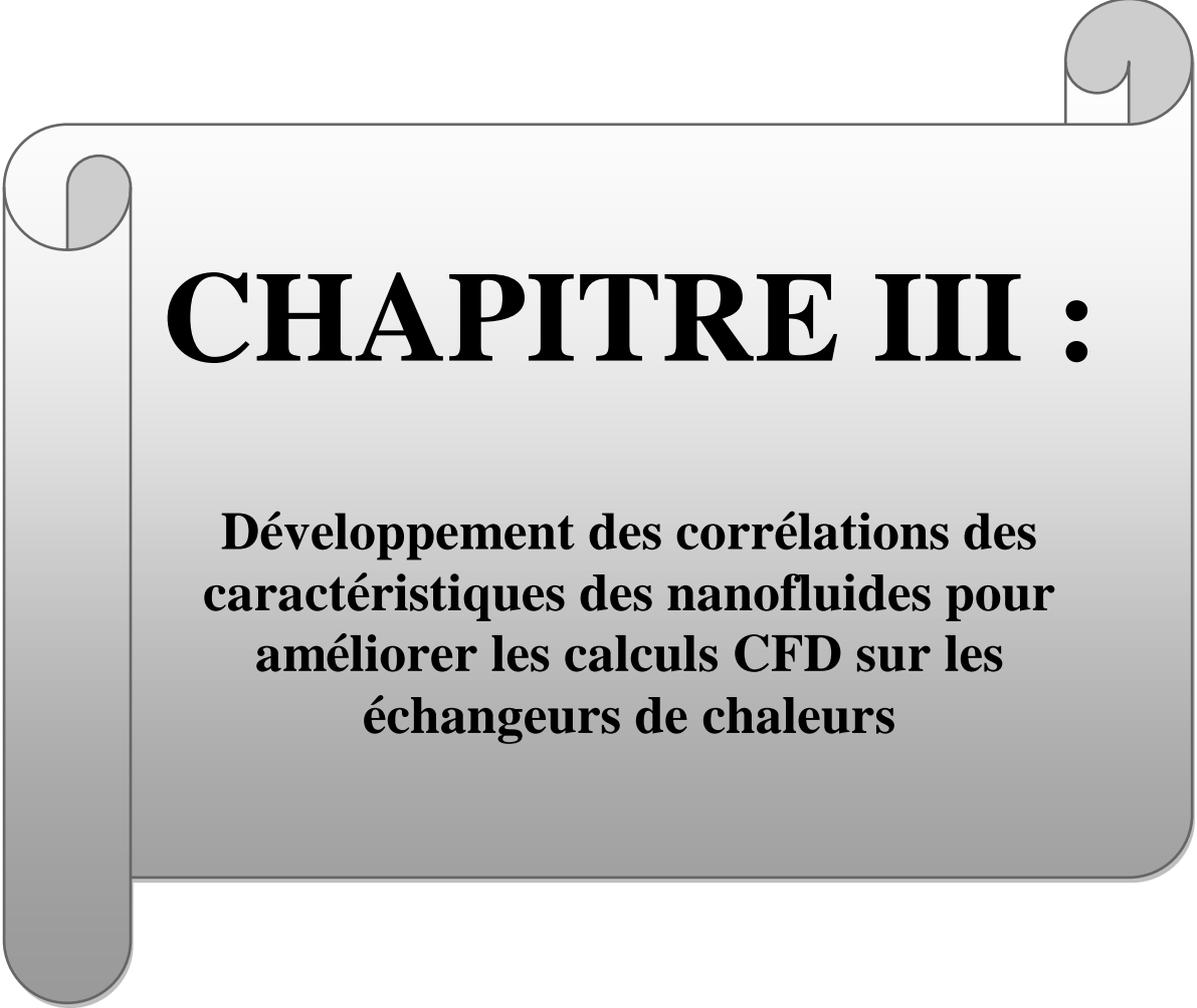


Figure II.16 : Amélioration du flux échangé en fonction du nombre de Reynolds dans l'espace central

Ces résultats confirment que la modification de la conductivité thermique d'un fluide caloporteur par l'ajout des NPs intensifie proportionnellement les transferts thermiques dans l'échangeur de chaleur étudié.

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a dark gray border. The scroll is unrolled on the left and right sides, with the top edge curled up. The text is centered on the scroll.

CHAPITRE III :

**Développement des corrélations des
caractéristiques des nanofluides pour
améliorer les calculs CFD sur les
échangeurs de chaleurs**

III.1 Introduction

Comme nous l'avons rapporté dans le chapitre 1 à partir de nombreux exemples l'ajout des NP modifie considérablement les propriétés thermophysiques du fluide de base. En effet l'insertion des NP dans la solution de base permet d'améliorer la conductivité thermique du nanofluide mais peut aussi augmenter la viscosité dynamique et modifier relativement la chaleur spécifique et la masse volumique de cette solution. En l'absence de relations et modèles fiables permettant de prédire théoriquement l'évolution de ces propriétés il est donc nécessaire d'envisager une caractérisation expérimentale des nanofluides afin de mieux contrôler la solution utilisée.

Ainsi ce chapitre présente les résultats de la caractérisation des principales propriétés thermophysiques des nanofluides étudiés (conductivité thermique, viscosité dynamique, masse volumique). Une analyse des résultats est également développée de façon à étudier l'influence de la température du type de surfactant et des NP sur leurs propriétés thermophysiques ainsi évaluées. Les résultats seront également comparés et discutés visàvis des modèles existants décrits au chapitre 1, en proposant des améliorations et des interprétations selon les tendances obtenues.

Comme nous l'avons mentionné dans l'étude bibliographique du chapitre 1 les modèles.

Nous avons sélectionné un modèle pour chaque corrélation des caractéristiques des nanofluides, ces modèles permettent de reproduire l'évolution de ces caractéristiques.

III.2 Caractérisation de la viscosité dynamique des nanofluides

Dans une première partie nous réalisons une étude complète sur le nanofluide (AL, AL₂O₃, Cu, CuO, TiO₂, SiO₂) de façon à étudier l'effet de la concentration en nanotubes et l'effet de la température sur son comportement rhéologique.

La figure III.17 montre l'évolution de la viscosité apparente du nanofluide en fonction de la température. On observe tout d'abord que la viscosité apparente augmente avec la concentration (entre 0 % et 5 %) des NP et que le comportement rhéologique du nanofluide dépend fortement de la concentration en NP.

On observe à partir de figures que la viscosité apparente du nanofluide diminue en forte baisse (entre 270 K et 320 K) et de manière moins sévère (entre 320 K et 370 K) quand la température augmente dans la gamme de température étudiée (entre 270 K et 370 K).

On note un comportement rhéofluidifiant du nanofluide avec une viscosité apparente qui diminue quand le taux de cisaillement augmente pour toutes les concentrations de NP à la température (entre 270 K et 370 K).

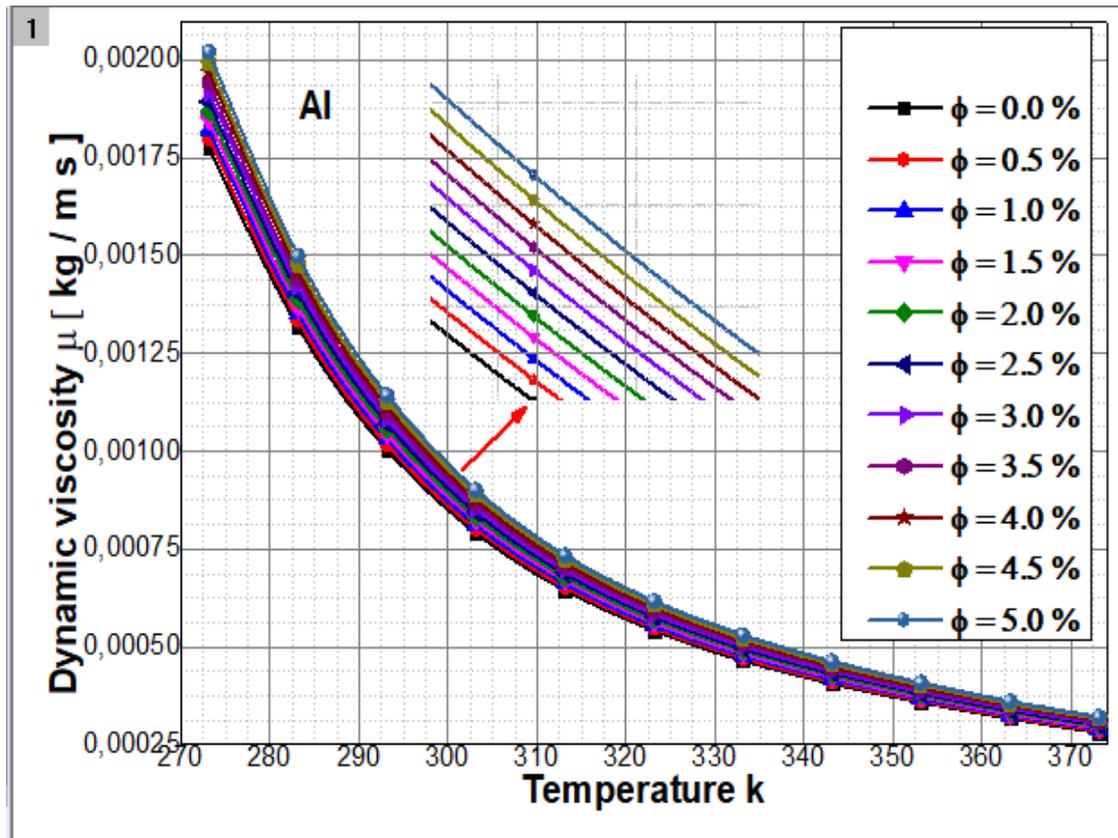


Figure III.17 : Evolution de la viscosité en fonction de la température pour une concentration de NP différente

L'étude expérimentale du comportement rhéologique des nanofluides nous a permis de mettre en évidence l'influence de la concentration la température du type de NPs sur l'évolution de la viscosité des nanofluides à base de NTC testés. On a par ailleurs observé que :

La viscosité augmente avec la concentration de NPs.

La viscosité du nanofluide diminue en fonction de la température.

Les types de nanofluide utilisés n'ont pas d'effet significatif sur la conductivité thermique.

III.3 Caractérisation de la conductivité thermique des nanofluides

La conductivité thermique d'un matériau est une mesure de sa capacité à conduire la chaleur. Pour les liquides de refroidissement et les fluides caloporteurs (également appelés fluides thermiques ou huiles thermiques) une conductivité thermique élevée est souhaitée. De nombreux nanomatériaux offrent de grandes propriétés de conduction thermique. Afin d'utiliser la conductivité thermique supérieure des nanomatériaux des nanofluides sont utilisés comme réfrigérants.

Les mesures expérimentales ont été effectuées sur les nanofluides à d'une gamme de températures de fonctionnement (entre 270 K et 370 K) et de concentrations différentes (entre 0 et 5 %) . Dans cette partie et comme nous avons pu le faire pour la viscosité nous étudions en particulier l'influence de la composition des nanofluides sur leurs conductivités thermiques. L'effet de la concentration de la température est ainsi décrit et discuté dans la suite de cette partie.

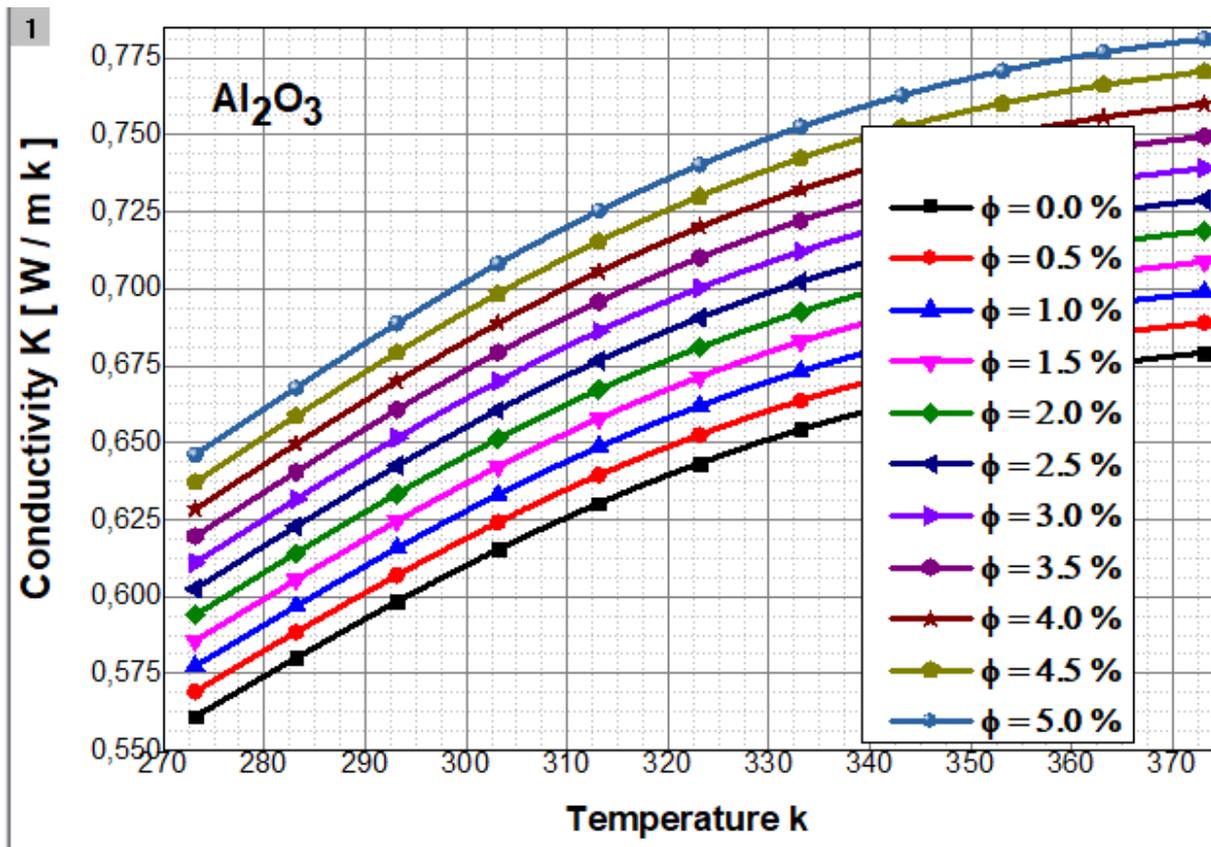


Figure III.18 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température pour une concentration de NP différente

La figure III.18 illustre l'évolution de la conductivité thermique des nanofluides (AL, AL₂O₃, Cu, CuO, TiO₂, SiO₂) en fonction de la température aux différentes concentrations de fonctionnement. Les résultats montrent clairement que la conductivité thermique des nanofluides croît avec la température. Cette augmentation est plus prononcée pour les faibles températures (inférieures à 330 K). Les résultats montrent également que pour tous les nanofluides étudiés l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides se caractérise par une pente plus marquée pour les faibles concentrations.

L'analyse des résultats expérimentaux sur la conductivité thermique des nanofluides à base de NP nous montrent que :

La température a un effet important sur l'amélioration de la conductivité thermique notamment pour des faibles concentrations des NPs pour lesquelles cet effet est plus prononcé. Cette amélioration augmente avec la température.

Les types de nanofluides utilisés n'ont pas d'effet significatif sur la conductivité thermique.

III.4 Caractérisation expérimentale de la masse volumique des nanofluides

L'objectif de cette partie est de caractériser expérimentalement la masse volumique des nanofluides pour l'estimer en général et des suspensions à NPs en particulier en l'absence de données expérimentales. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 1.

Comme nous l'avons évoqué dans le premier chapitre bibliographique en l'absence de mesures expérimentales la masse volumique des nanofluides est souvent calculée à partir de la loi de mélange [PAK/1998].

$$\rho_{nf} = \varphi_v \rho_p + (1 - \varphi_v) \rho_{fb} \quad \text{III.1}$$

La figure III.19 représente respectivement l'évolution de la masse volumique du nanofluide étudié en fonction de la température à concentration (entre 0 et 5 %). Les résultats expérimentaux nous montrent pour chaque concentration d'essai une croissance de la masse volumique du nanofluide avec l'augmentation de la température. On observe une tendance similaire de l'évolution de la masse volumique prédite par le modèle utilisé.

Le modèle utilisé permet d'estimer et de prédire correctement l'évolution de la masse volumique des suspensions de température. Audelà de cette concentration.

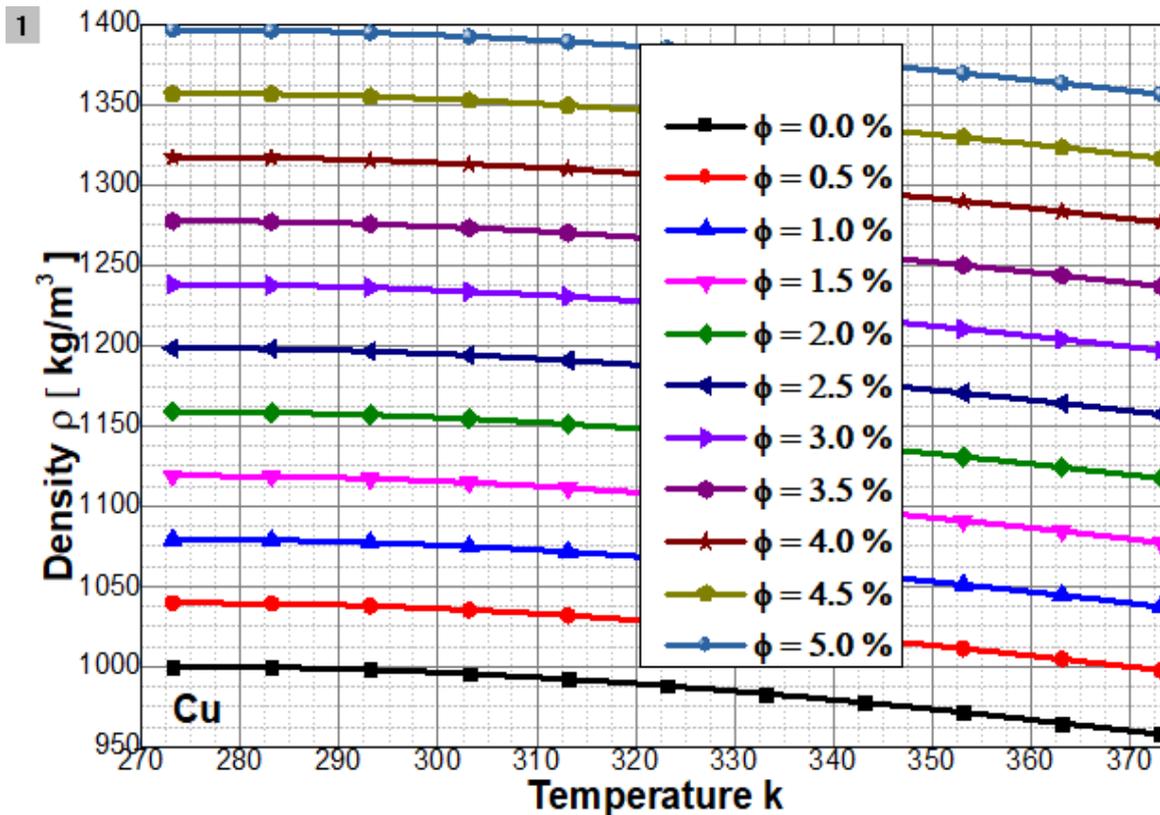


Figure III.19 : Evolution de la masse volumique en fonction de la température pour une concentration de NP déferente

On note une évolution quasilineaire de la masse volumique en fonction de la température (entre 270K et 325K) et léger diminution (entre 325K et 370K) Autrement dit la température n'a pas d'effet significatif sur l'évolution de la masse volumique. Par contre la concentration (entre 0% et 5%) de NPs qui influence positivement sur la masse volumique .

III.5 Caractérisation de la chaleur spécifique des nanofluides

Dans le cadre de ce travail et en l'absence de dispositif expérimental adapté nous n'avons pas caractérisé expérimentalement la chaleur spécifique des nanofluides utilisés. Les résultats de la littérature ont largement montré que la chaleur spécifique des nanofluides peut être estimée.

Avec des modèles précédemment décrits dans l'étude bibliographique. Nous avons donc utilisé ce modèle pour déterminer la chaleur spécifique des nanofluides testés afin d'étudier l'influence de la fraction volumique des NPs et de la température. Au vu des résultats précédents sur la densité des nanofluides. Au vu des résultats précédents sur la densité des nanofluides ce modèle sera d'autant plus adapté que la concentration

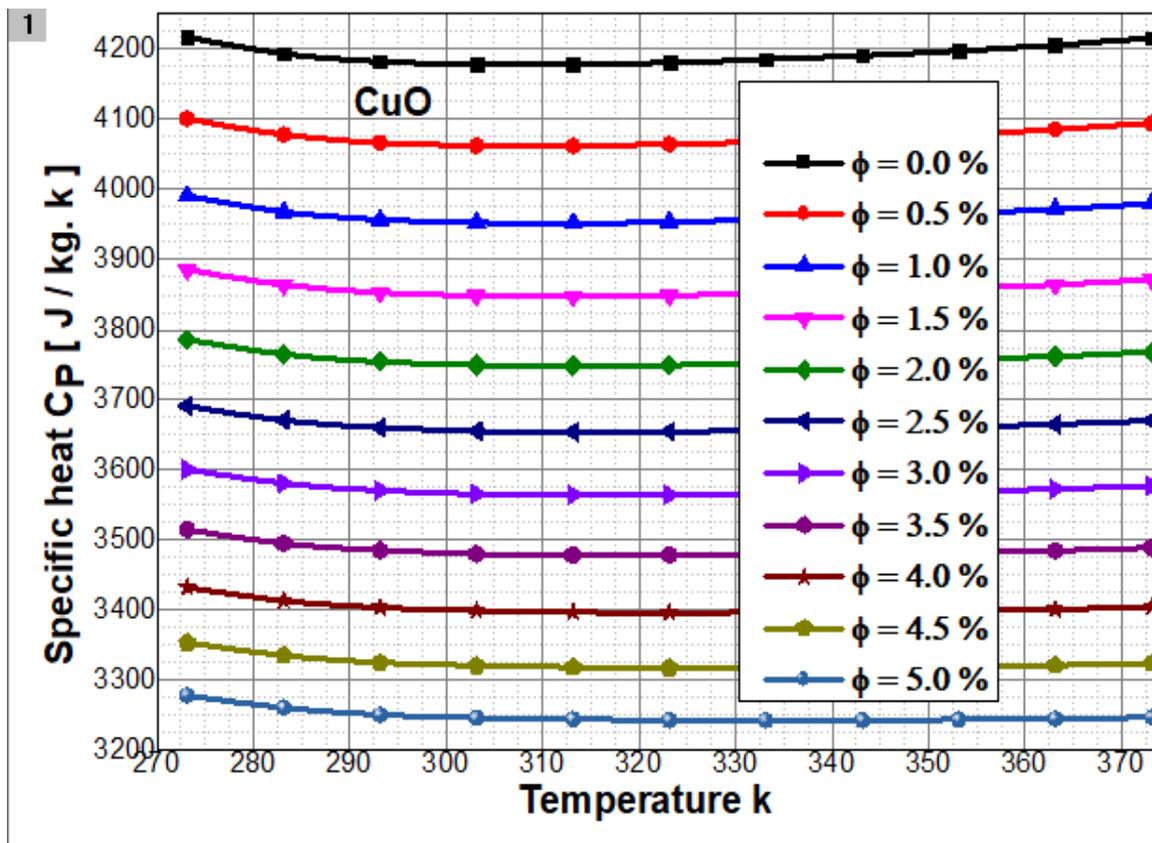


Figure III.20 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température pour une concentration de NP déférente

La figure III.20 montre l'évolution de la chaleur spécifique des nanofluides (AL, AL₂O₃, Cu, CuO, TiO₂, SiO₂) en fonction de la température pour les cinq concentrations (entre 0 et 5 %). cela se traduit par une légère dégradation de la chaleur spécifique des nanofluides.

On note aussi que les courbes des chaleurs spécifiques sont similaires pour tous les nanofluides étudiés.

On note une évolution quasilineaire de la chaleur spécifique en fonction de la température (entre 270 K et 370 K).

III.6 Caractérisation du nombre de Prandtl Pr des nanofluides

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

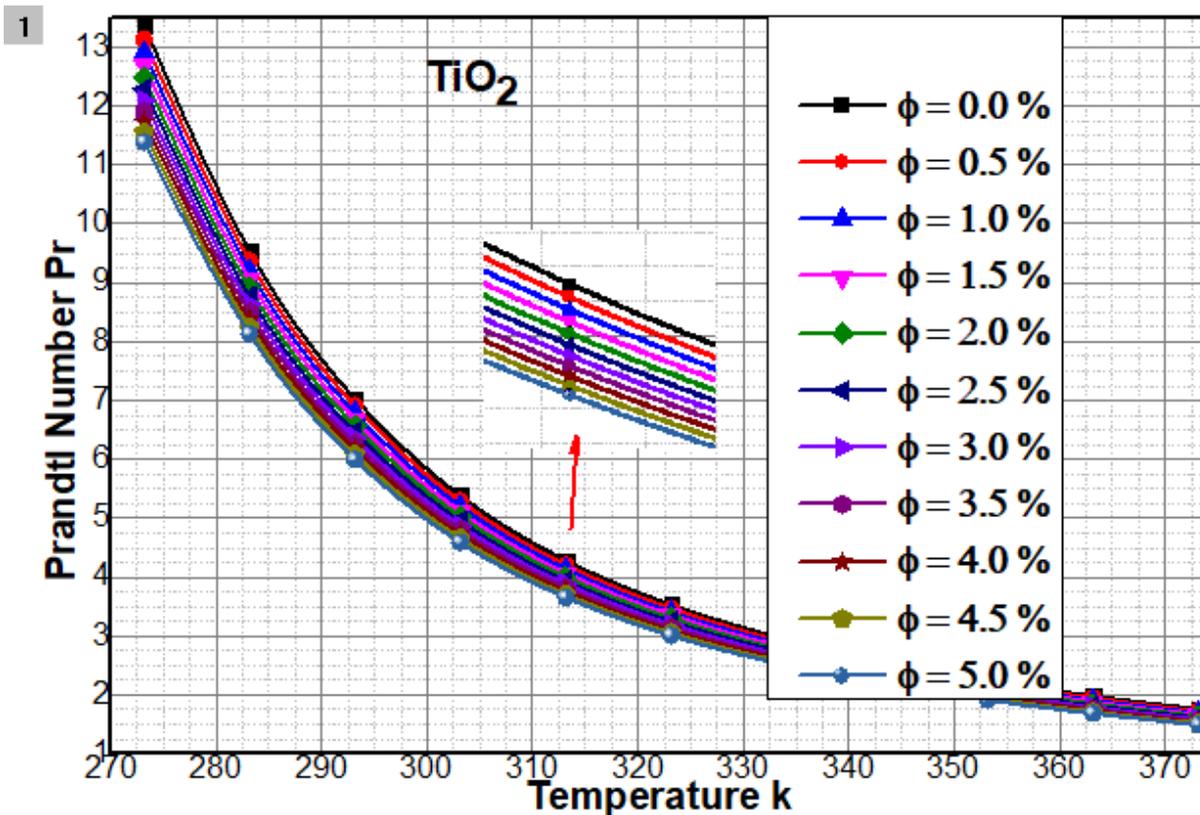


Figure III.21 : Évolution du nombre Pr en fonction de la température pour une concentration de NP déférente

La figure III.21 montre l'évolution du nombre Pr du nanofluide en fonction de la température. On observe tout d'abord que le nombre de Pr diminue avec la concentration (entre 0 % et 5 %) des NP.

On observe à partir de figures que le nombre Pr du nanofluide diminue en forte baisse (de 13 jusqu'à 1.5) (entre 270 K et 370 K) quand la température augmente dans la gamme de température étudiée (entre 270 K et 370 K).

On note une relation inverse entre le développement du nombre de Pr des nanofluides (AL, AL₂O₃, Cu, CuO, TiO₂, SiO₂) et la température et la concentration des NPs.

III.7 Caractérisation du coefficient de volume d'expansion β des nanofluides

La figure III.22 montre l'évolution du coefficient de volume d'expansion β des nanofluides (AL, AL₂O₃, Cu, CuO, TiO₂, SiO₂) en fonction de la température aux différentes concentrations de fonctionnement. Les résultats montrent clairement que le coefficient de volume d'expansion des nanofluides croît avec la température. Les résultats montrent également que pour tous les nanofluides étudiés l'augmentation du coefficient de volume d'expansion approché en fonction de température approché par une diminution de ce coefficient en fonction de concentration.

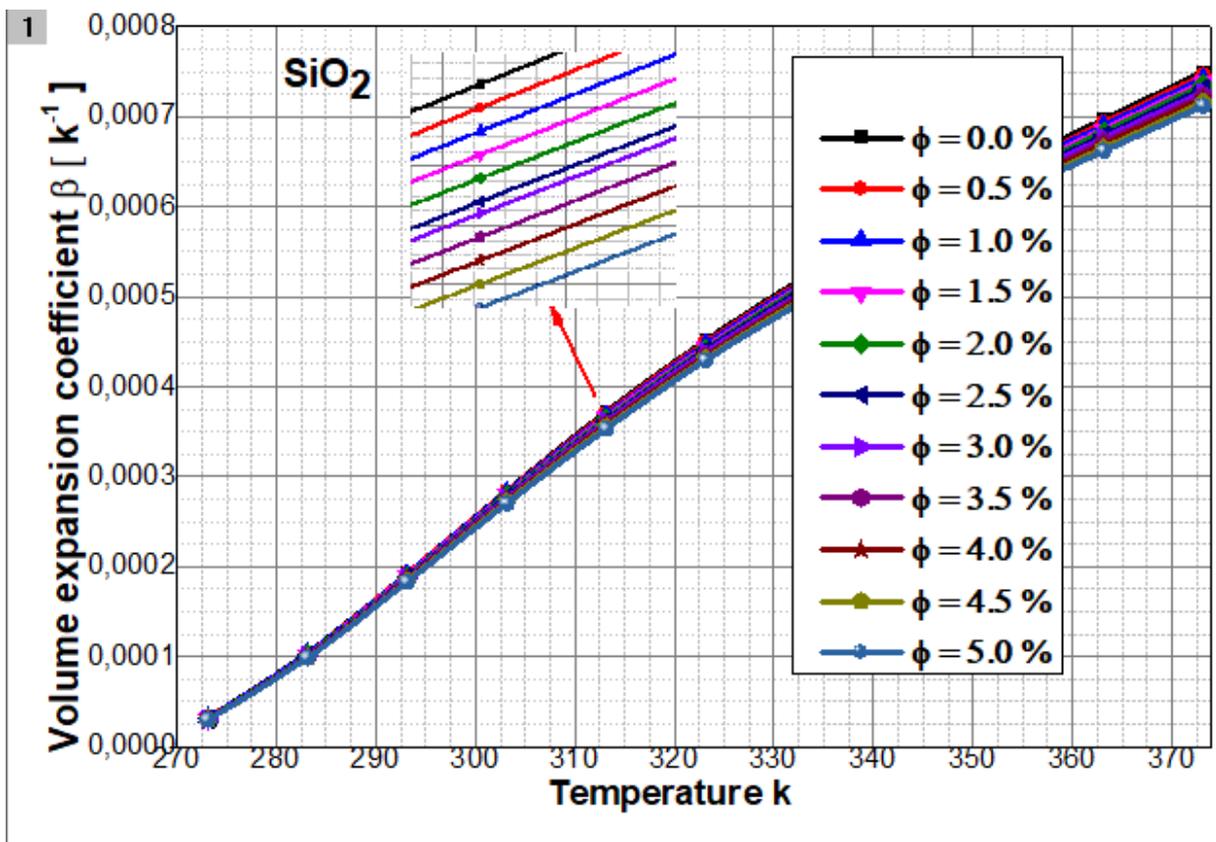


Figure III.22 : Evolution du coefficient de volume d'expansion en fonction de la température pour une concentration de NP déférente.

III.8 Bilan et Conclusions sur les mesures des propriétés thermophysiques des nanofluides

La caractérisation des propriétés thermophysiques des nanofluides étudiés nous a permis de mettre en évidence l'influence de la fraction volumique de la température.

La température a un effet important sur l'amélioration de la conductivité thermique et cette amélioration est plus prononcée à faibles concentrations.

Les valeurs des viscosités dynamiques des nanofluides sont proches quelle que soit la concentration.

La chaleur spécifique est plus importante à faibles concentrations en NPs et elle diminue quand cette concentration croit.

Dans l'objectif d'une exploitation de ces nanofluides dans les échangeurs thermiques liés à l'habitat le choix d'une température de fonctionnement dans un système thermique doit s'appuyer à la fois sur les performances thermophysiques des nanofluides et de leur stabilité en fonction de cette même température.

Aussi les propriétés thermophysiques des nanofluides sont ainsi évaluées à cette température et les principaux résultats sont présentés en première partie du prochain chapitre. On s'intéressera ensuite à l'étude des performances thermiques de ces nanofluides dans les échangeurs décrits au chapitre 2.

III.9 L'interpolation des graphes des correlation des caractéristique des nanofluides

L'interpolation des coefficients des paramètres des nano fluides sont déterminés numériquement par langage fortran. Les résultats de l'interpolation sont présentés dans l'annexe 1.les coefficients utilisée dans chaque équation de parametres suivants de caractère de nanofluides.

$$K(T)=A_0+A_1*T+A_2*T^2$$

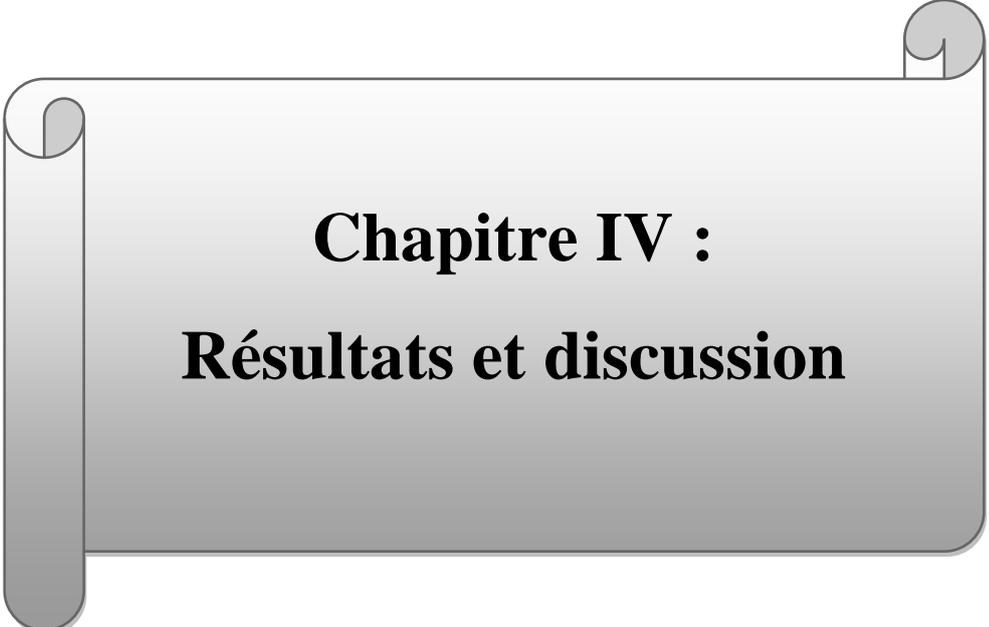
$$\mu(T)=B_0+B_1*T+B_2*T^2+B_3*T^3 + B_4*T^4$$

$$\rho(T)=C_0+C_1*T+C_2*T^2+C_3*T^3 + C_4*T^4 + C_5*T^5 + C_6*T^6$$

$$C_p(T)=D_0+D_1*T+D_2*T^2+D_3*T^3+D_4*T^4+D_5*T^5+D_6*T^6$$

$$Pr(T)=E_0+E_1*T+E_2*T^2+E_3*T^3+E_4*T^4+E_5*T^5+E_6*T^6$$

$$B(T)=F_0+F_1*T+F_2*T^2+F_3*T^3 + F_4*T^4+F_5*T^5$$



Chapitre IV :
Résultats et discussion

IV.1 Introduction

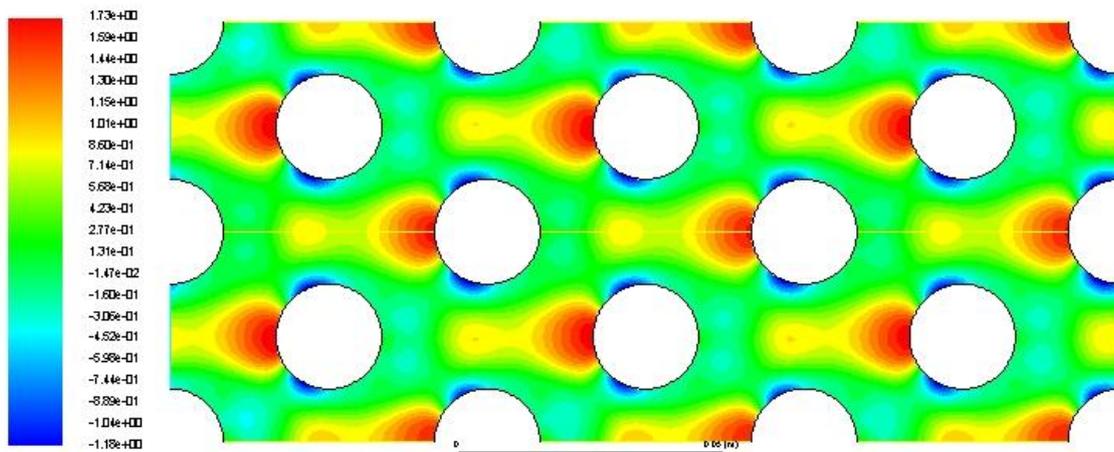
Après avoir saisi les coefficients des équations dirigé par l'interpolation des graphes des caractéristiques dans logiciels fluent (CFD) et écrit le programme de calcul en langage Fortran les principaux résultats obtenus reflétant le comportement des champs thermiques des nanofluides (AL, AL₂O₃, Cu, CuO, TiO₂, SiO₂) pour notre configuration sont exposés dans ce chapitre. Les caractérisation de l'écoulement des nanofluides dans les échangeurs de chaleur a été réalisée en utilisant le logiciel fortran pour donnees des courbes, elles ont été réalisées en utilisant le logiciel Origine .

Les simulations numériques sont effectuées pour un débit massique variée (0.05 .0.5.1 et 3)kg/s pour différentes concentration(ϕ) à chaque instant pour le fluide de base pure ($\phi =0$) et pour les nanofluide (eau + nanoparticules).

La présentation des résultats concernant les champs de température et la variation de vitesse et presion à chaque variation de concentration et débit massique .

IV.2 Résultats et discussion pour le CFD

IV.2.1 Présentation des conteurs de pression pour chaque nanofluide cas du fluide de base ($\phi = 0$.) et le cas d'un nanofluide avec la variation de concentration et de débit massique



FigureIV.23 : contour de pression pour concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (SiO₂)

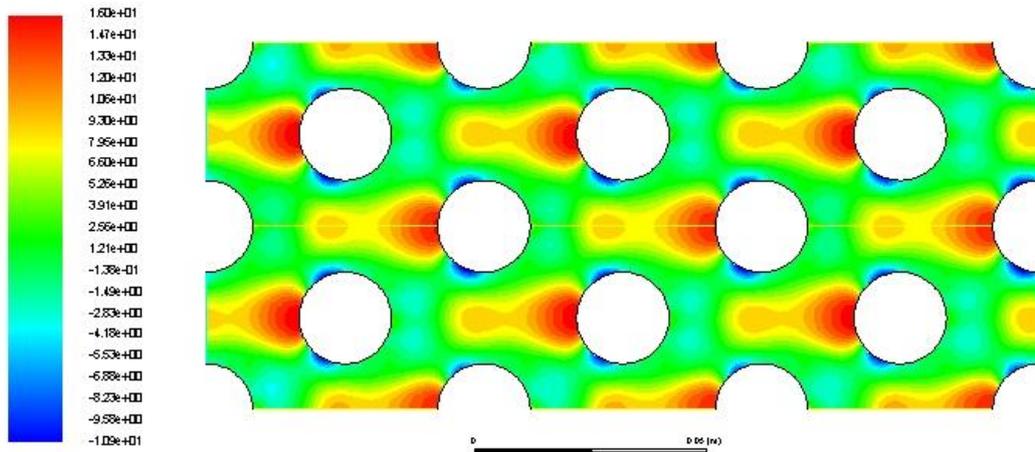


Figure IV.24 : contour de pression pour concentration $\emptyset=1\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (SiO_2)

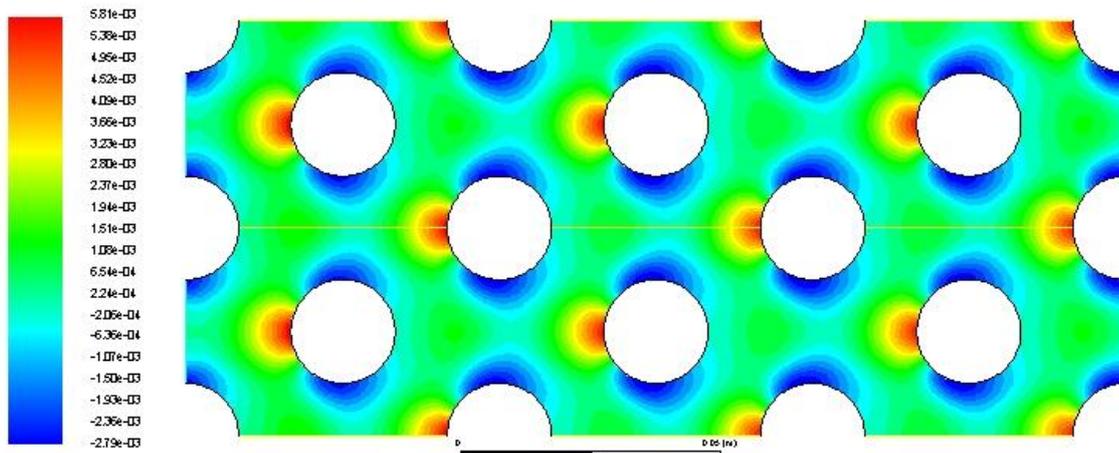


Figure IV.25 : contour de pression pour concentration $\emptyset=1\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO_2)

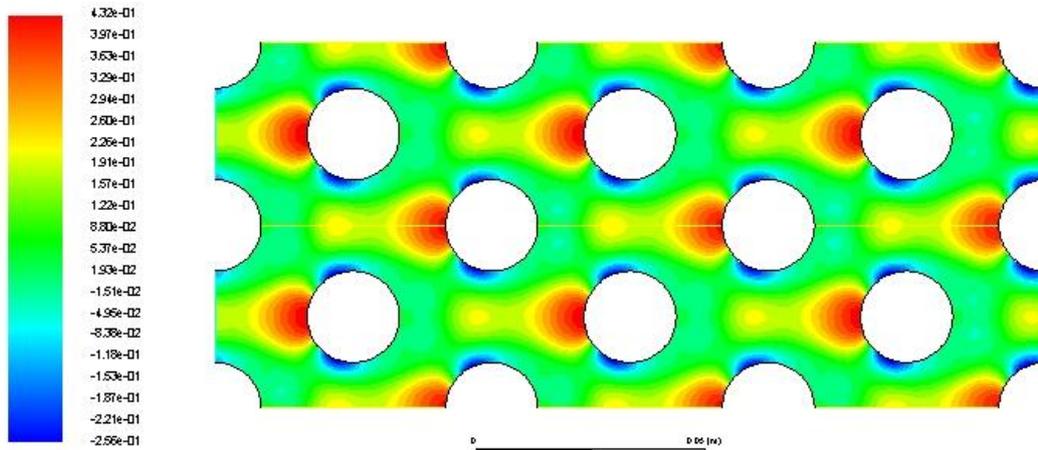


Figure IV.26 : contour de pression pour concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}(\text{SiO}_2)$

Les figures 22 .23.24.et25 illustrent l'évolution de la pression au niveau de la surface d'échange sur les bancs de tubes d'un échangeur de chaleur pour nanofluides SiO_2 et pour quatre débit massique (1 ; 3 ; 0.05 et 0.5) kg/s respectivement aux concentrations de nanoparticule 1%. On constate une pression très élevée a le coté des couches limites des tubes qui ont un contact direct avec l'écoulement de nanofluides et ça pour les débit massique 1 et 3 kg/s . Cette variation de la pression(diminue) avec la diminution de débit massique (0.05 et 0.5 kg/s).les valeurs élevé de la pression sur la zone de contact de l'écoulement avec les tubes associé par la diminution de vitesse de l'écoulement (surpression). on a observé depression (point de separation) dessus et dessous de les tube qui provoque un sillage après les cylindres .

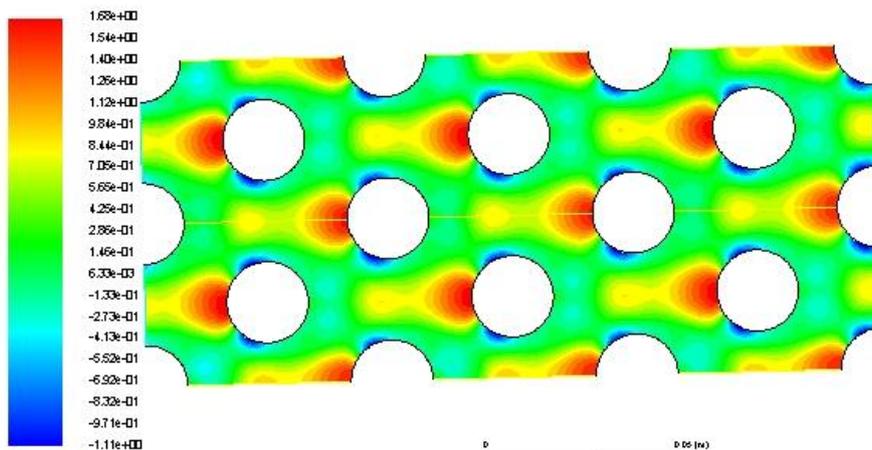


Figure IV.27 : contour de pression pour concentration $\phi=2\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}(\text{AL}_2\text{O}_3)$

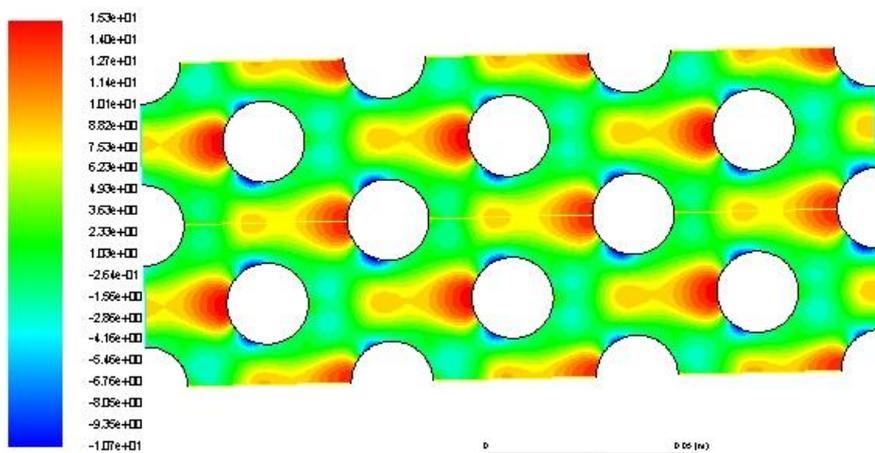


Figure IV.28: contour de pression pour concentration $\text{Ø}=2\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Cu)

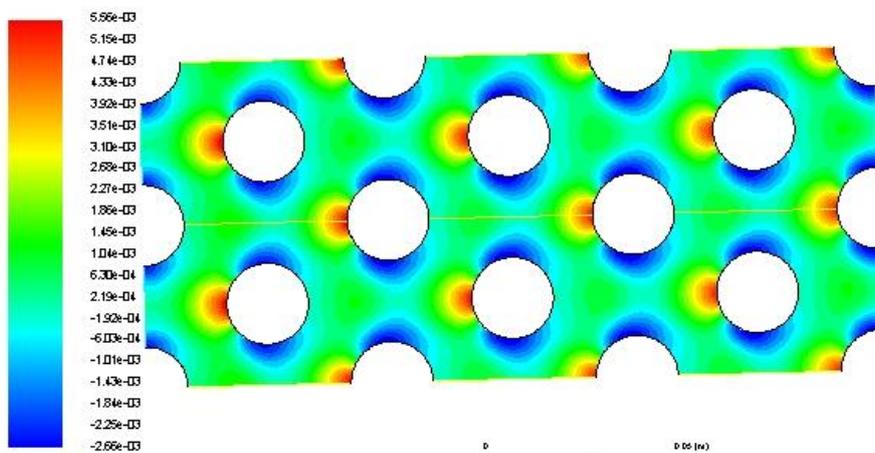


Figure IV.29 : contour de pression pour concentration $\text{Ø}=2\%$ et débit massique $m=0.05 \text{ kg/s}$ (TiO₂)

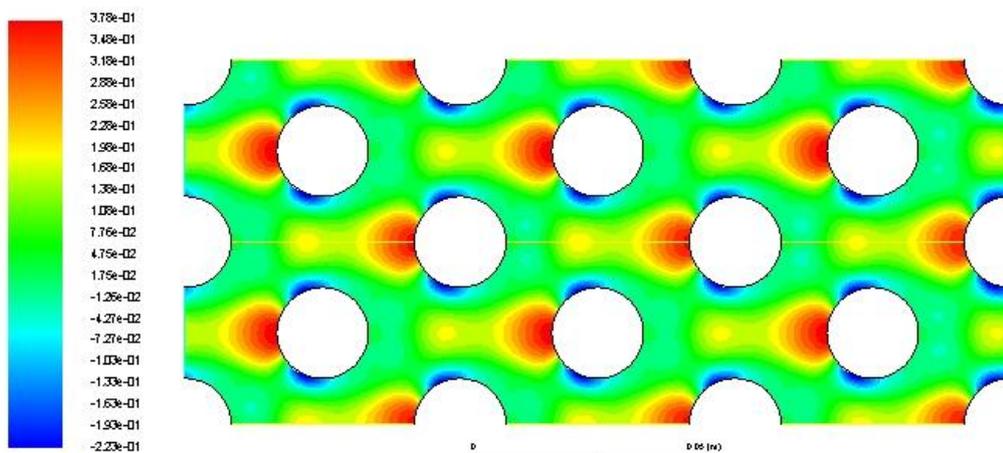
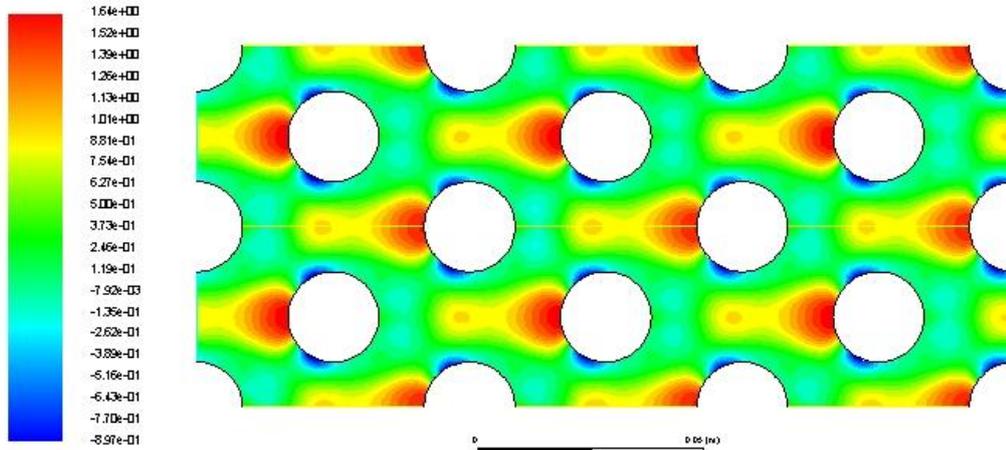


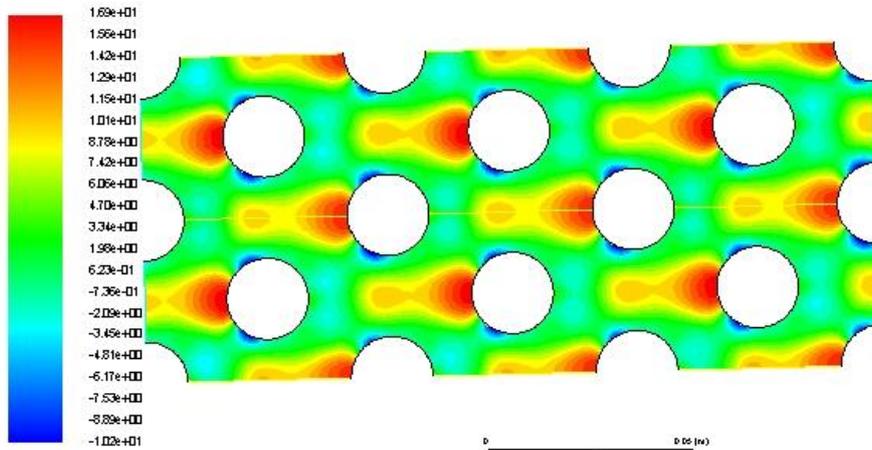
Figure IV.30: contour de pression pour concentration $\text{Ø}=2\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (Al)

les figures 26.27.28et29 ces dessus montre que la variation de nanofluid étudiée n'a aucun influence sur la variation de pression (la pression diminue) avec les débit massique utilise dans la simulation (1 ; 3 ; 0.05 et 0.5) kg/s

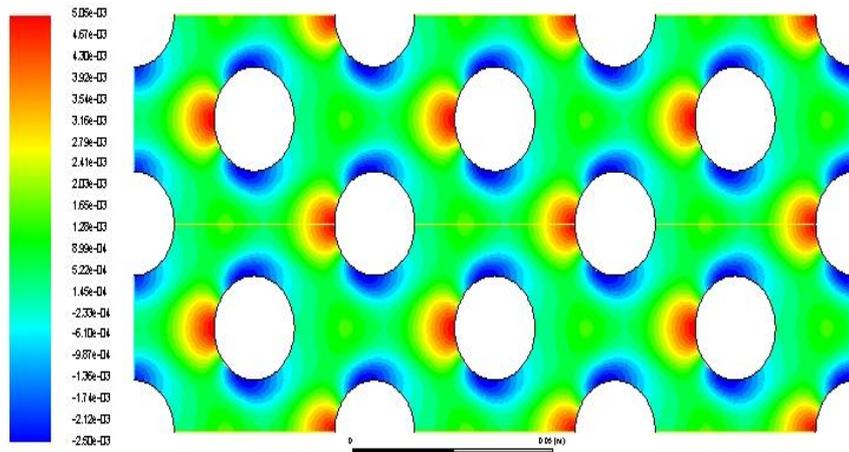
pour une concentration de 2% des nanoparticule . et haut pression dans les couches limites des tubes en particulier du coté opposé au l'écoulement .



FigureIV.31 : contour de pression pour concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (CuO)



FigureIV.32 : contour de pression pour concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (TiO2)



FigureIV.33 : contour de pression pour concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO_2)

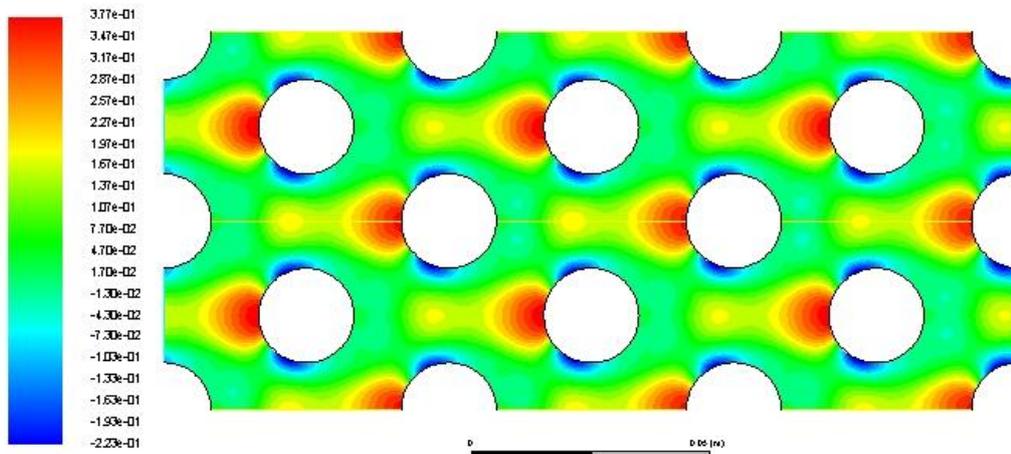
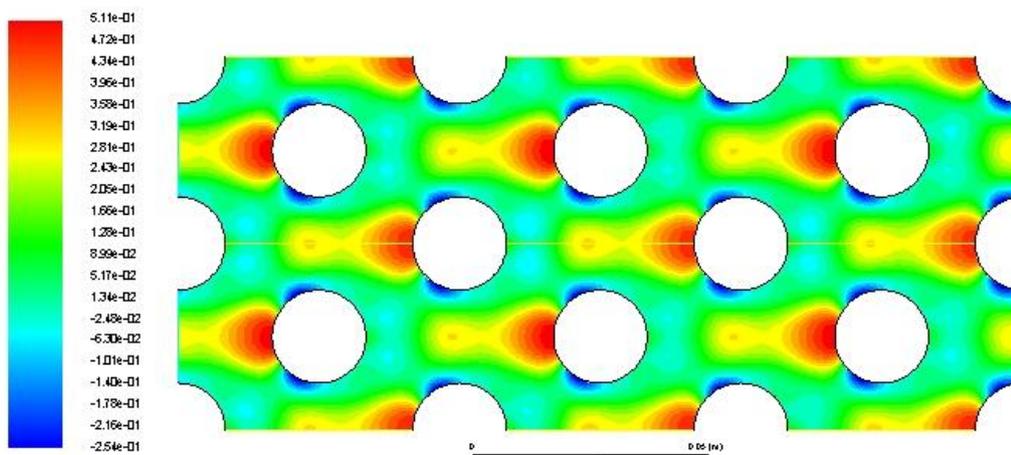
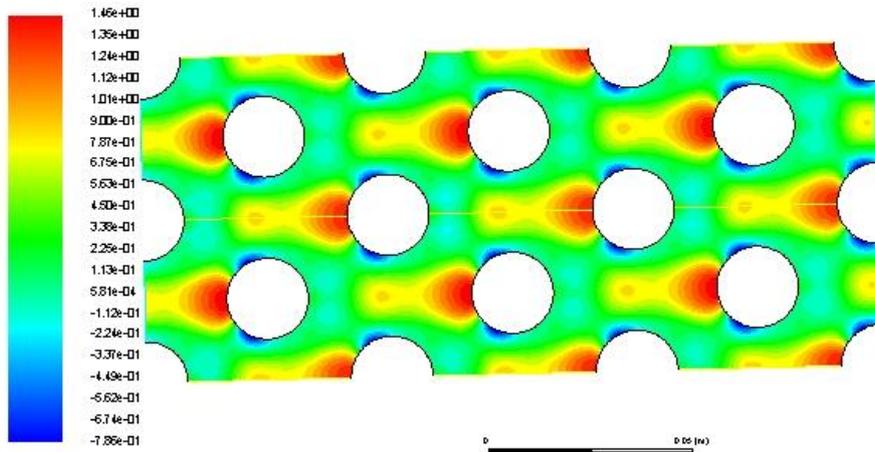


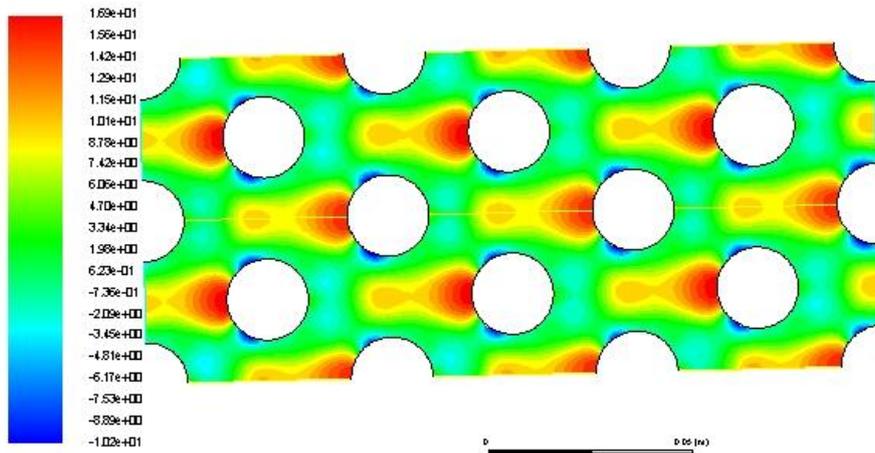
Figure IV.34: contour de pression pour concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (CuO)



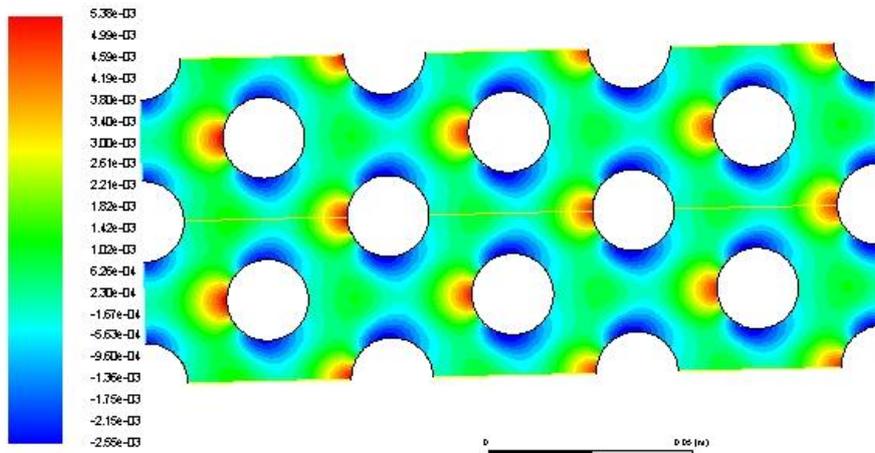
FigureIV.35 : contour de pression pour concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (SiO_2)



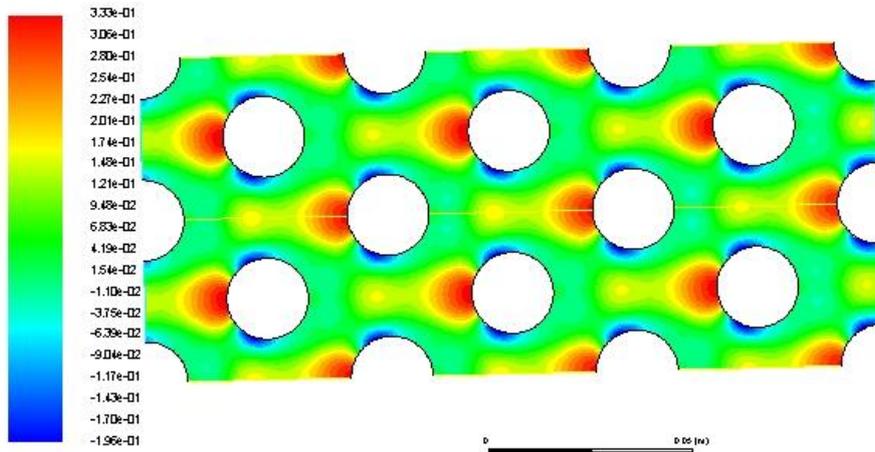
FigureIV.36 : contour de pression pour concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (Cu)



FigureIV.37 : contour de pression pour concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Tio2)

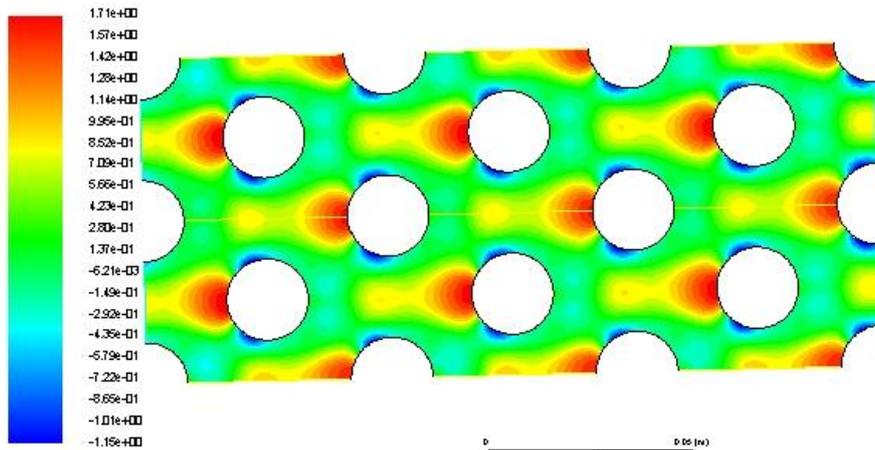


FigureIV.38 : contour de pression pour concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (AL2O3)

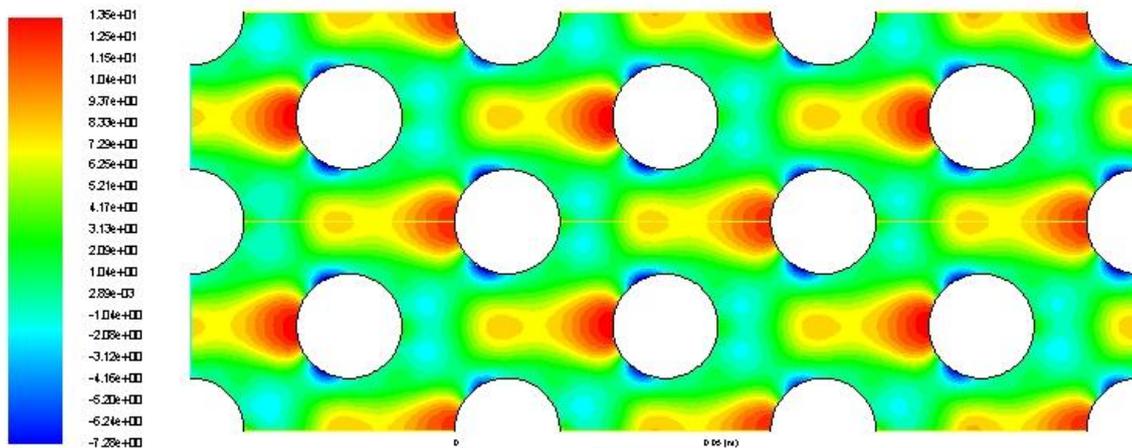


FigureIV.39 : contour de pression pour concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (Cu)

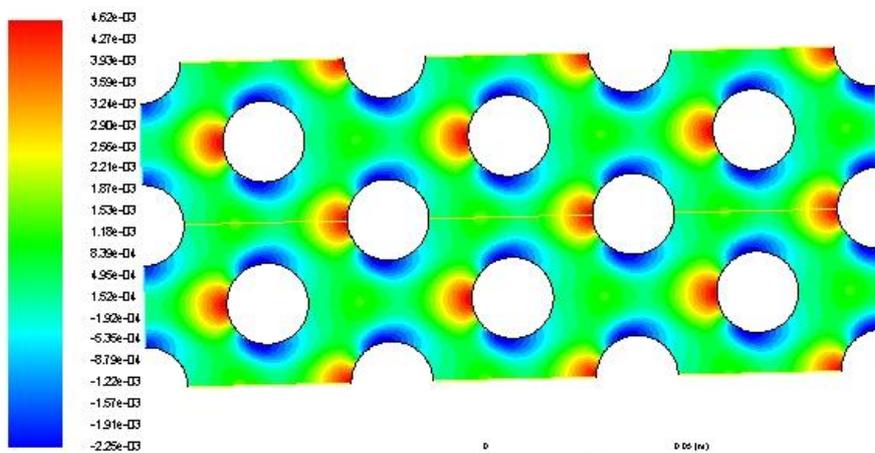
Les figures pour la concentration 3% et 4% et les figures pour la concentration 5% cidessous représentent les coefficients de pression produits par l'écoulement de nanofluid à travers le banc de tubes de l'échangeur de chaleurs pour chaque débit (1 ; 3 ; 0.05 et 0.5) kg/s respectivement pour des concentrations différentes 3 % et 4 % et 5 % des différentes nanoparticules. montre que la différence des valeurs de pression dans l'écoulement qui ont des valeurs élevées en particulier dans la zone de contact direct avec les tubes réside dans la différences de débit pas dans la différences de concentration des nanoparticule ou la différence des nanofluides utilisés .on a observé que la couche limitant ces dessous et dessus de tubes a des valeur de pression bassique grâce a la vitesse de l'écoulement.



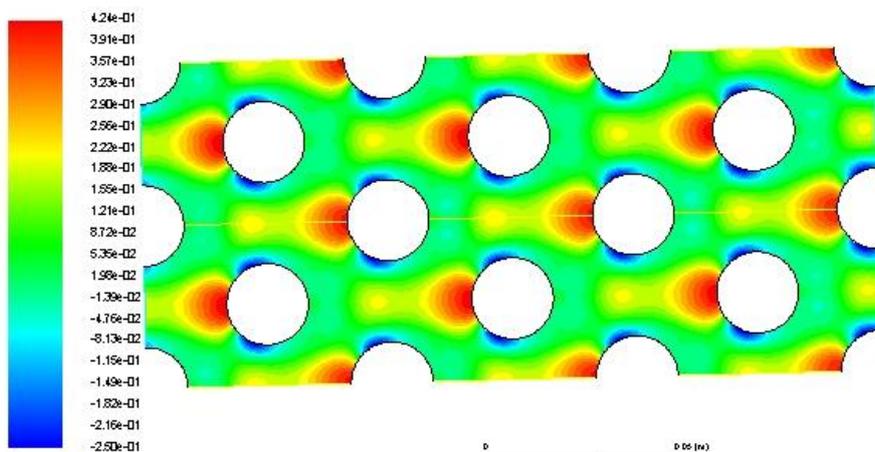
FigureIV.40 : contour de pression pour concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (TiO2)



FigureIV.41 : contour de pression pour concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (AL)

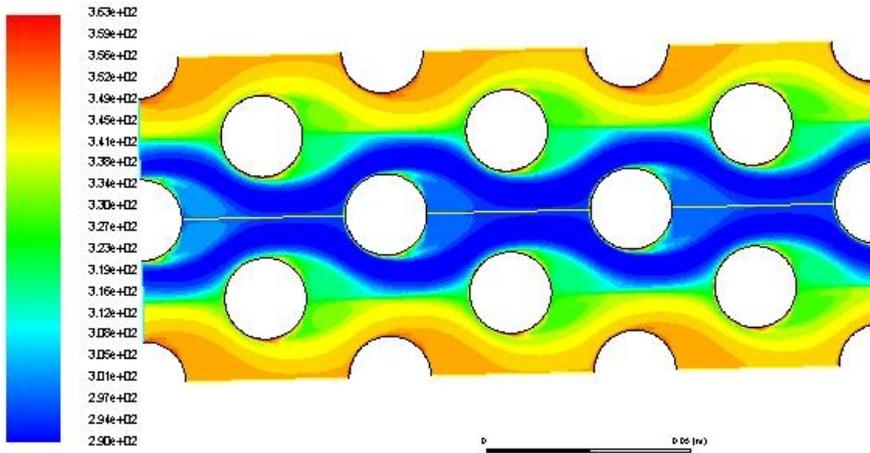


FigureIV.42 : contour de pression pour concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (AL₂O₃)

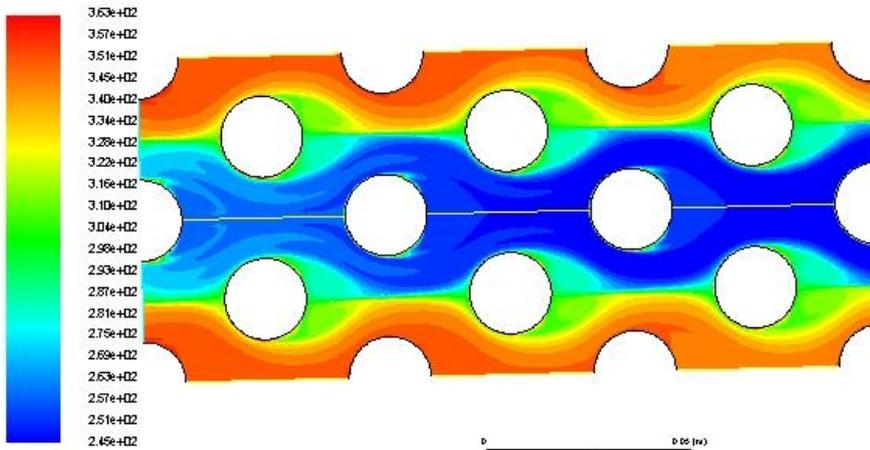


FigureIV.43 : contour de pression pour concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (TiO₂)

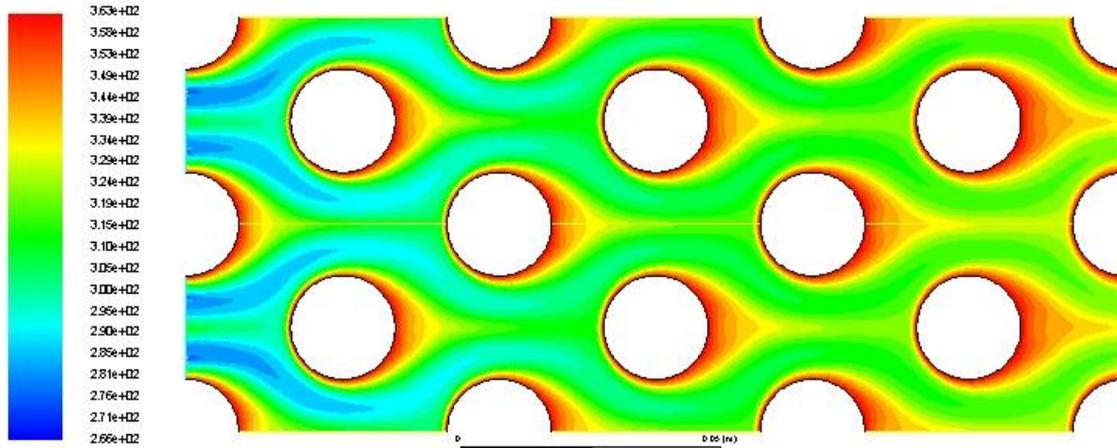
IV.2.2 Présentation des contrôleurs de la température pour chaque nanofluide cas du fluide de base ($\phi = 0$.) et le cas d'un nanofluide avec la variation de concentration et de débit massique



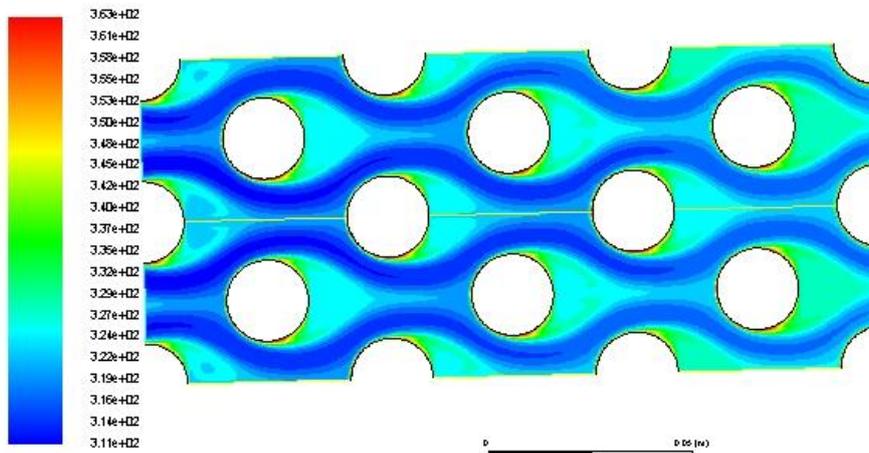
FigureIV.44 : contour de température pour concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL2O3)



FigureIV.45 : contour de température pour concentration $\phi=2\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Cu)



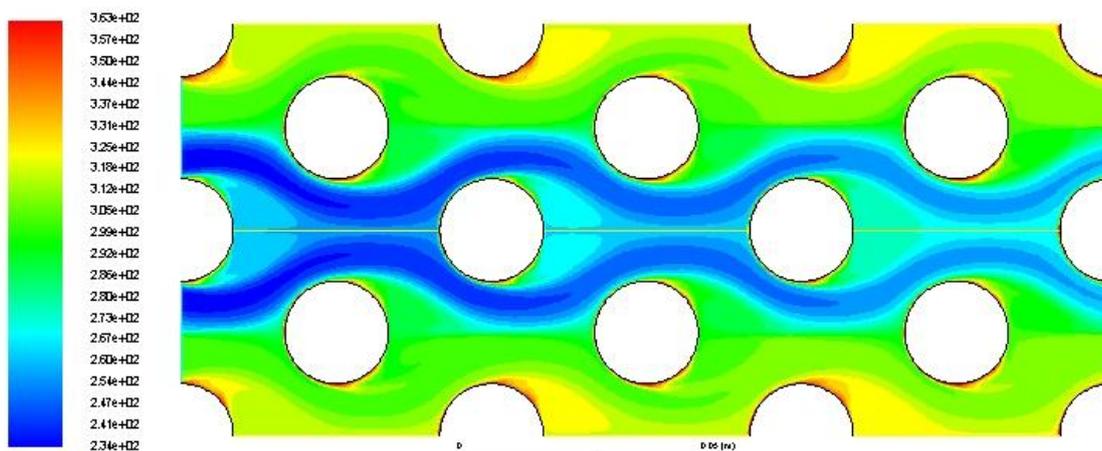
FigureIV.46 : contour de température pour concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO_2)



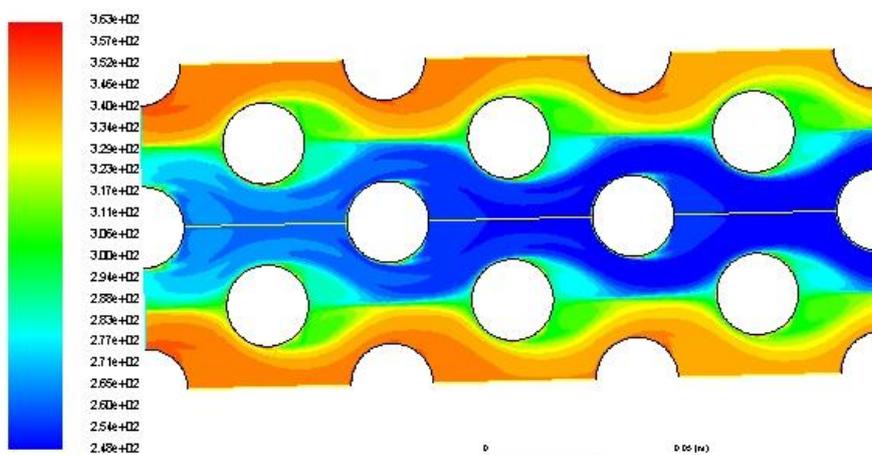
FigureIV.47 : contour de température pour concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (Cu)

Les figures 43 .44.45et46 et les figures cidessous représentent la variation de la température dans le banc des tubes traversée par les nanofluides (Al. Al_2O_3 . Cu. SiO_2) dans des échangeurs de chaleur pour les concentrations 1 % et 2 % et les différents débits massifs (1 ; 3 ; 0.05 et 0.5) kg/s. On a observé que la température passe d'une valeur inférieure à une valeur supérieure et ceci au début a la fin de l'écoulement dans le bancs des tubes et ceci indépendant de les nanofluides (Cu et AL_2O_3) et cela change avec le changement de nanofluides et le débit massique.pour les débit massique 1 et 3 kg/s une température basique que un débit de 0.5 kg/s. et plus élevée pour un débit de 0.05 kg/s. On a observé que la température derrière le tube a des valeurs supérieures à cause de la diminution de la vitesse qui a une relation inverse avec la pression et la température.

On a observé que la temperature au frontiers des derniers tubes augment par rapport aux premiers tubes et c'est le résultat de l'échange de chaleur ente les tubes de $T= 363.15\text{ k}$ et l'écoulement de $T=293.15\text{ k}$.



FigureIV.48 : contour de température pour concentration $\text{Ø}=2\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL)



FigureIV.49 : contour de température pour concentration $\text{Ø}=2\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Cu)

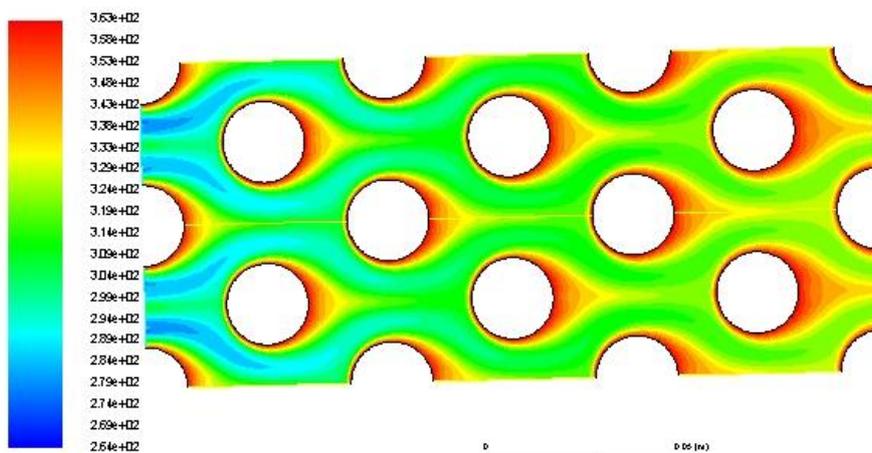
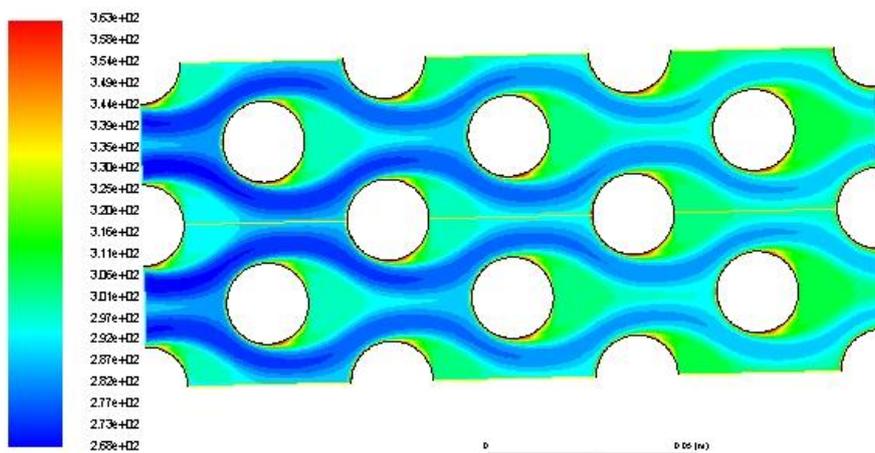
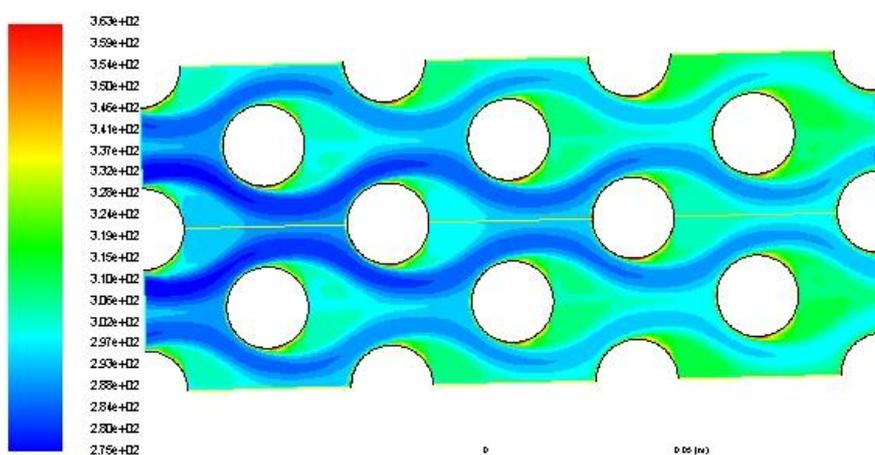


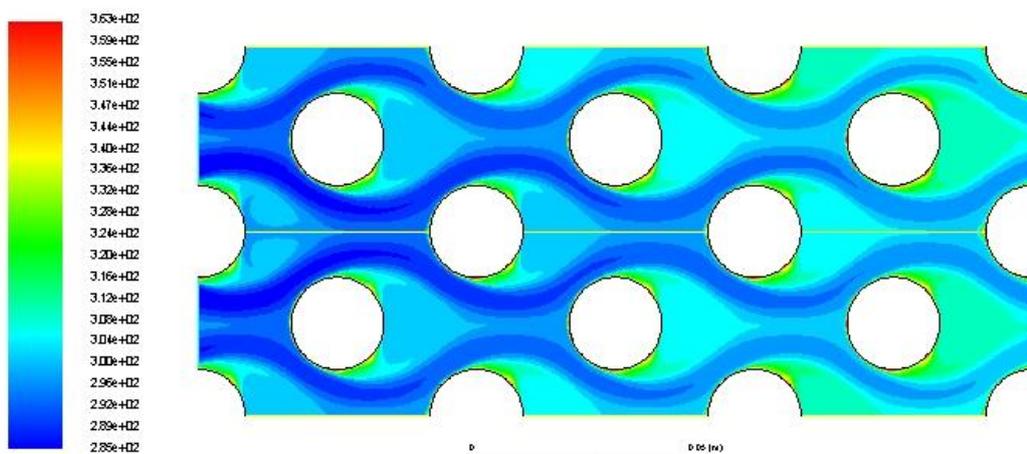
Figure IV.50: contour de température pour concentration $\text{Ø}=2\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (AL₂O₃)



FigureIV.51 : contour de température pour concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL₂O₃)



FigureIV.52 : contour de température pour concentration $\varnothing=3\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (Cu)



FigureIV.53: contour de température concentration $\varnothing=2\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL₂O₃)

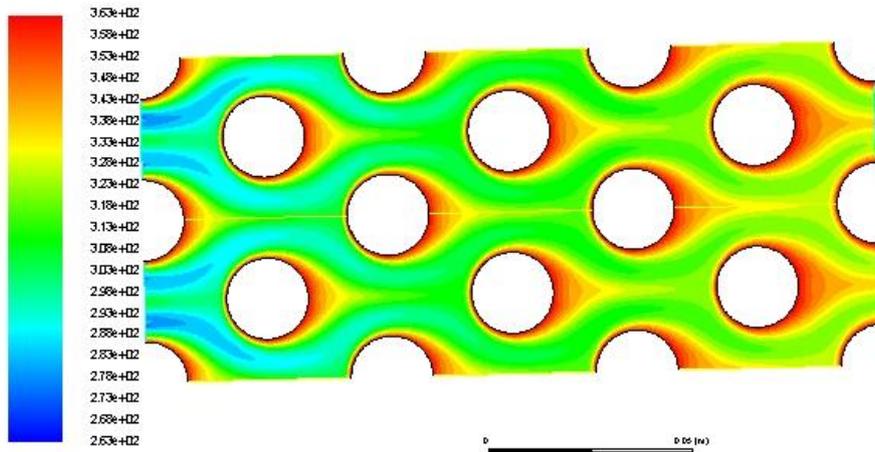


Figure IV.54: contour de température concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (TiO_2)

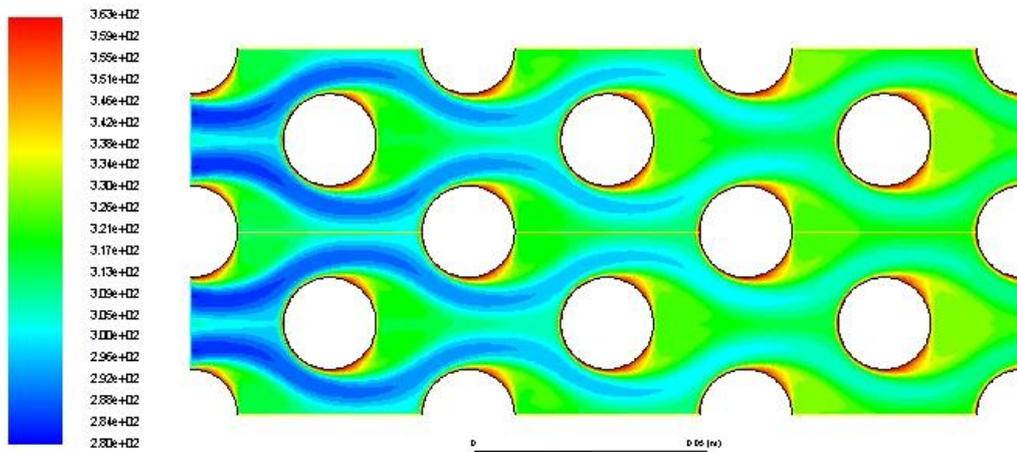
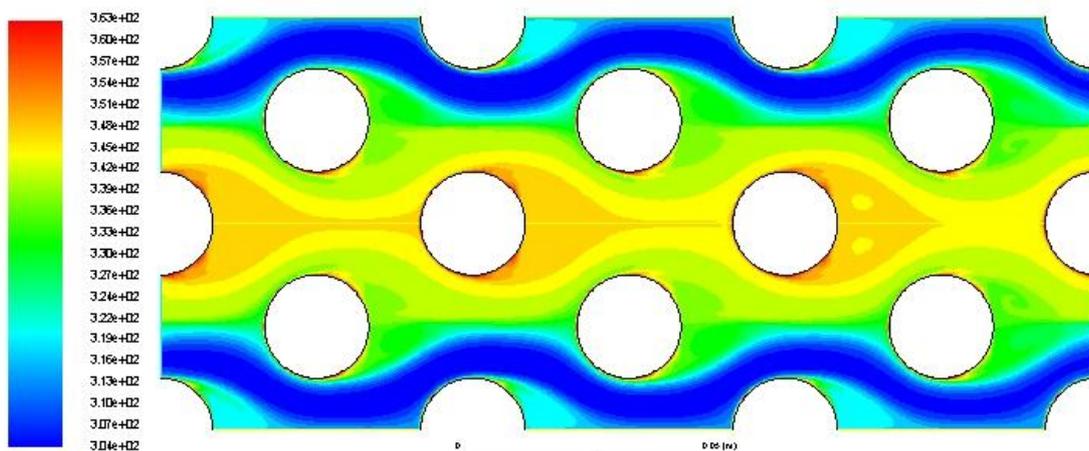


Figure IV.55: contour de température concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)

On a observé pour une concentration de 3 % des nanoparticules une relation inverse entre la température sur le banc des tubes et l'augmentation de débit massique .la température et plus élevé au couche limites des tubes pour les débit massique 0.05 et 0.5 kg/s et des valeurs basique de la température pour les débit massique 1 et 3 kg/s.



FigureIV.56 : contour de température concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (SiO_2)

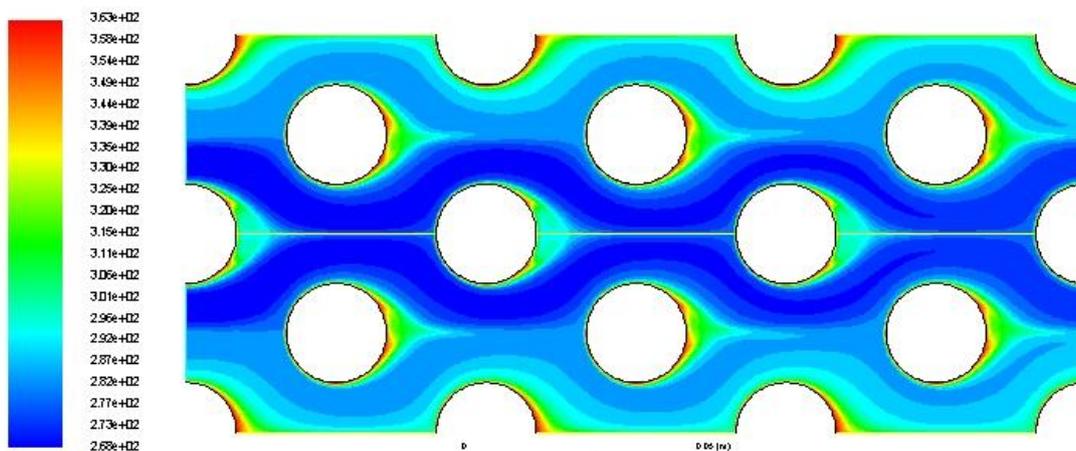


Figure IV.57: contour de température concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (CuO)

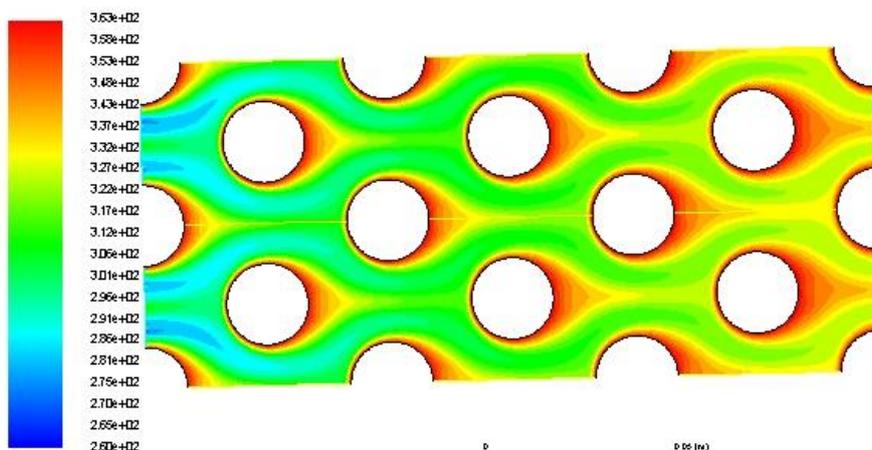


Figure IV.58: contour de température concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (TiO_2)

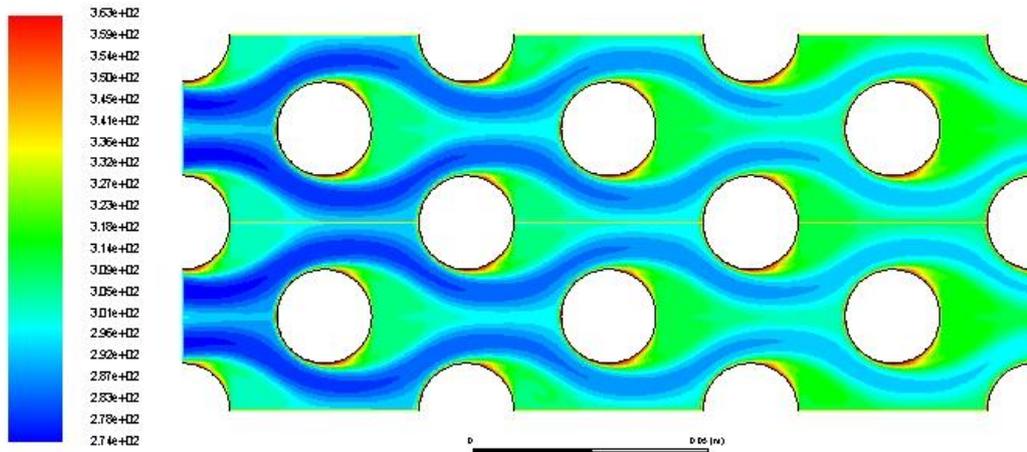


Figure IV.59 : contour de température concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)

Les figures pour une concentration de 4% et les figures cidessous illustrent l'évolution de la température au niveau du banc des tubes pour concentration de 4 % et 5 %.une température très élevée surtout aux couches limites des tubes et cela pour un débit massique de 0.05 kg/s pour les deux concentration des nanoparticules et des températures plus bas pour les débit massique 1 et 3 kg/s. En observe aussi que la température augmente près des tubes pour la concentration 4 % et débit massique de 0.05 kg/s et le contraire pour la concentration des nanoparticules 5 % et débit de 3 kg/s.on a observé surtout la deffirence de température sur la longueur de banc des tube à cause de le transfert de chaleur entre l'écoulement et les tubes .

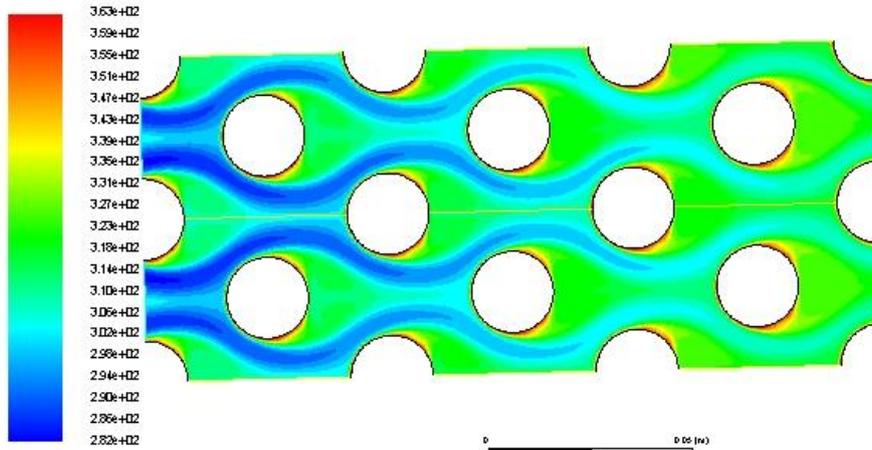


Figure IV.60: contour de température concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (Cu)

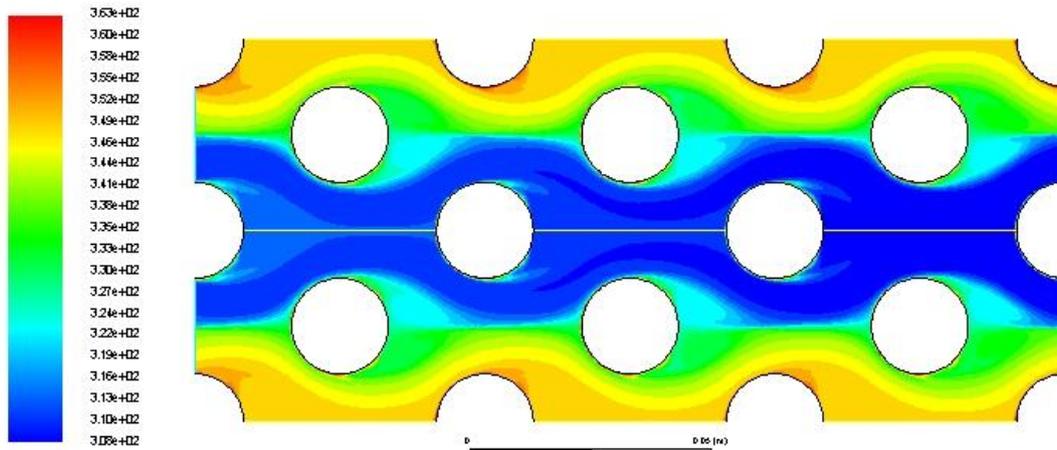


Figure IV.61 : contour de température concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (SiO₂)

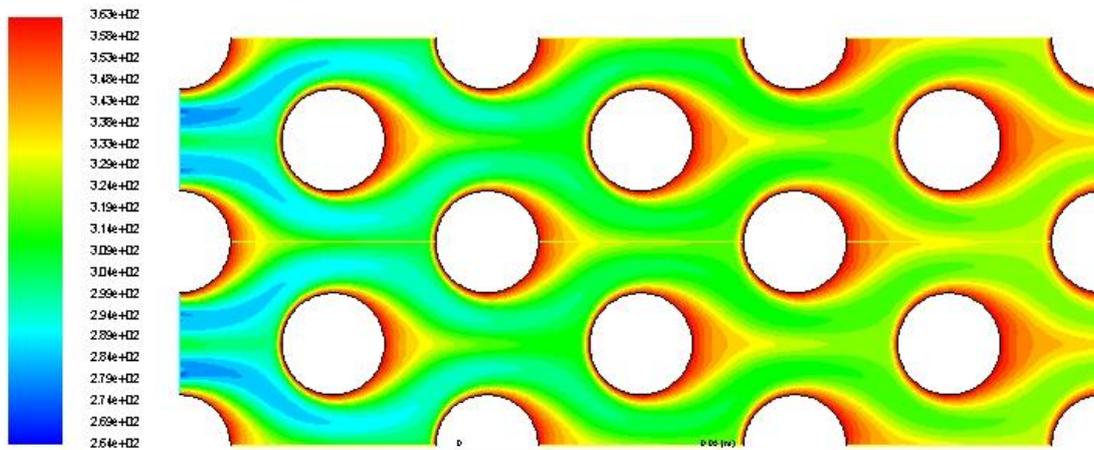


Figure IV.62: contour de température concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO₂)

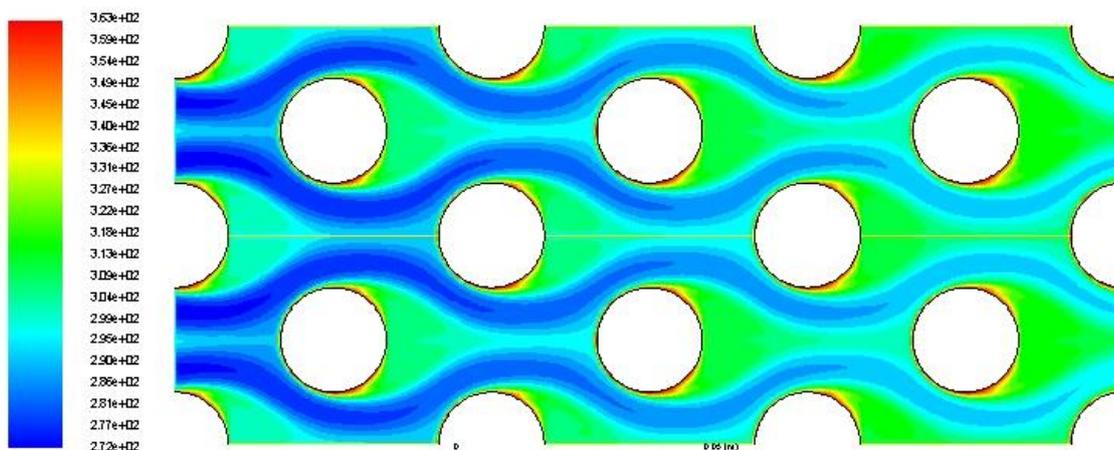
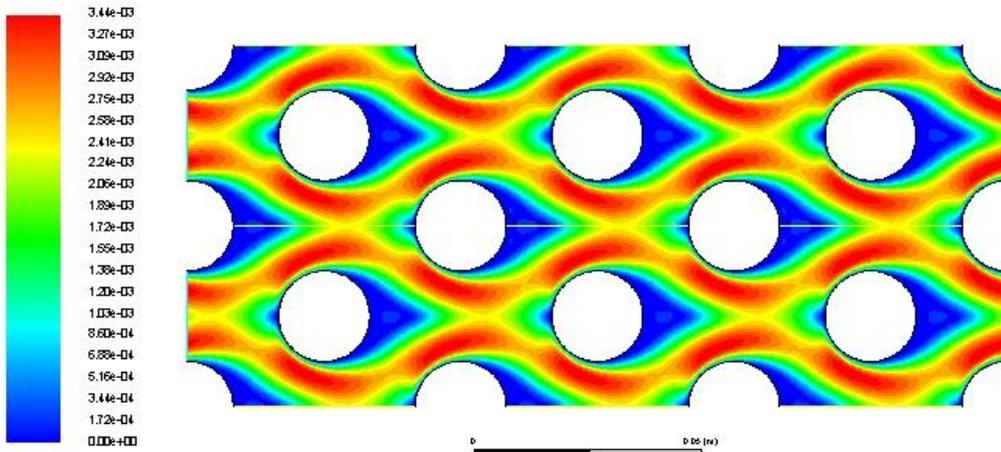
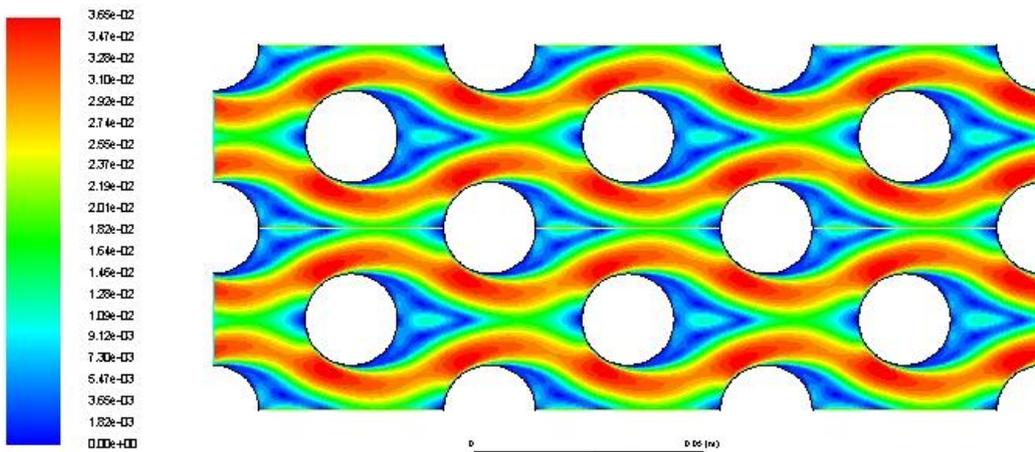


Figure IV.63: contour de température concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (CuO)

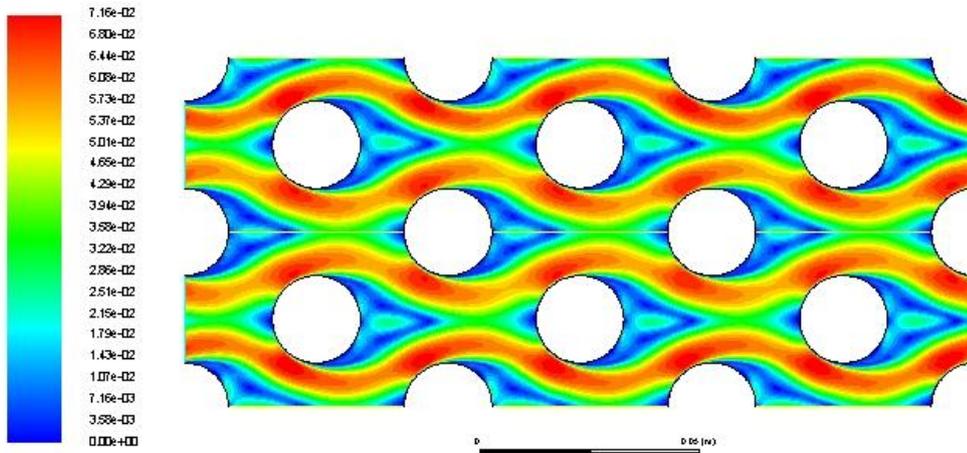
IV.2.3 Présentation des contours de la vitesse pour chaque nanofluide cas du fluide de base ($\phi = 0$.) et le cas d'un nanofluide avec la variation de concentration et de débit massique



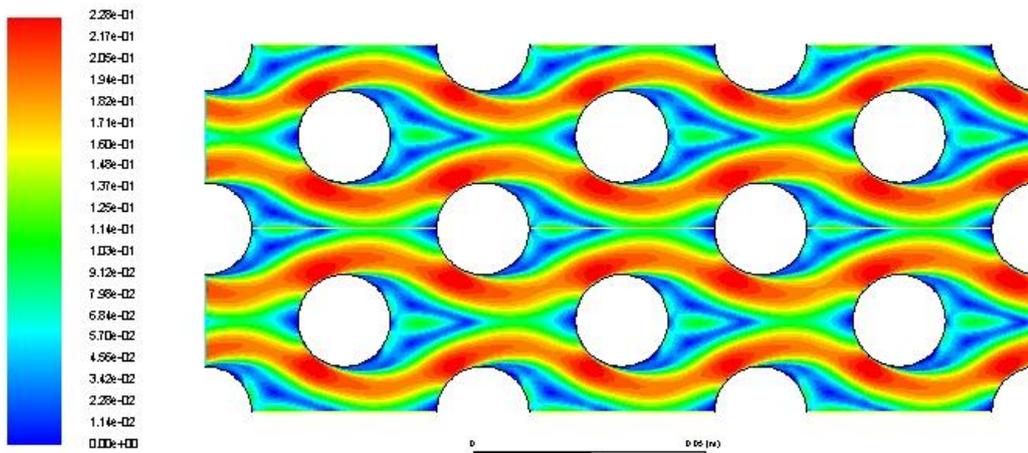
FigureIV.64 : contour de vitesse concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (CuO)



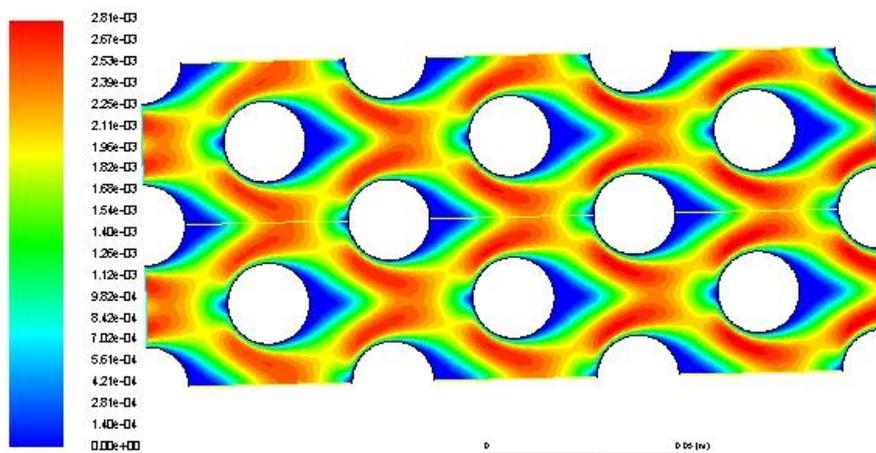
FigureIV.65 : contour de vitesse concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (SiO2)



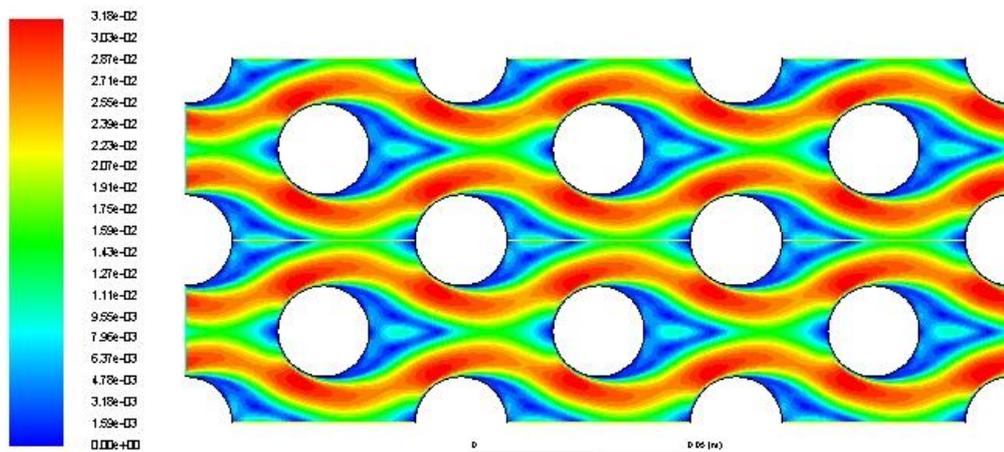
FigureIV.66 : contour de vitesse concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=1\text{ kg/s}$ (AL)



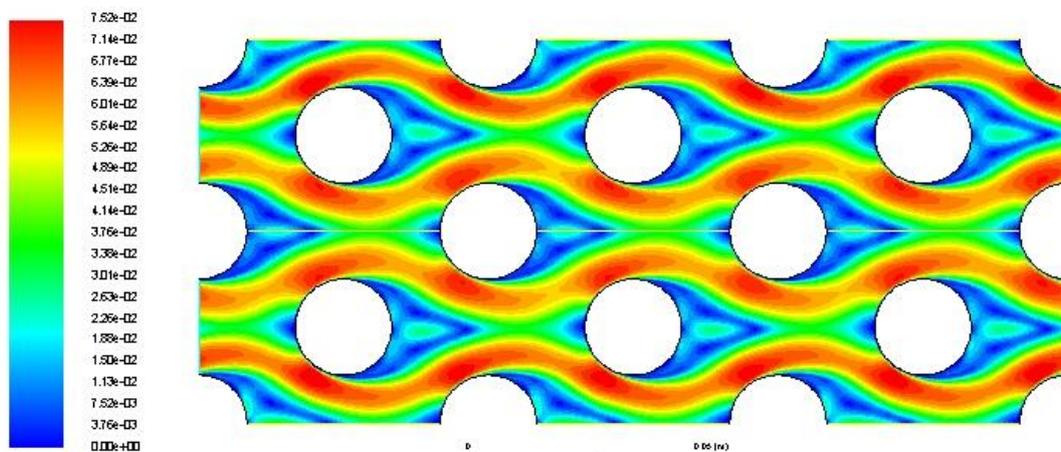
FigureIV.67 : contour de vitesse concentration $\phi=1\%$ et débit massique $m=3\text{ kg/s}$ (SiO_2)



FigureIV.68 : contour de vitesse concentration $\phi=2\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (Cu)



FigureIV.69 : contour de vitesse concentration $\phi=2\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)



FigureIV.70 : contour de vitesse concentration $\phi=2\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (SiO2)

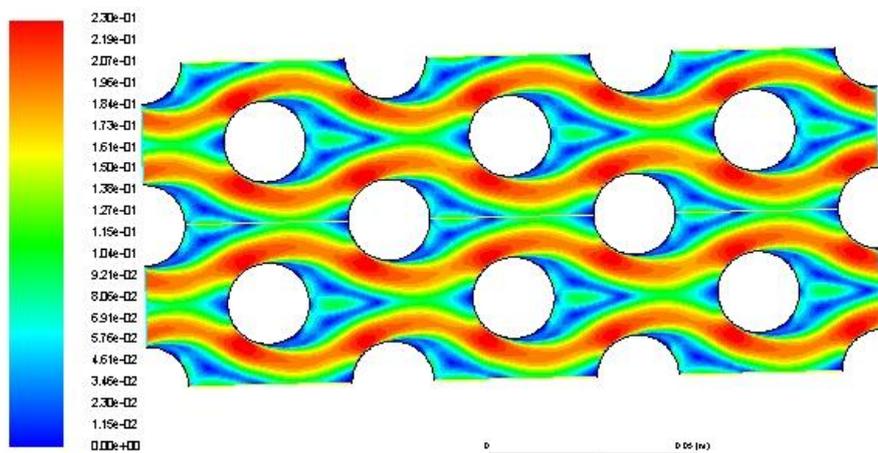


Figure IV.71: contour de vitesse concentration $\phi=2\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (TiO₂)

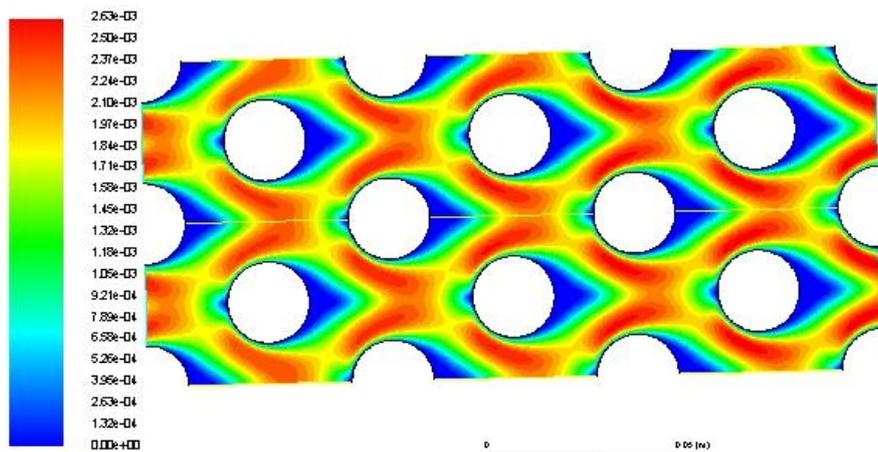


Figure IV.72 : contour de vitesse concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (Cu)

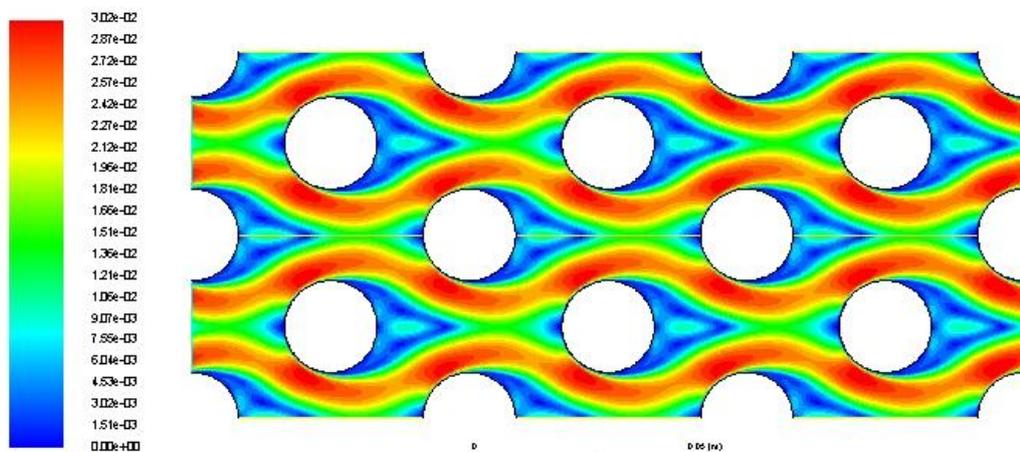
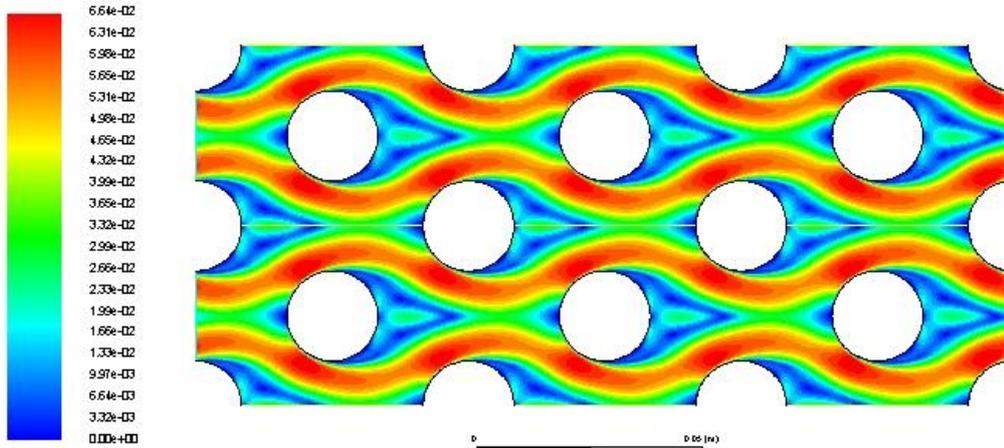


Figure IV.73 : contour de vitesse concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)



FigureIV.74 : contour de vitesse concentration $\phi=3\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (CuO)

Les figures de 63 jusqu'à figure 82 représentent la vitesse d'un écoulement à travers le banc des tubes d'un échangeur de chaleur à des concentration différentes (à 1 % jusqu'à 5 %) et les débits massifs (0.05 .0.5.1 et 3 kg/s). les contour des vitesse dans les différents valeur de concentration de nanoparticule les valeur de débit massique montre que la vitesse a des valeur maximale dans le chemin de l'écoulement ou il n'y a aucun contact avec les tubes de banc et ces valeurs diminue plus les chemin de l'écoulement qui entre directement en collision avec les tubes . Les valeurs de vitesse diminuent dans cette zone grâce à l'augmentation de pression et de température. Les figures montrent le manque de vitesse au point d'arrêt et celui au point qui a un contact direct entre les tubes et l'écoulement et les valeurs basiques de vitesse apres les cylindres.

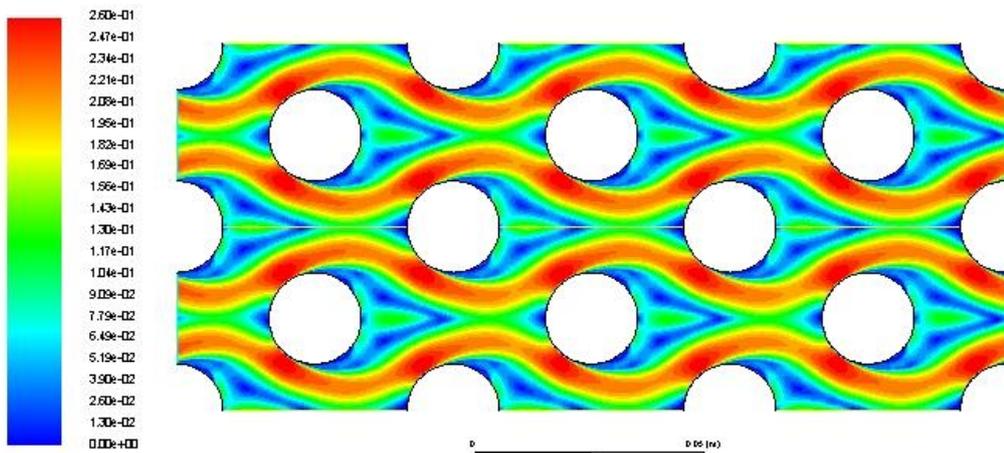


Figure IV.75: contour de vitesse concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (SiO2)

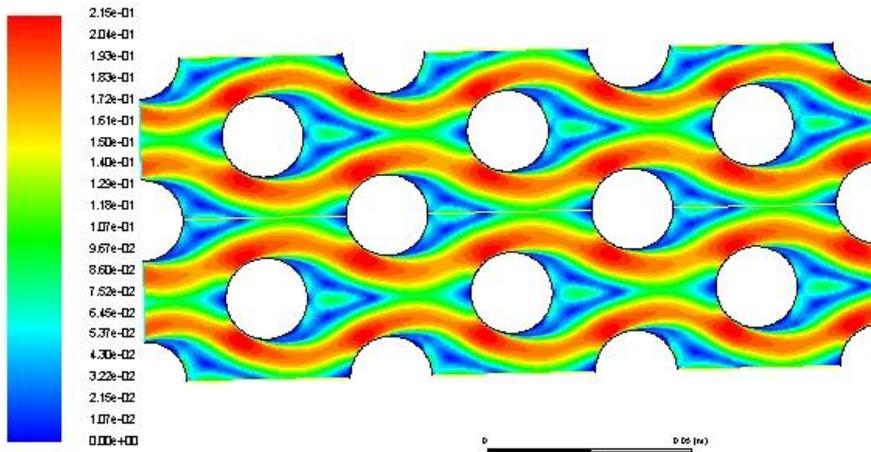


Figure IV.76: contour de vitesse concentration $\emptyset=4\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (Cu)

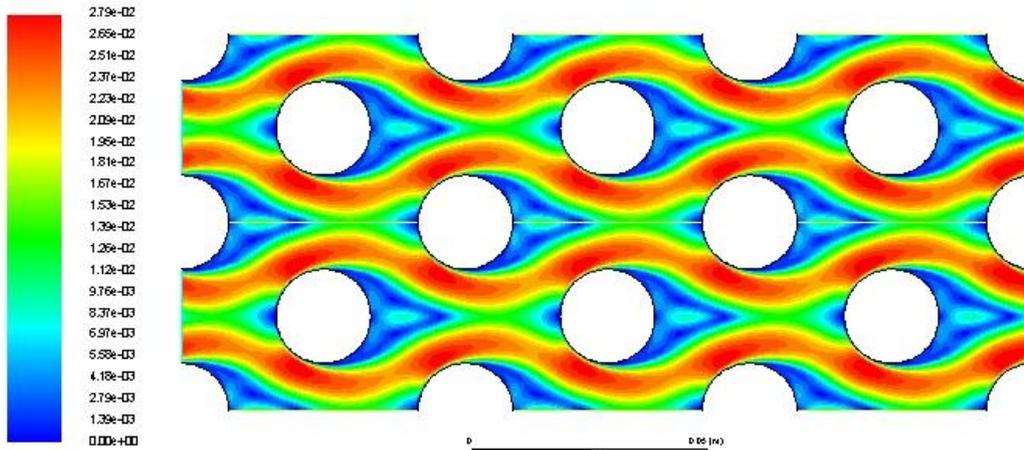


Figure IV.77 : contour de vitesse concentration $\emptyset=4\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (AL)

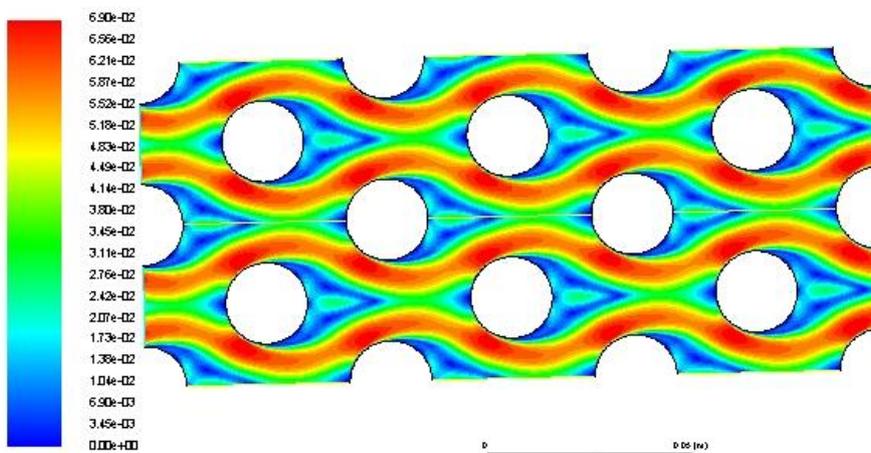


Figure IV.78 : contour de vitesse concentration $\emptyset=4\%$ et débit massique $m=1\text{kg/s}$ (AL₂O₃)

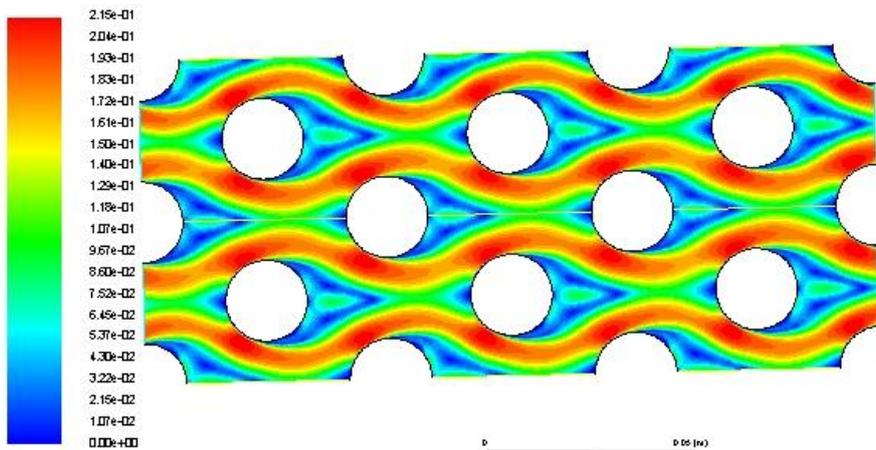
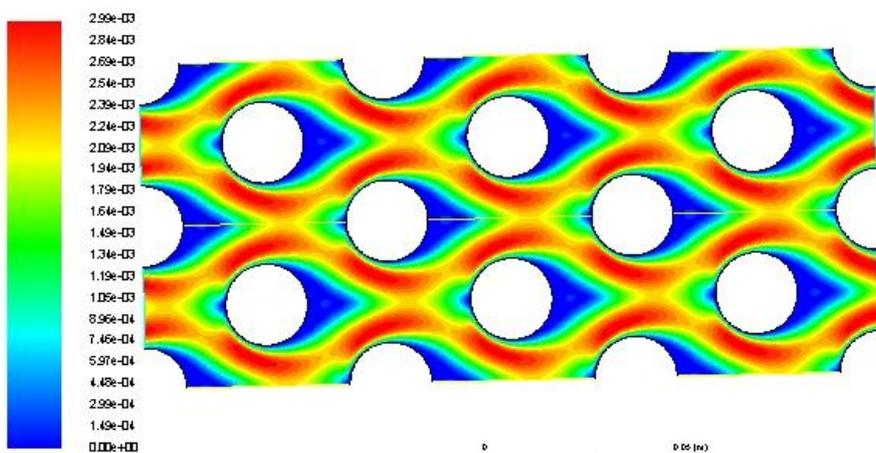
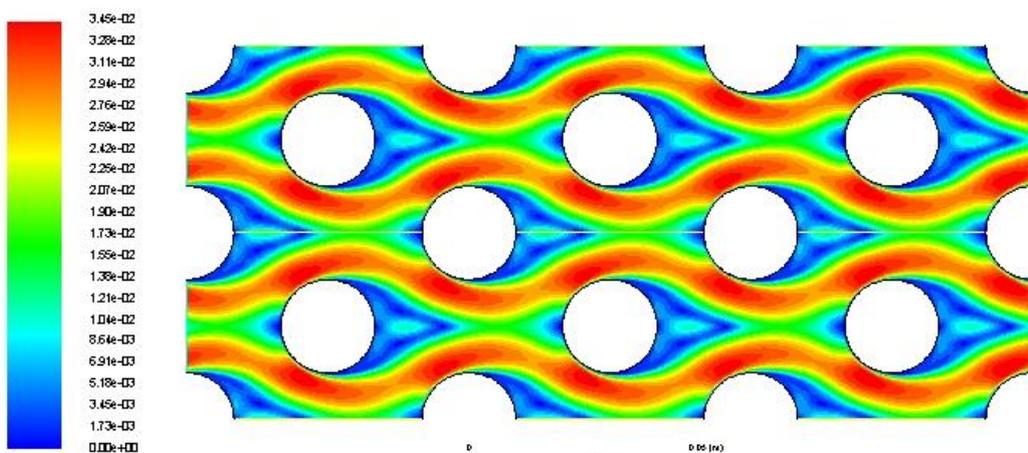


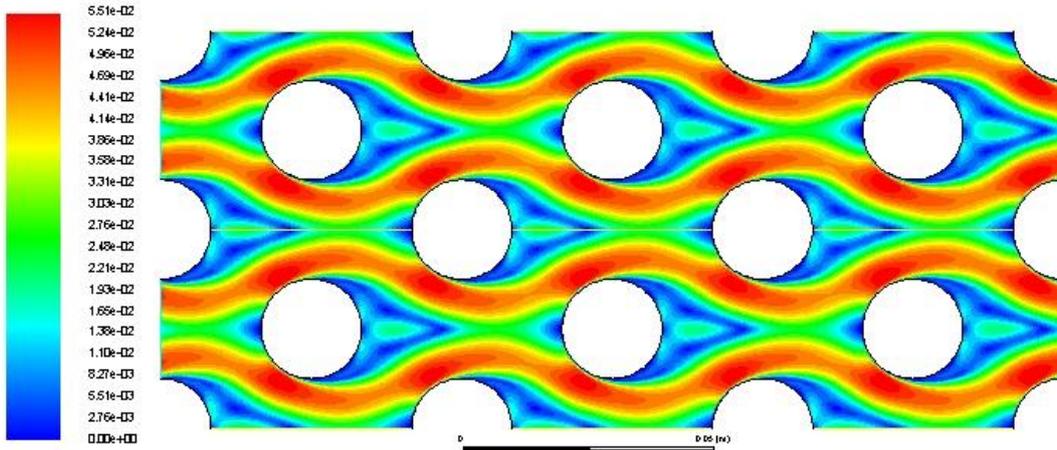
Figure IV.79: contour de vitesse concentration $\phi=4\%$ et débit massique $m=3\text{kg/s}$ (Cu)



FigureIV.80: contour de vitesse concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=0.05\text{kg/s}$ (TiO2)



FigureIV.81 : contour de vitesse concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=0.5\text{kg/s}$ (SiO2)



FigureIV.82 : contour de vitesse concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=1\text{ kg/s}$ (AL)

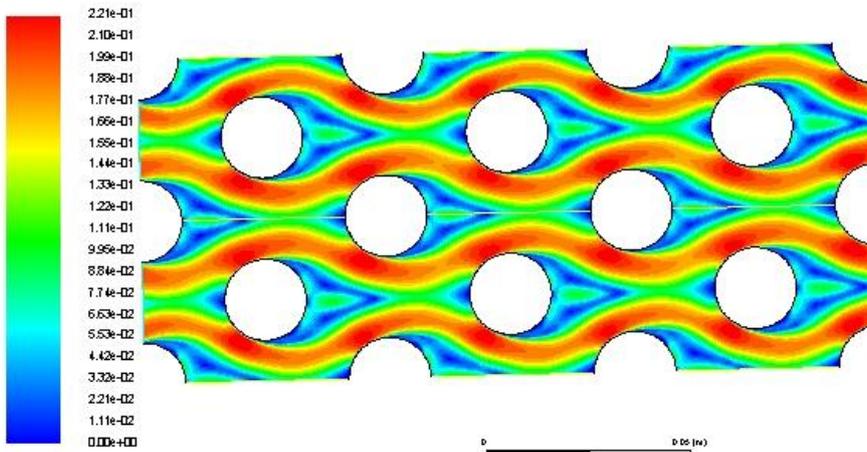
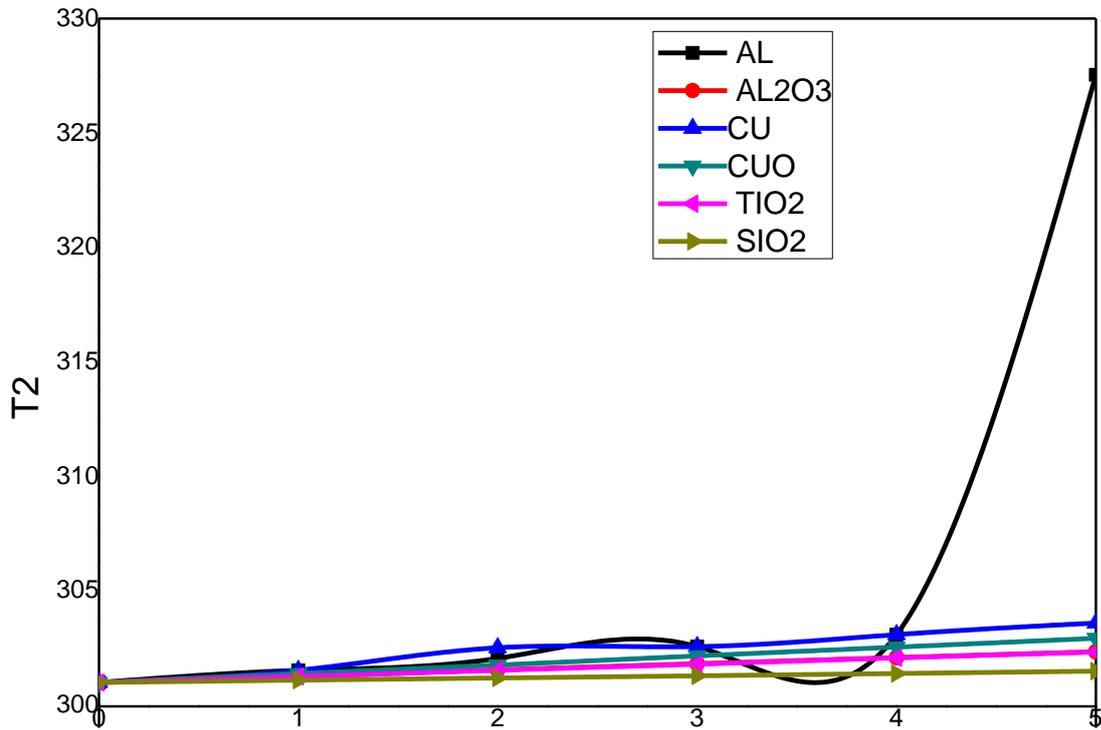


Figure IV.83: contour de vitesse concentration $\phi=5\%$ et débit massique $m=3\text{ kg/s}$ (AL₂O₃)

IV.3 Résultats et discussion pour le transfert thermique



FigureIV.84 : Variation du temperature T_2 (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$

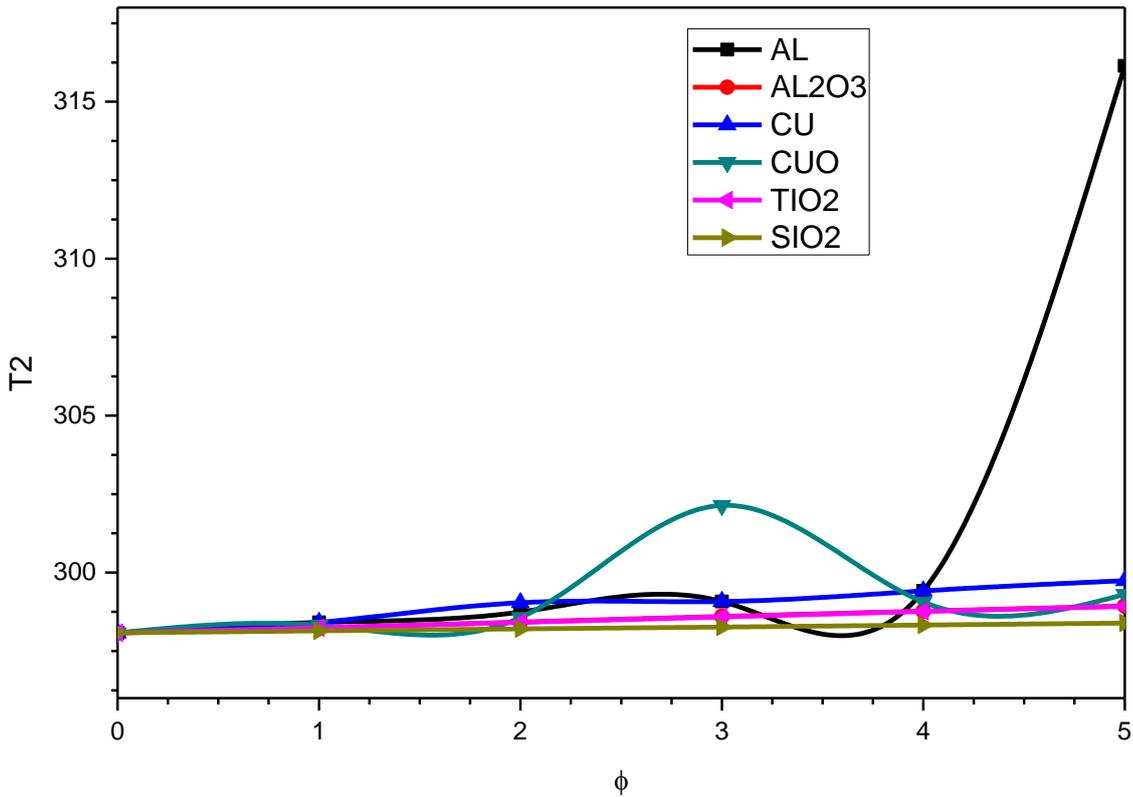
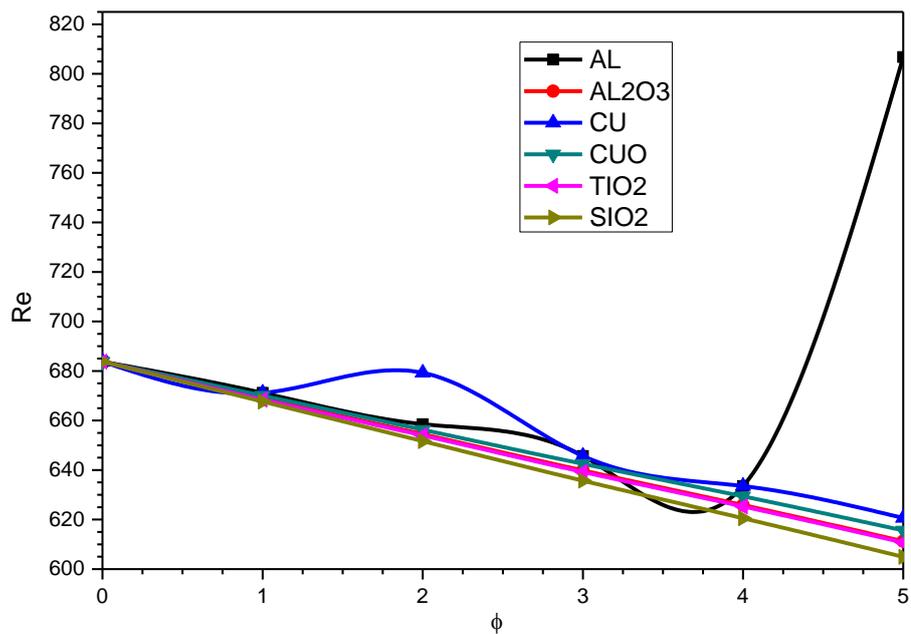
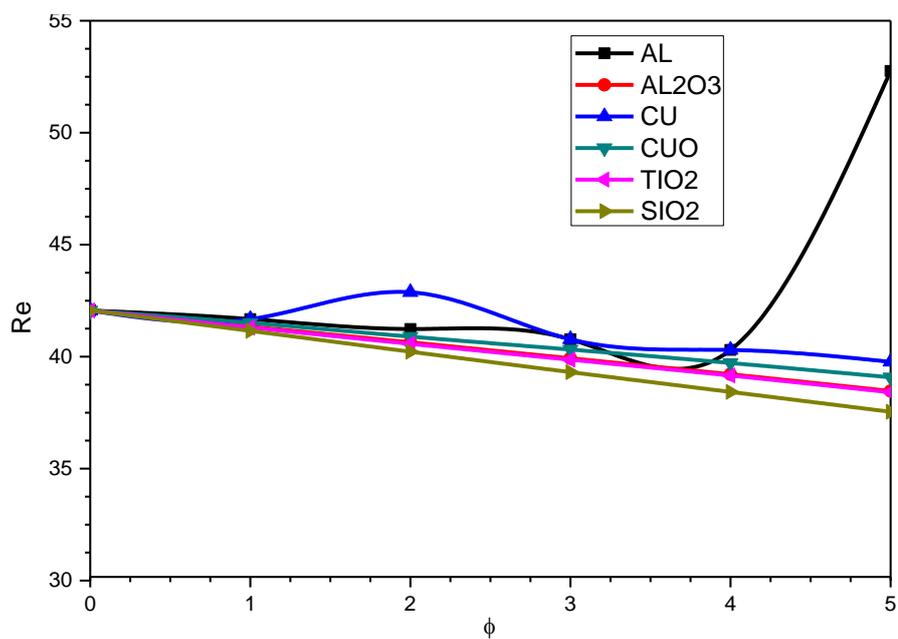


Figure IV.85: Variation du temperature T2 (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05$ Kg/S

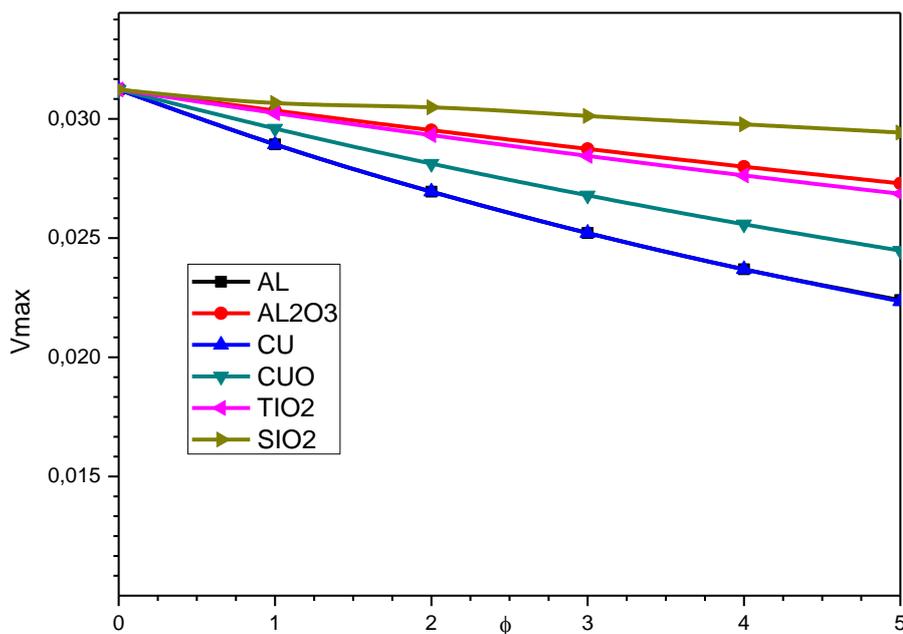
Les figures 83 et 84 représentent la Variation de la température T2 (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour les débits massiques (0.05 et 1) Kg/S. On a observé que la température augmente d'une façon légère avec l'augmentation de la concentration de nanoparticules. une valeur critique pour le CUO et ca au niveau de concentration de 3 %. Nous constatons que la température élevée près la concentration de 3.5 % pour les nanofluides AL.



FigureIV.86 : Variation du nombre de reynolds Re (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$ Kg/S



FigureIV.87 : Variation du nombre de reynolds Re (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05$ Kg/S



FigureIV.88 : Variation du vitesse maximale (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$ Kg/S

Les figures 85 jusqu'à 90 montrent le développement du nombre de Reynolds et Nusselt et la vitesse maximale en fonction de la concentration de nanoparticules. On a remarqué que les trois caractéristiques diminuent quand la concentration augmente. Nous constatons que les nombres réels et le Nusselt élevé près d'une concentration de 4 % des nanoparticules AL.

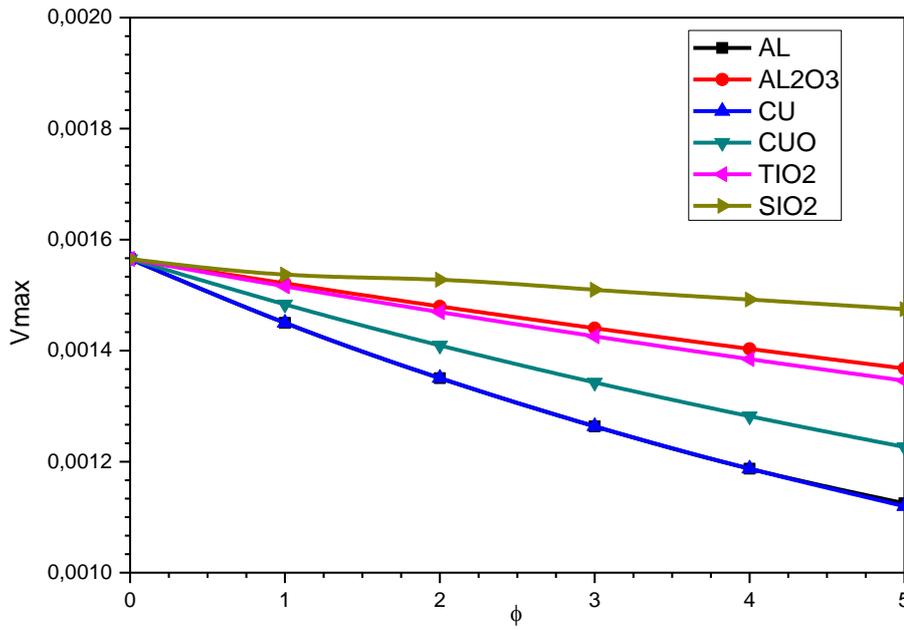


Figure IV.89: Variation du vitesse maximale (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05$ Kg/S

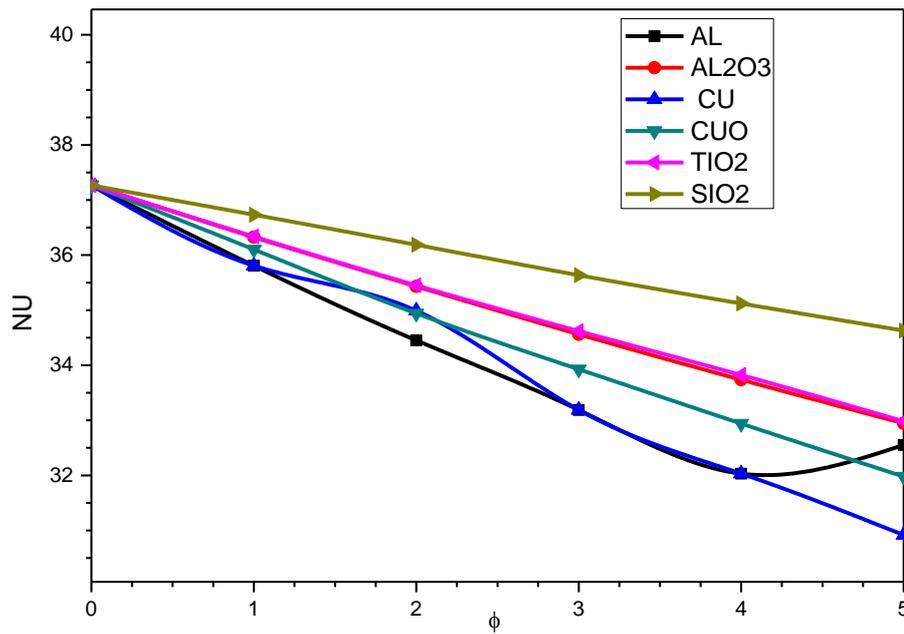
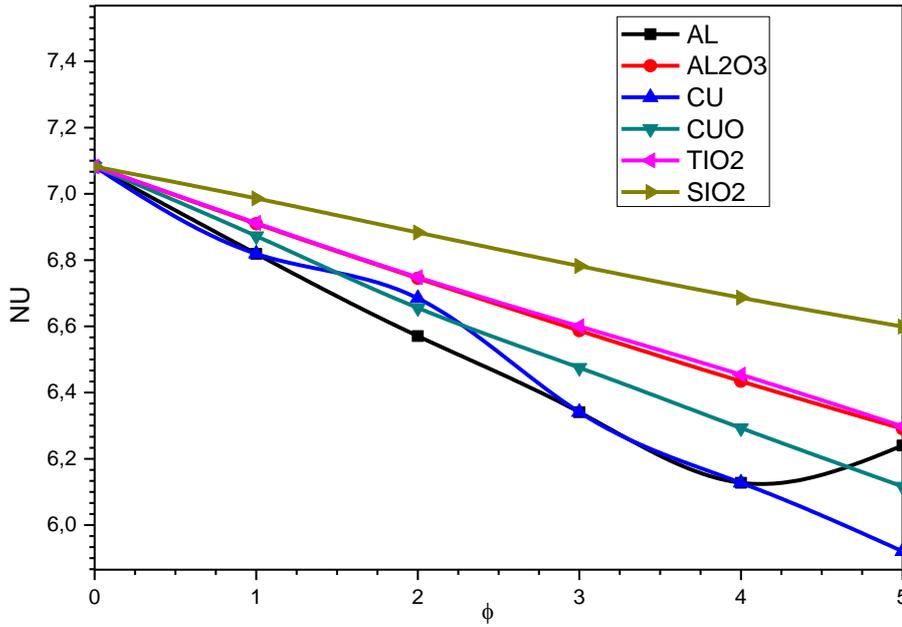
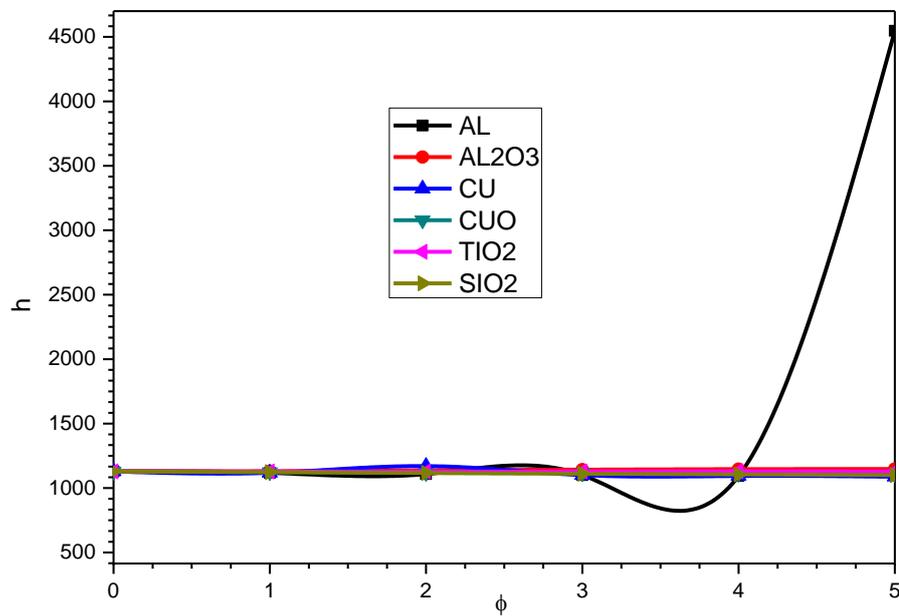


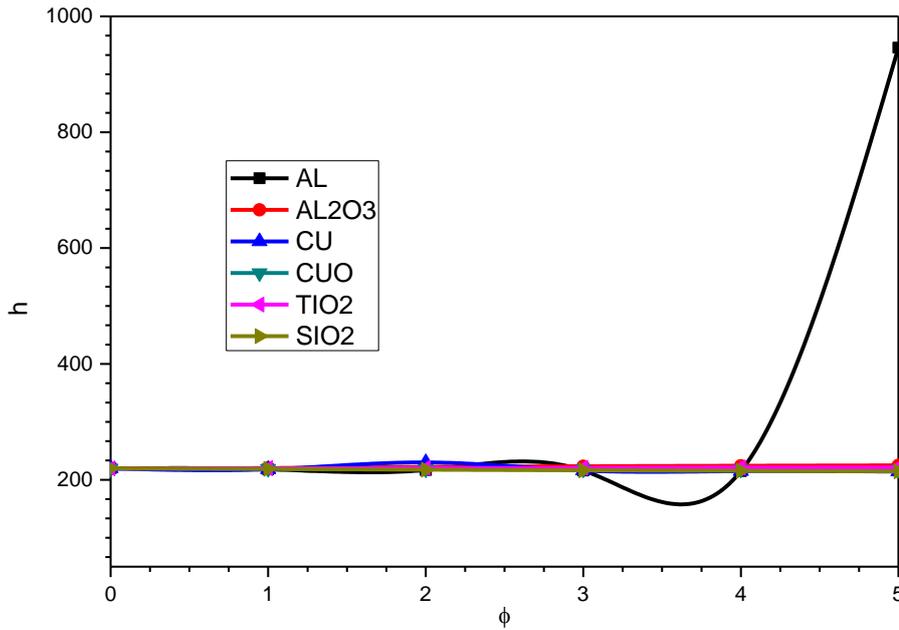
Figure IV.90 : Variation du nombre de nusselt (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$ Kg/S



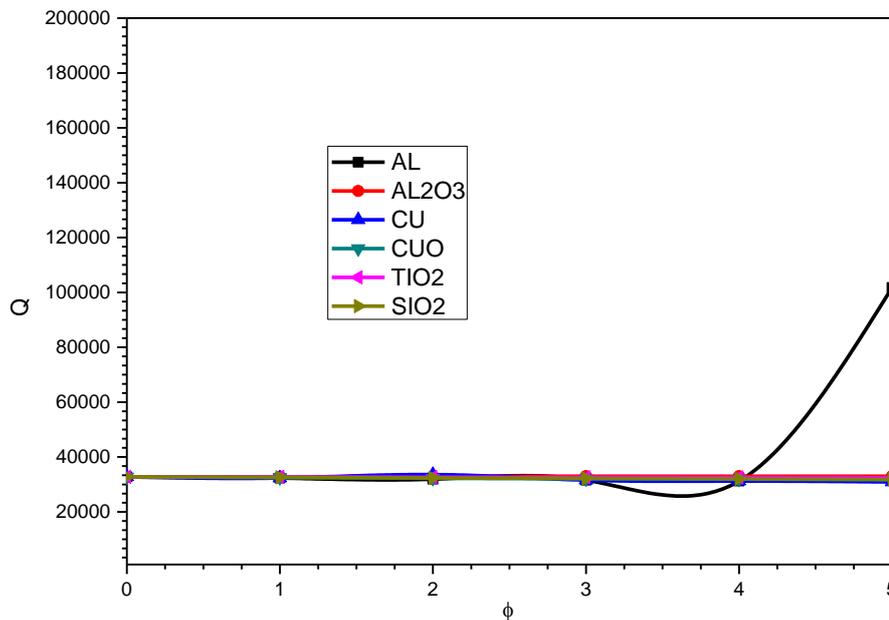
FigureIV.91 : Variation du nombre de reynolds Re (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05$ Kg/S



FigureIV.92 : Variation du coefficient de convection h (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$ Kg/S



FigureIV.93 : Variation du coefficient de convection h (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05$ Kg/S



FigureIV.94 : Variation du flux de chaleur Q (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$ Kg/S

les figures 91.92 .93 et 94 represent la variation de coefficient de convection h et de flux de chaleur Q en fonction de la concentration pour les debits massique (0.05 et 1) Kg/S le coefficient de convection h et le flux de chaleur Q sont constants quand la concentration des nanoparticules augmente . On a observé une augmentation forte de coefficient h et le flux Q prés une concentration de 3.5 % et ca pour le courbe qui represente le nanofluides AL .

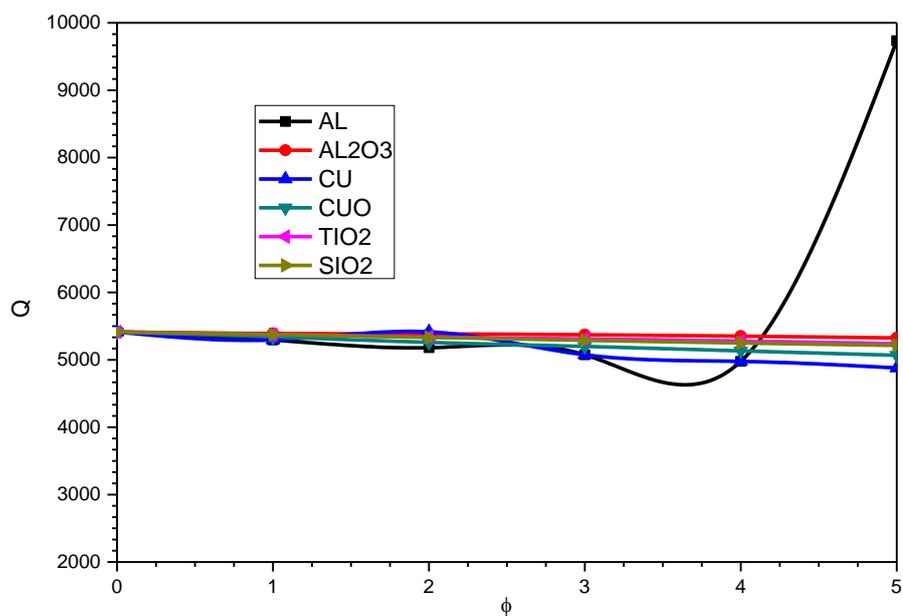


Figure IV.95: Variation du flux de chaleur Q (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05$ Kg/S

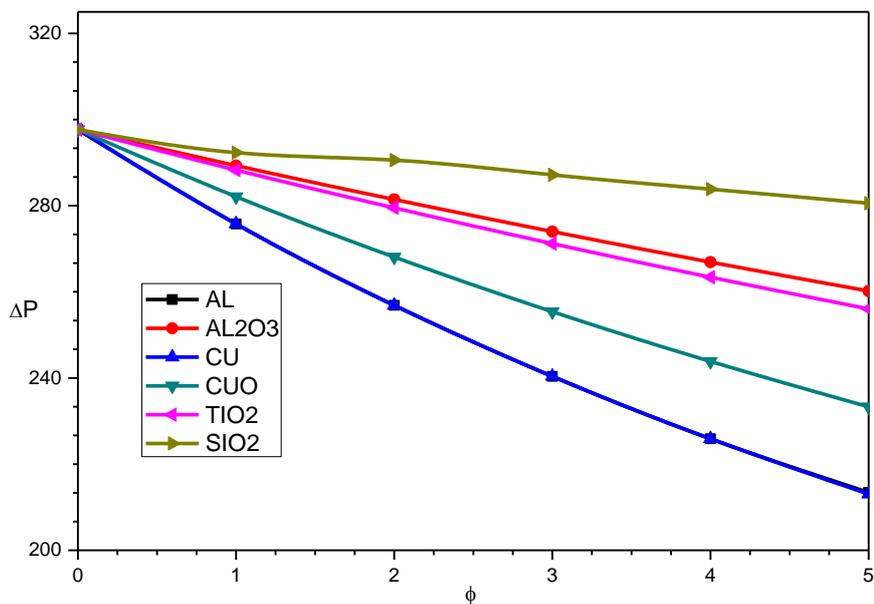
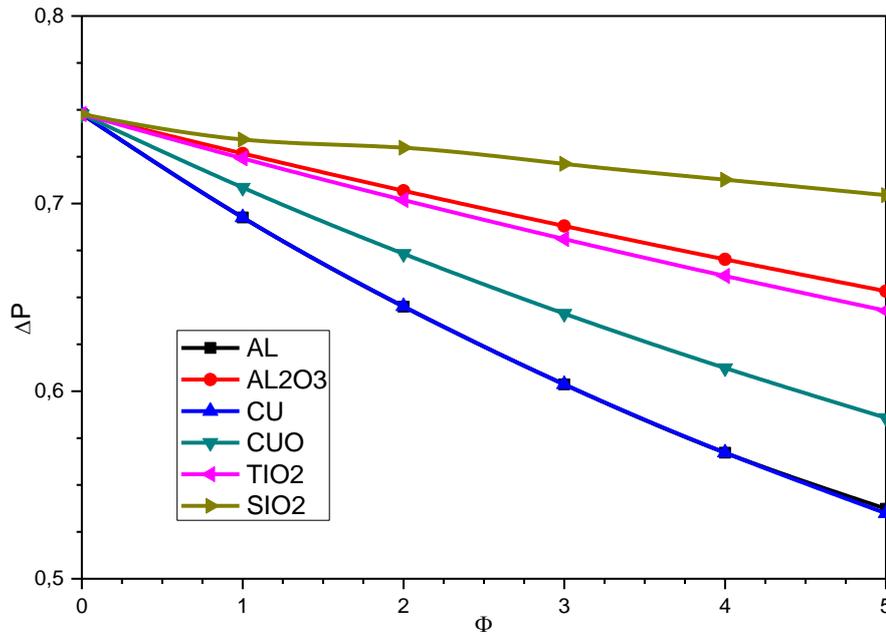


Figure IV.96 : Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$ Kg/S



FigureIV.97 : Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05$

Les figures 95 .96 .97 et 98 montrent la variation de chute de pression ΔP et le travail de pompage w qui diminuent en fonction de concentration pour les débits massiques (0.05 et 1) Kg/S. On a observé une chute plus forte pour le nanofluid CU par rapport aux autres nanofluides.

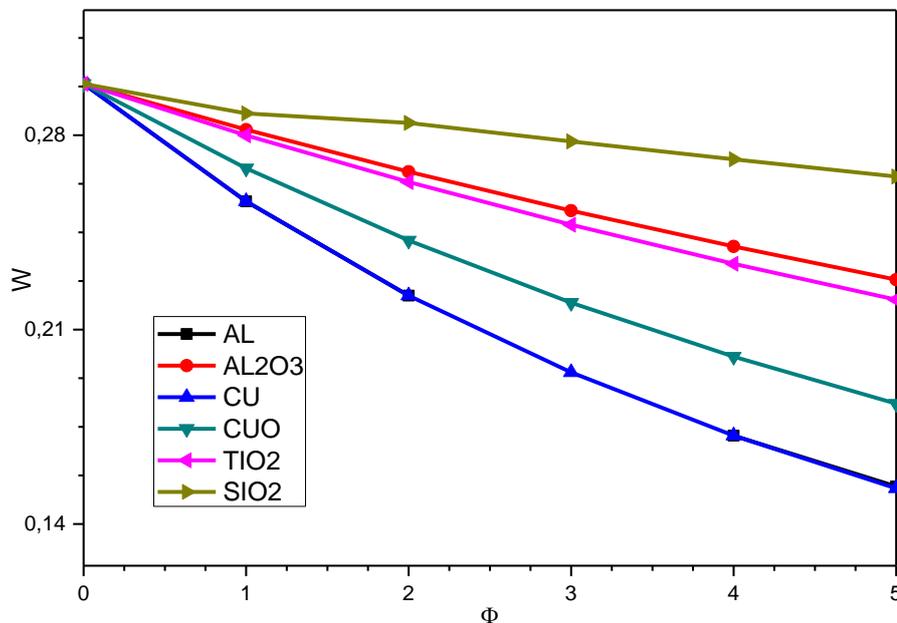
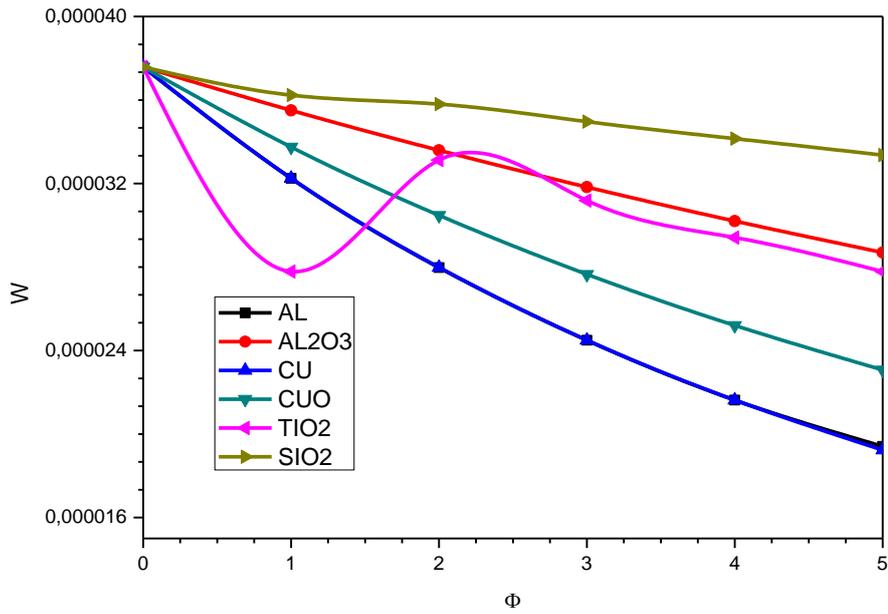


Figure IV.98: Variation du travail de pompage W (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=1$ Kg/S



FigureIV.99 : Variation du travail de pompage W (eau/nanofluides) en fonction de la concentration Φ pour débit massique $m=0.05\text{Kg/S}$

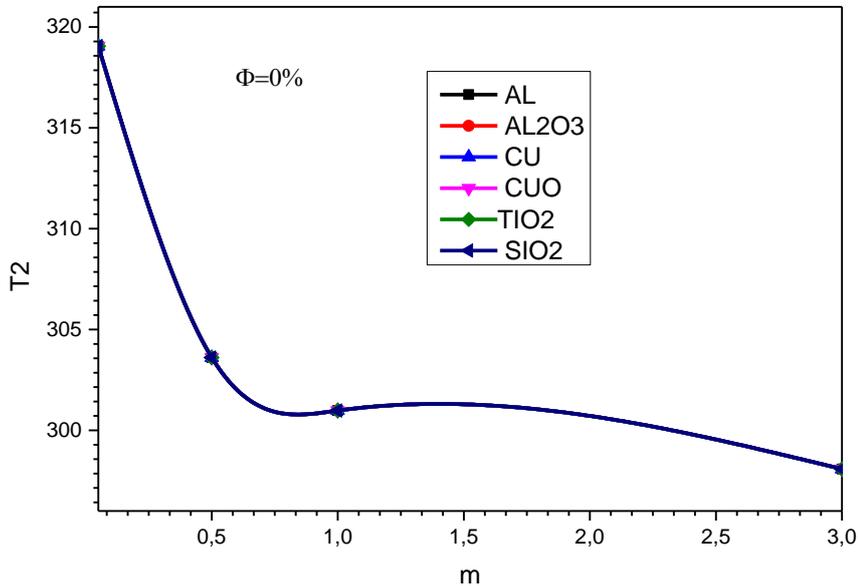
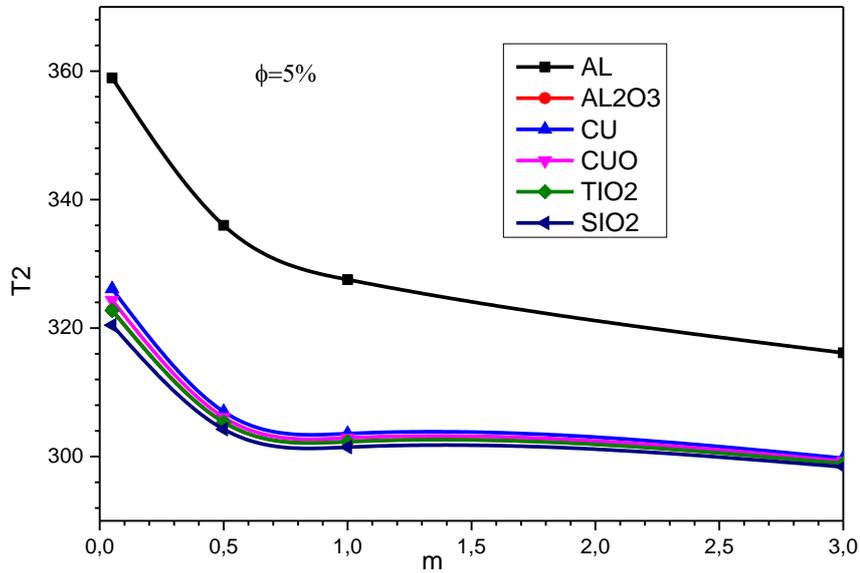


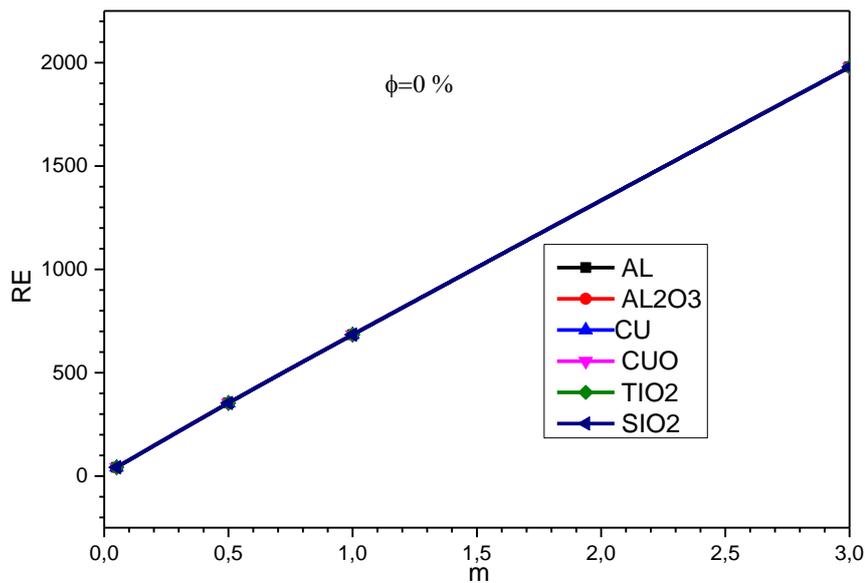
Figure IV.100: Variation du température T2 (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$

Les figures 99 et 100 montrent la variation de température T2 pour les différents nanofluides des concentrations de 0 % et 5 % en fonction du débit massique. On peut constater que la température diminue des environs de 320 k jusqu'à moins 300 k quand le débit massique augmente. On a observé

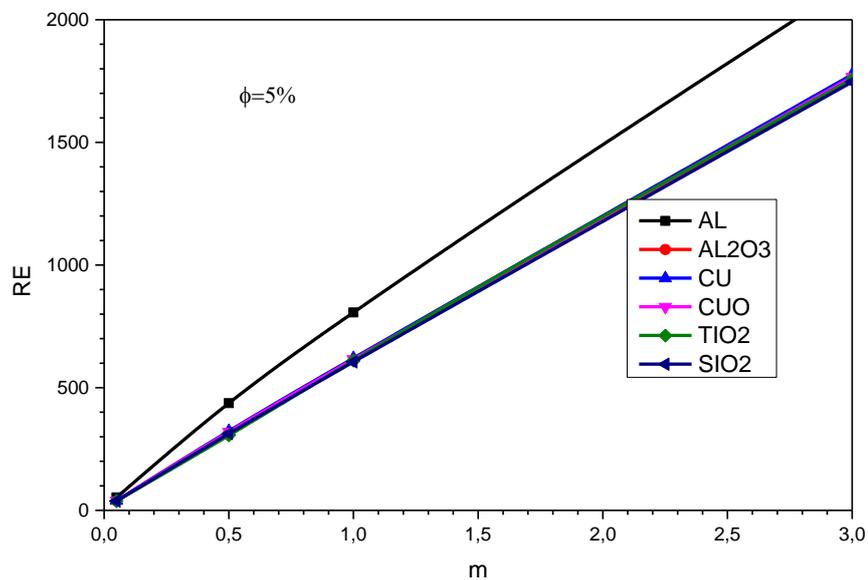
une exception pour le nanofluid AL dont la température diminue de 360 k jusqu'à 330 k. la variation de température T2 prend des valeurs presque constantes à partir de débit massique de 0.8 kg/s.



FigureIV.101 : Variation du température T2 (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$



FigureIV.102 : Variation du nombre de reynolds (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$



FigureIV.103 : Variation du nombre de reynolds (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$

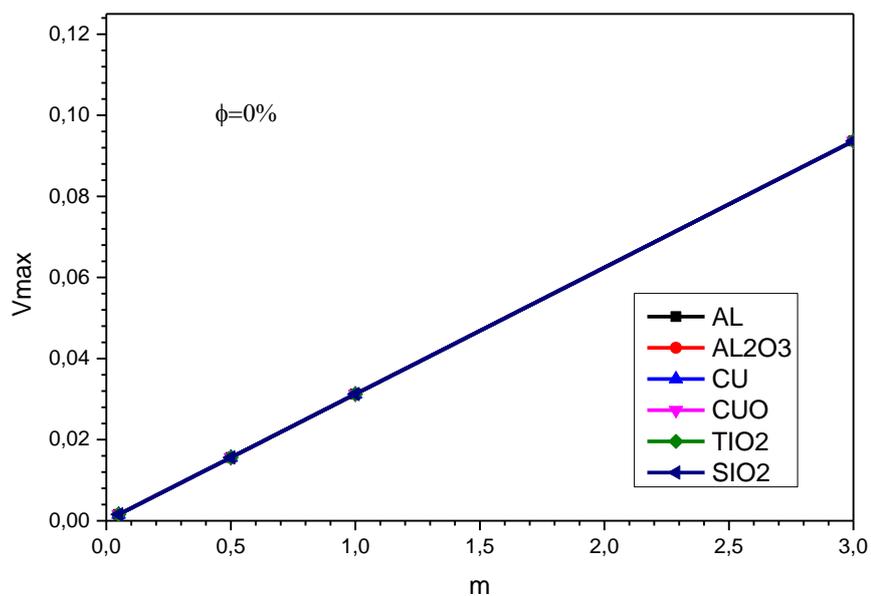
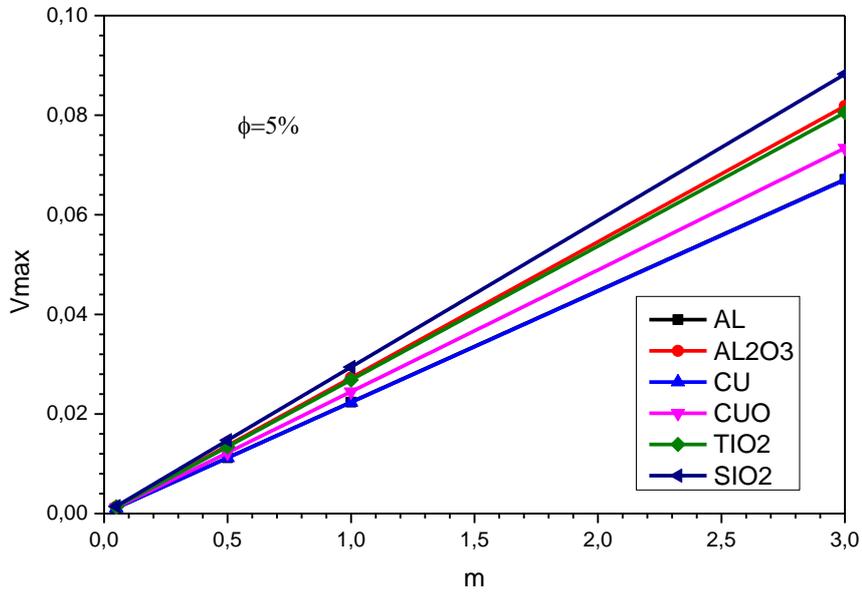


Figure IV.104: Variation de la vitesse maximale (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$



FigureIV.105 : Variation du vitesse maximale (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$

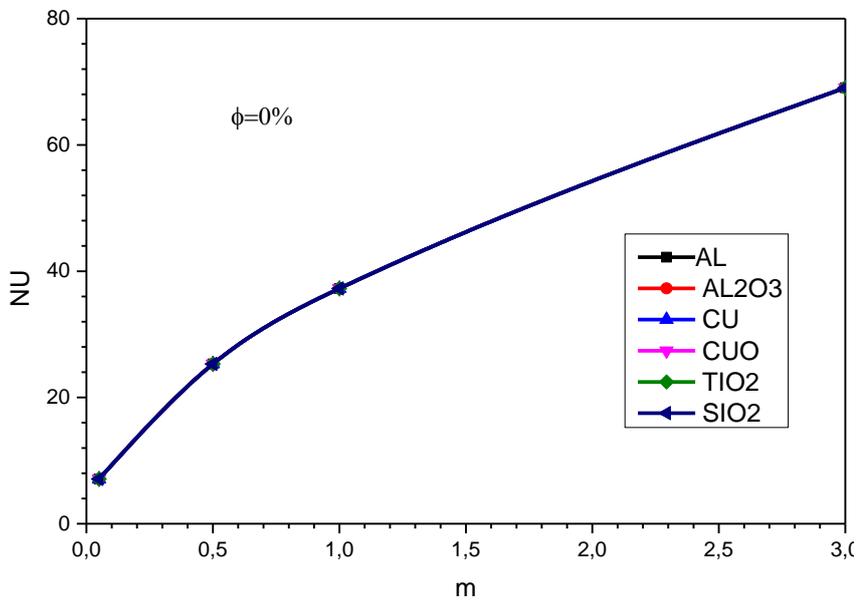
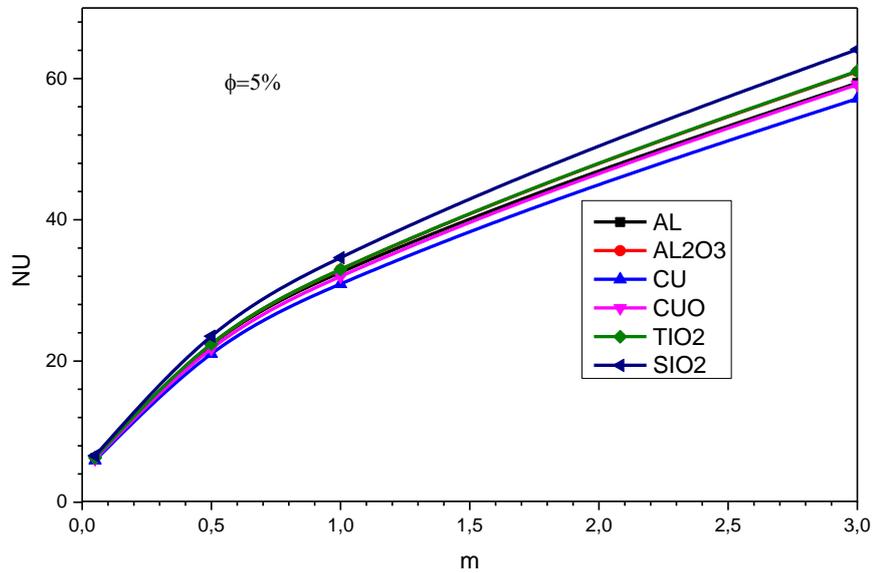
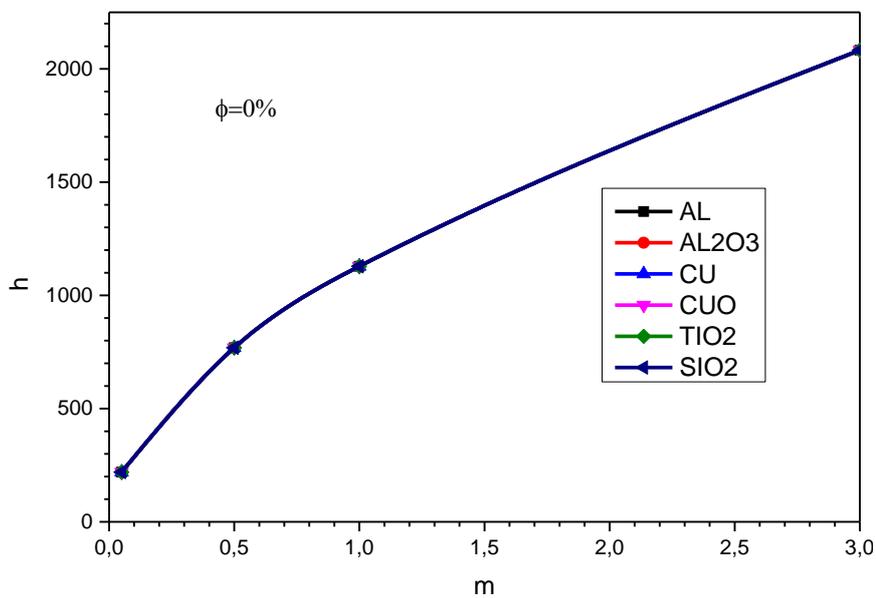


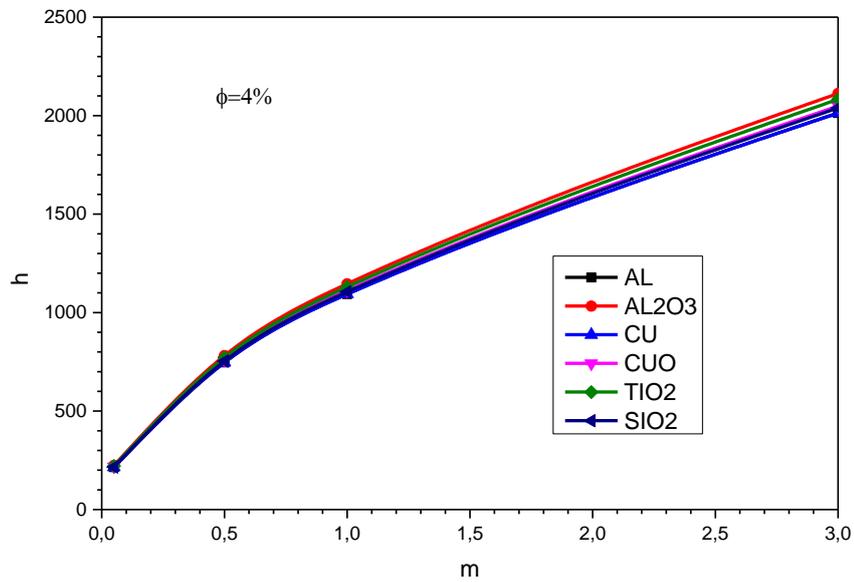
Figure IV.106: Variation du nombre de nusselt (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$



FigureIV.107 : Variation du nombre de nusselt (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$



FigureIV.108: Variation du coefficient de convection h (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$



FigureIV.109 : Variation du coeficient de convection h (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=4\%$

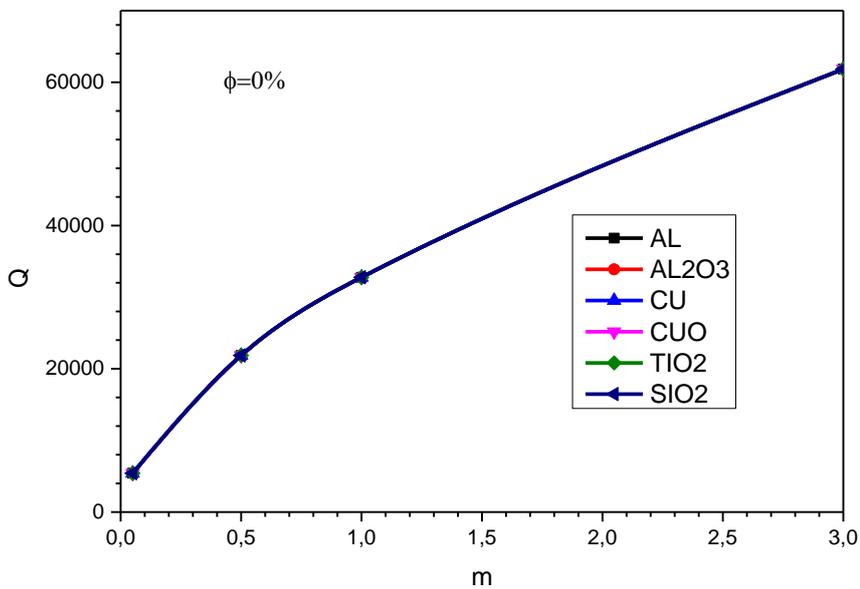


Figure IV.110: Variation du flux de chaleur Q (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$

Les figures 101 jusqu'à 114 représentent le développement des caractéristiques de l'écoulement et du transfert de chaleur (coefficient de convection h). Le nombre de Reynolds Re , le nombre de Nusselt Nu , la chute de pression, la vitesse maximale, le travail de pompe (w) et le flux de chaleur (Q). Ces figures montrent que ces caractéristiques augmentent quand le débit massique augmente. Ces caractéristiques prennent des valeurs très élevées près un débit massique de 1.5 kg/s. On a observé une augmentation légère du nombre de nœuds et le coefficient h pour cette valeur de débit et une augmentation perceptible de la vitesse maximale et le nombre Re . On a mentionné que le coefficient h et la vitesse maximale sont plus élevés pour les nanofluides SIO2 et AL.

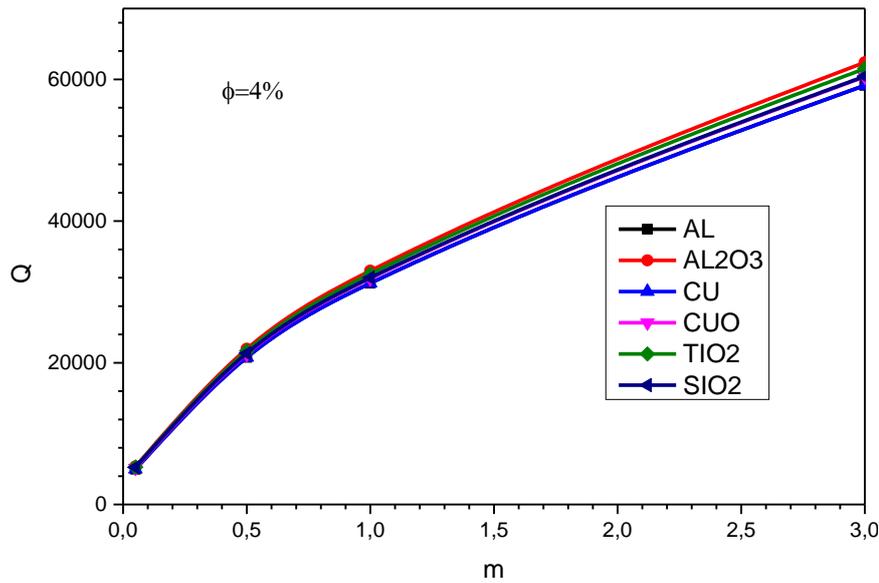


Figure IV.111: Variation du flux de chaleur Q (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=4\%$

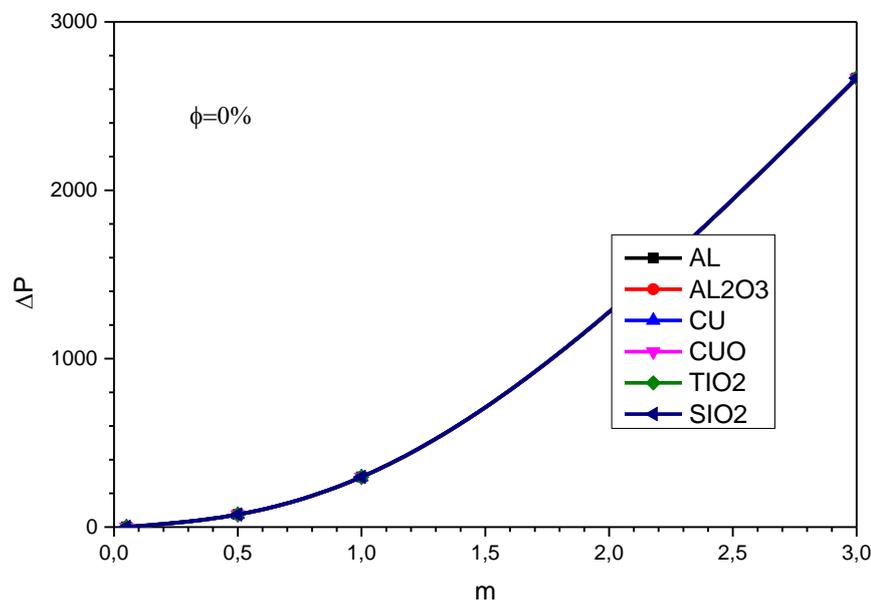


Figure IV.112: Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$

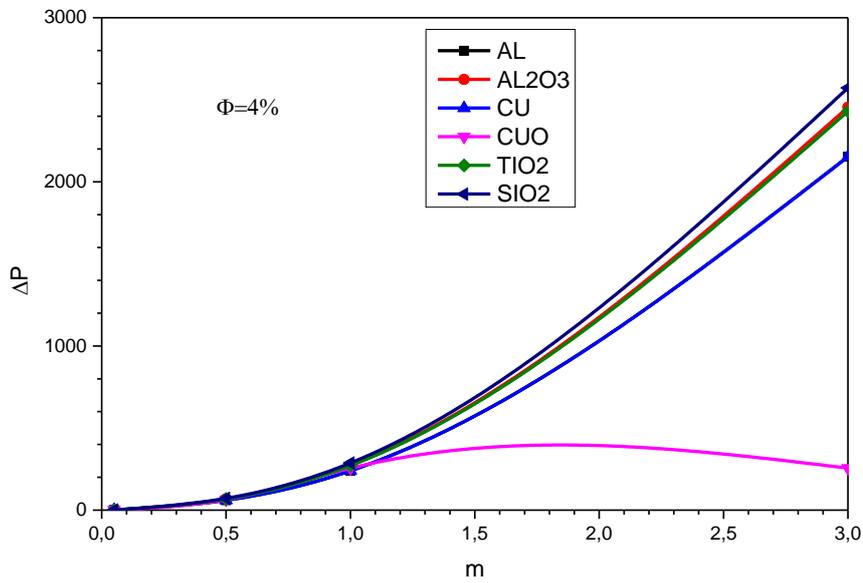


Figure IV.113: Variation du chute de pression ΔP (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=4\%$

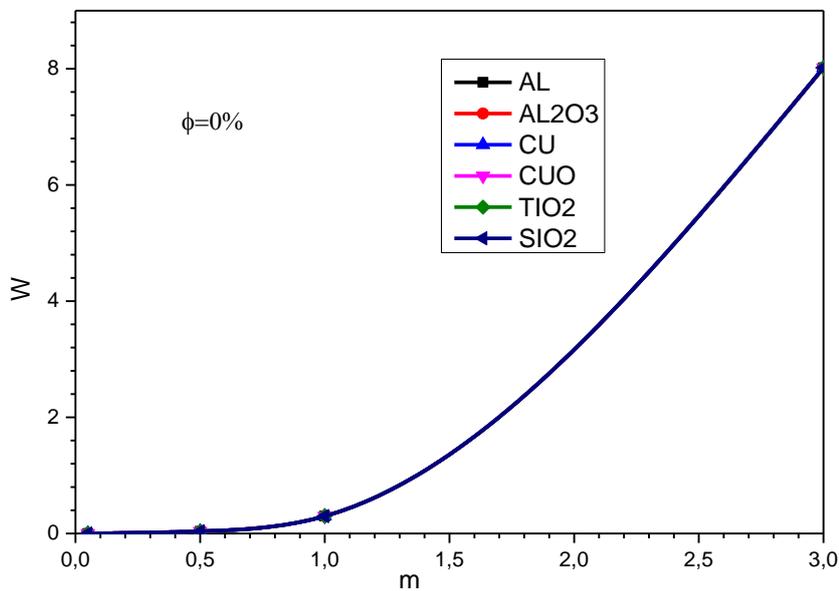


Figure IV.114: Variation du travail de pompage W (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=0\%$

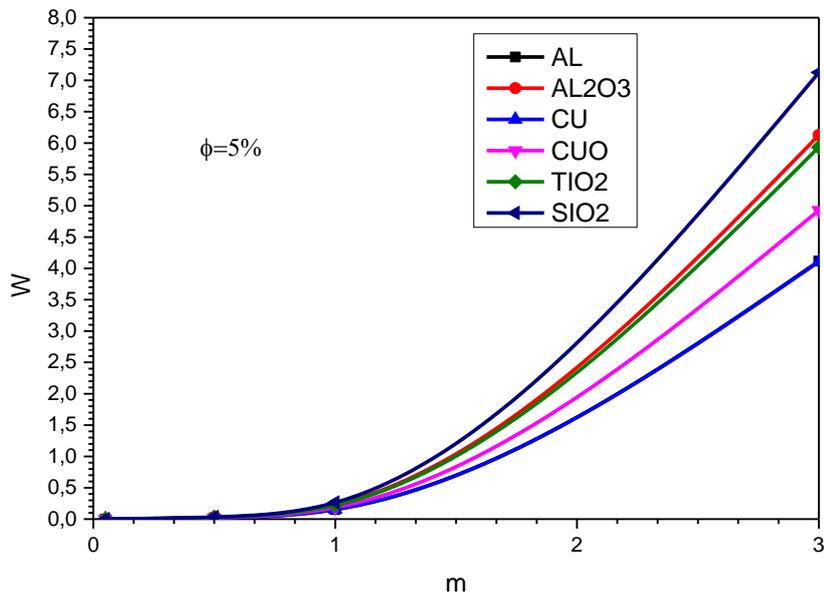
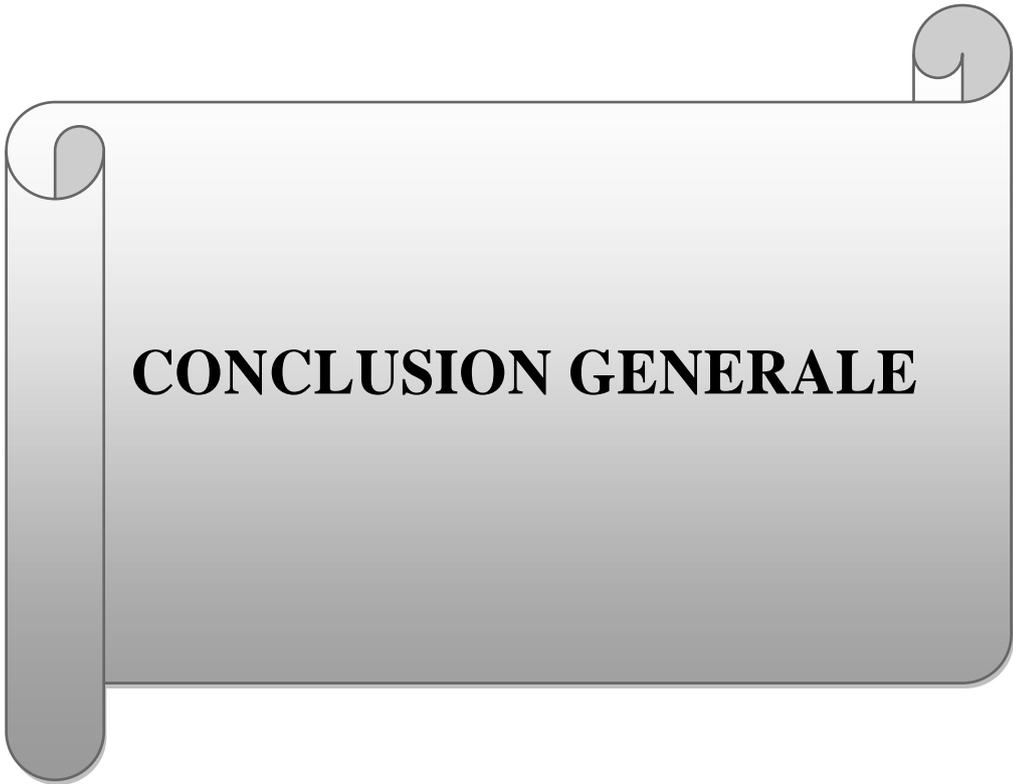


Figure IV.115: Variation du travail de pompage W (eau/nanofluides) en fonction de débit massique pour la concentration $\Phi=5\%$



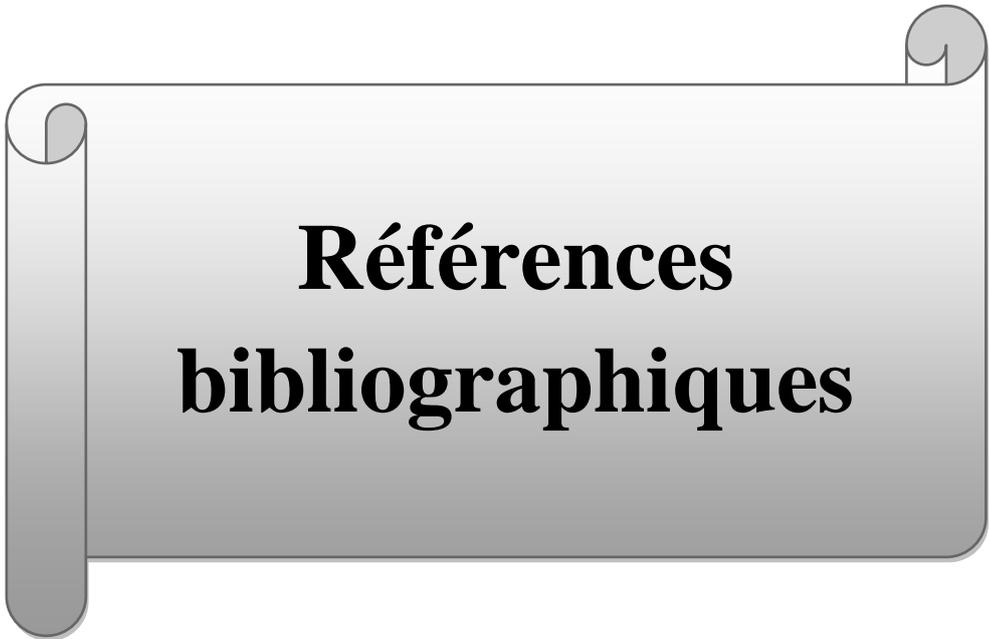
CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, une investigation numérique a été faite sur des échangeurs de chaleur utilisant différents nanofluides et a étudié leur impact thermique en particulier sur le coefficient de transfert de chaleur par convection et le nombre de Nusselt. six types de nanoparticules considérées pour cet étude. Le type de nanoparticule et sa concentration affectent principalement les valeurs de la densité, de la conductivité, de la viscosité et de la capacité calorifique.

En guise de conclusion, nous optons les points suivants :

Les résultats obtenus s'avèrent être résumés comme suit l'ajout de nanoparticules améliore le transfert de chaleur mais pas nécessairement, le type d'échangeur de chaleur et la nanoparticule jouent tous deux un rôle efficace dans le degré d'amélioration. Le nombre de Nusselt peut être multiplié par plus de trois en modifiant les concentrations (0,01-5 %) dispersées dans l'eau appliquée.

- La conductivité du fluide peut être atteinte en ajoutant une nanoparticule, par ex. peut arriver à 32 % pour l'Aluminium par exemple.
- Le choix de la nanoparticule joue un rôle important dans le processus de transfert de chaleur et sur les caractéristiques d'écoulement du fluide.
- Le flux de chaleur et la chute de pression augmentent avec l'augmentation du nombre de rangées de tubes. Cependant, le de transfert de chaleur devient presque stable lorsque le nombre de rangées est supérieur à cinq.
- L'augmentation de la concentration des nanoparticules affecte négativement la vitesse du liquide.
- Dans la construction des échangeurs de chaleur, il est nécessaire de choisir une géométrie qui donne un bon échange thermique et une perte de charge minimale.
- En comparant tous les résultats obtenus, on peut dire que le TiO₂ et SiO₂ donnent de meilleurs résultats en vitesse, température, nombre de Nusselt, h et Q .
- La perte de charge pour CuO sera moins précieuse en comparaison avec d'autres nanoparticules, où nous constatons que le diamètre des particules de CuO est de 23,6 nm et de 38,5 nm pour Al₂O₃, où la taille de la particule affecte également la rugosité et l'encrassement sur les surfaces extérieures des tubes, et a un impact négatif sur les performances de l'échangeur de chaleur avec de la chaux.



**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- [1] **Mohamed EL HATTAB, Rachid MIR, Youness EL HAMMAMI, Touria MEDIOUNI**, ‘Simulation numérique de la convection naturelle des nano fluides dans une enceinte carrée chauffée par une source de chaleur’, Revue internationale d’héliotechnique, Ecole National des Sciences appliquées, B.P. 1136, Agadir, Maroc, 2013.
- [2] **LEBBIHI Saci**, Refroidissement par convection naturelle d’une source de chaleur localisée au fond d’une enceinte remplie de nano fluide. Mémoire master, université Mohamed Khider Biskra 2014.
- [3] **A.DAAS, S. DERFOUF, N. BELGHAR, M. FALEK**, Simulation numérique de l’échange thermique dans une enceinte rectangulaire, article, Third International conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. ICEMAE p 2016, October 30-31, 2016 Constantine, Algeria.
- [4] **Mme TABET Sara**, ‘Etude numérique de la convection naturelle dans une enceinte fermée partiellement chauffée’, Thèse de doctorat Université d’Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, 2017.
- [5] **KROUMA Saadia**, Influence de la géométrie des nanoparticules dans un nano fluide sur le transfert thermique, mémoire de master université de Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [6] **HADAOUI Abdellah**, Effets de taille et de concentration sur les propriétés thermiques et rhéologiques des nano fluides, Thèse Université d’Orléans, 2010.
- [7] **SALHI Hichem**, ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS LES ENCEINTES: NANOFUIDE
- [8] **Amrid MAMMERRI**, ‘Amélioration des performances énergétiques des systèmes de refroidissement industriels : Application aux serveurs informatiques’, Doctorat Paris Tech, l’École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Paris, 2014.
- [9] **Asma LAMRI ZEGGAR**, Contribution à l’Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nano fluide. Application aux Modèles Monophasique et Diphasique, mémoire de magister Université de Frères Mentouri, 2014.
- [10] **Maxwell, C.**, A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford University Press, Cambridge, UK., 1904.
- [11] **S. U. Choi**, “Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles,” ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo., vol. 231, pp. 99–105, 1995.
- [12] **Mahatetal.** Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences Special Issue on Some Advances in Industrial and Applied Mathematics (2017) 310-314
- [13] **Mehrez, Z., El Cafsi, A., Belghith, A., Quéré, P., L. (2015)**: The entropy generation analysis in the mixed convective assisting flow of Cu-water nanofluid in an inclined open cavity, Advanced Powder Technology, vol. 26, pp. 1442 – 1451.
- [14] **Aminossadati, S., M., Ghasemi, B. (2009)** : Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure, European Journal of Mechanics B/Fluids, vol. 28, pp. 630-640.

Références bibliographiques

- [15] **Sundar, L., S., Otero-Irurueta, G., Singh, M., K., Sousa, A., C., M. (2016)** : Heat transfer and friction factor of multi-walled carbon nanotubes–Fe₃O₄ nanocompositenanofluids flow in a tube with/without longitudinal strip inserts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 100, pp. 691 - 703.
- [16] **Moumni, H., Welhezi, H., Djebali, R., Sediki, E. (2015)**: Accurate finite volume investigation of nanofluid mixed convection in two-sided lid driven cavity including discrete heat sources, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, pp. 4164 – 4179.
- [17] **Nayak, R., K., Bhattacharyya, S., Pop, I. (2015)**: Numerical study on mixed convection and entropy generation of Cu-water nanofluid in a differentially heated skewed enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 85, pp. 620 – 634.
- [18] **Desrayaud, G., Lauriat, G. (2009)**: Flow reversal of laminar mixed convection in the entry region of symmetrically heated, vertical plate channels, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, pp. 2036 - 2045.
- **Brinkman H.C. 1952**. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J. Chem. Phys.* 20: 571581.
- **Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S. 2005**. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*. 87: 153107.
- **Hamilton R.L., Crosser O.K. 1962**. Thermal conductivity of heterogeneous twocomponent systems. *I&EC Fundam.* 1: 182191.
- **Kakac S., Pramuanjaroenkij A. 2009**. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer* 52: 31873196.
- **Kebllinski P., Philpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A. 2002**. Mechanisms of heat flow in suspensions of nanosized particles. *Int. J. Heat Mass Transfer* 45: 855863.
- **Maïga S.E.B., Palm S.M., Nguyen C.T., Roy G., Galanis N. 2005**. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *Int. J. Heat and Fluid Flow* 26: 530546.
- **Maxwell J.C. 1873**. A treatise on electricity and magnetism. Oxford : Clarendon Press.
- **Mintsa H.A., Roy G., Nguyen C.T., Doucet D. 2009**. New temperature dependent thermal conductivity data for waterbased nanofluids. *Int. J. of Thermal Sciences* 48: 363371.
- **Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C. 2008**. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review. *Applied Thermal Engineering* 28: 21092125.
- **Nguyen C.T., Desgranges F., Roy G. et al. 2007**. Temperature and particlesize dependent viscosity data for waterbased nanofluids – Hysteresis phenomenon. *Int. J. Heat Fluid Flow* 28: 1492–1506.

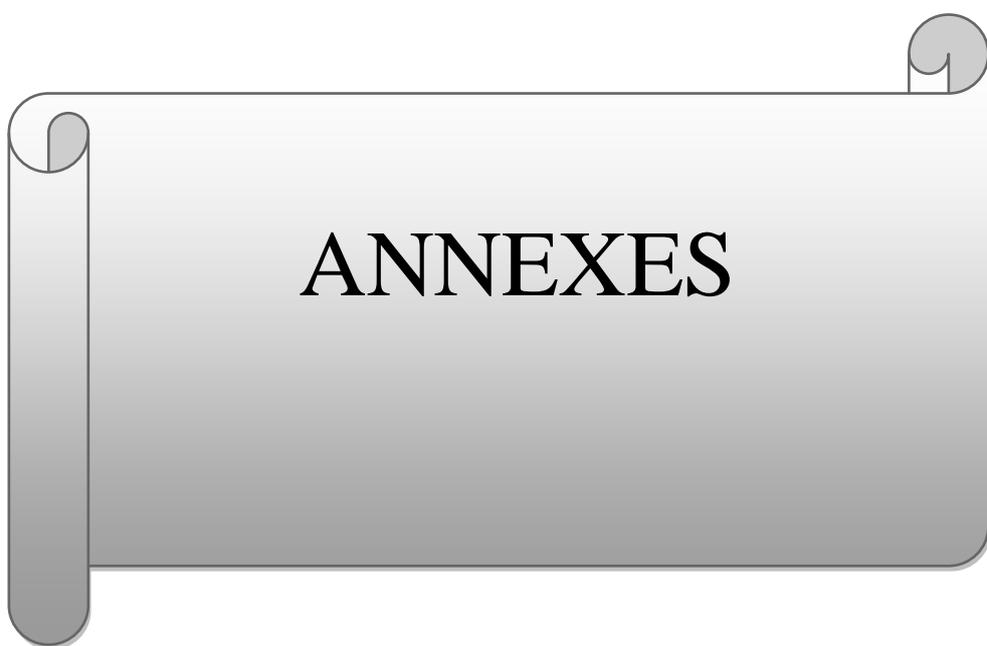
Références bibliographiques

- **Ozerinc S., Kakac S., Yazicioglu A.G. 2010.** Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a stateoftheart review. *Microfluid. Nanofluid* 8: 145170.
 - **Polidori G., Fohanno S., Nguyen C.T. 2007.** A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection. *Int. J. Thermal Sciences* 46: 739744.
 - **Popa C., Fohanno S., Nguyen C.T., Polidori G. 2010.** On heat transfer in external natural convection flows using two nanofluids. *Int. J. Thermal Sciences* 49: 901908.
 - **Wang X.Q., Mujumdar A.S. 2007.** Heat transfer characteristics of nanofluids : a review. *Int. J. Thermal Sciences* 46: 119.
 - Wen D., Lin G., Vafaei S., Zhang K. 2009.** Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology* 7: 141150.
- [ALA/2012] **Aladag B., Halefadi S., Doner N., Maré T., Duret S., Estellé P.,** Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures, *App. Energy*, 97(2012) 876-880.
- [ANO/2009] **Anoop K.B., Kabelac S., Sundararajan T., Das S.K.,** Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration, *J. Appl. Phys.* 106/3 (2009), 034909.
- [CHE/2008] **Chen L, Xie H, Li Y, Yu W.,** Nanofluids containing nanotubes treated by mechanochemical reaction, *Thermochim Acta*, 477(2008), 4-21.
- [DIN/2006] **Ding Y., Alias H., Wen D., Williams R.A.,** Heat transfer of aqueous suspensions of nanotubes *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49/1-2 (2006), 240-250.
- [GHO/2012] **Gholamnez V. N., Dorany A.,** Effect of single walled nanotubes on the viscosity of lubricants, *ICAEE, Energy Procedia*, 14 (2012), 512-517.
- [HAL/2013] **Halefadi S., Estellé P., Aladag B., Doner N., Maré T.,** Viscosity nanotubes water-based nanofluids: Influence of concentration and temperature, *International Journal of Thermal Sciences*, 71 (2013), 111-117.
- [IND/2013] **Indhuja A., Suganthi K. S., Manikandan S., Rajan K. S.,** Viscosity and thermal conductivity of dispersions of gum arabic capped np in water: Influence of concentration and temperature, article in press, 2013
- [KUM/2012] **Kumaresan V., Velraj R., Das S. K.,** Convective heat transfer characteristics of secondary refrigerant based nanofluids in a tubular heat exchanger, *International Journal of Refrigeration*, 35 (2012), 2287-2296.
- [MUR/2008] **Murshed S., Leong K., Yang C.,** Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *Int. J. Therm. Sci.*, 47/5 (2008), 560–568.

Références bibliographiques

[PAK/2012] Pakdamana M. F., Akhavan-Behabadi M. A., Razi P., An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes, *Experimental Thermal and Fluid Science* 40 (2012), 103-111.

[EST/2013] Estellé P., Halefadi S., Doner N., Maré T., Shear history effect on the viscosity of nanotubes water based nanofluid, accepted for publication in *Current Nanoscience*.



ANNEXES

Annexe 1 : Les résultats de l'interpolation des coefficients des paramètres des nano fluides

AL nano :

CP:

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	160506,3 46676	-2489,01669946	16,4611819893	-0,05789257871	1,1421878927E-4	-1,199276501E-7	5,242313571E-11
0,5	153323,6 84745	-2377,43212359	15,721994949	-0,0561838905	1,0901110363E-4	-1,143840555E-7	4,995897312E-11
1,0	146702,2 81975	-2274,58665840	15,0409442667 961	-0,052871348479	1,042210739E-4	-1,092945477E-7	4,769937088E-11
1,5	140576,3 66976	-2179,4462223	14,4110743375	-0,050698439924	9,979770914E-5	-1,045906693E-7	4,561783199E-11
2,0	134892,3 0285586 2	- 2091,1751645430 1	13,8268212882 945	-0,0485839174164099	9,5700038622508 9E-5	-1,00254890983034E- 7	4,369442804220 16E-11
2,5	129603,2 8699190 9	- 2009,0440490100 1	13,2833176048 139	-0,0466660585229304	9,1892788555492 4E-5	-9,62223542582794E- 8	4,191138065913 32E-11
3,0	124670,0 0747265 9	- 1932,4421884190 9	12,7765071054 259	-0,0448785046646083	8,8346786545888 9E-5	-9,24701450132046E- 8	4,025431366786 97E-11
3,5	120056,1 2168469 8	- 1860,7992933262	12,3025641132 426	-0,043207474007125	8,5033909554533 8E-5	-8,89674621655727E- 8	3,870906040203 4E-11
4,0	115732,5 4390859	- 1793,6668445897 2	11,8585321480 65	-0,0416425221406607	8,1933297003779 E-5	-8,56919843935042E- 8	3,726560452184 09E-11
4,5	111671,8 8960259 9	- 1730,6165783340 5	11,4415484879 015	-0,0401733812150662	7,9024103061585 5E-5	-8,26210106906381E- 8	3,591357020935 76E-11
5,0	107850,8 8930192 2	- 1671,2873610423 4	11,0492181424 931	-0,038791538501547	7,6289220377399 4E-5	-7,97361203703218E- 8	3,464464047289 31E-11

Conductivité K :

Φ	A_0	A_1	A_2
0	<u>-0,711010379969866</u>	<u>0,0071917157090421</u>	<u>-9,28925407925456E-6</u>
0,5	<u>-0,721589727881292</u>	<u>0,00729914950807607</u>	<u>-9,42803030303076E-6</u>
1,0	<u>-0,732293549107664</u>	<u>0,00740777748541281</u>	<u>-9,56837995338036E-6</u>
1,5	<u>-0,743100372379567</u>	<u>0,00751747249536714</u>	<u>-9,71010489510533E-6</u>
2,0	<u>-0,753996082715328</u>	<u>0,0076281514190596</u>	<u>-9,85306526806578E-6</u>
2,5	<u>-0,765018668905329</u>	<u>0,00774006010613584</u>	<u>-9,99764568764622E-6</u>
3,0	<u>-0,776144635958923</u>	<u>0,0078530521894659</u>	<u>-1,01436013986019E-5</u>
3,5	<u>-0,787416430751321</u>	<u>0,00796740364923127</u>	<u>-1,02913636363642E-5</u>
4,0	<u>-0,798753324925977</u>	<u>0,00808262694231719</u>	<u>-1,0440186480187E-5</u>
4,5	<u>-0,810240978812014</u>	<u>0,00819924584610362</u>	<u>-1,05908508158513E-5</u>
5,0	<u>-0,821856718385494</u>	<u>0,00831714399462523</u>	<u>-1,07431934731941E-5</u>

Masse volumique ρ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	1226,38452436	-10,8450779786146	0,110470616	-4,84866284077125E-4	1,07257975	-1,19492619833258E-9	5,328349670082
0,5	1265,41469707	-10,8002136571726	0,109991538	-4,82747120642538E-4	1,06793003	-1,1898383156243E-9	5,306290846241
1,0	1303,78145143	-10,7427954342135	0,109413721	-4,80214791592503E-4	1,06231023	-1,18353871290901E-9	5,277941172723
1,5	1341,94911534	-10,6818121901278	0,108809429	-4,77578111125013E-4	1,05646022	-1,1769696337321E-9	5,248284310434
2,0	1380,97928800	-10,6369478677774	0,108330351	-4,75458947662666E-4	1,05181050	-1,17188175094894E-9	5,226225486222
2,5	1419,87379897	-10,589480449111	0,107830520	-4,73251798342649E-4	1,04695157	-1,16652938422947E-9	5,202777773292
3,0	1457,50226304	-10,5181636054006	0,107143961	-4,70266868237316E-4	1,04027480	-1,15891660721966E-9	5,167647054409
3,5	1496,26854328	-10,4683461892935	0,106626257	-4,67987509751326E-4	1,03525244	-1,15336774246757E-9	5,143218951666
4,0	1534,72396935	-10,4127239185951	0,106063436	-4,65521346141272E-4	1,02979548	-1,14728029404748E-9	5,116013069369
4,5	1573,08185778	-10,3551997417414	0,105485250	-4,62989329388774E-4	1,02418057	-1,14099172416103E-9	5,087745094337
5,0	1611,84813779	-10,3053823211928	0,104967546	-4,60709970755708E-4	1,01915820	-1,13544285897489E-9	5,063316989332

Viscosité dynamique μ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
0	<u>0,379647817658213</u>	<u>-0,00431245007923954</u>	<u>1,84631930677073E-5</u>	<u>-3,52361357577069E-8</u>	<u>2,52622377625129E-11</u>
0,5	<u>0,382309200493741</u>	<u>-0,00434104559104069</u>	<u>1,85794955311164E-5</u>	<u>-3,54479558785338E-8</u>	<u>2,54079254082031E-11</u>
1,0	<u>0,387002544042475</u>	<u>-0,00439359383558161</u>	<u>1,88008155513357E-5</u>	<u>-3,58626606112524E-8</u>	<u>2,56993006995835E-11</u>
1,5	<u>0,39085629181654</u>	<u>-0,00443638326861477</u>	<u>1,897983950454E-5</u>	<u>-3,61962114992102E-8</u>	<u>2,59324009326848E-11</u>
2,0	<u>0,400791971581102</u>	<u>-0,00455464841137632</u>	<u>1,95090646150976E-5</u>	<u>-3,72498303614611E-8</u>	<u>2,6719114219408E-11</u>
2,5	<u>0,404340231498898</u>	<u>-0,00459347236164163</u>	<u>1,96693015487481E-5</u>	<u>-3,75447468289868E-8</u>	<u>2,69230769233741E-11</u>
3,0	<u>0,406242071591284</u>	<u>-0,00461192658029999</u>	<u>1,97355597948485E-5</u>	<u>-3,76480451958853E-8</u>	<u>2,69813519816481E-11</u>
3,5	<u>0,415032899267347</u>	<u>-0,00471556132409822</u>	<u>2,0194970976242E-5</u>	<u>-3,85541193833851E-8</u>	<u>2,76515151518184E-11</u>
4,0	<u>0,422190399752722</u>	<u>-0,00479790365680744</u>	<u>2,05512457044291E-5</u>	<u>-3,92400420599266E-8</u>	<u>2,81468531471617E-11</u>
4,5	<u>0,4247213690628</u>	<u>-0,00482424891354255</u>	<u>2,06544142950242E-5</u>	<u>-3,9419443766534E-8</u>	<u>2,8263403263714E-11</u>
5,0	<u>0,429593846802195</u>	<u>-0,00487823722715382</u>	<u>2,08796135109836E-5</u>	<u>-3,98376450027466E-8</u>	<u>2,85547785550925E-11</u>

Nombre de Prandtl Pr:

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	20876,4162	-347,22268773832	2,419617723	-0,00903506070017848	1,90571516004	-2,15195194134174E-8	1,01601715603509E-
0,5	19970,4619	-332,0881414091	2,313689844	-0,00863779127195887	1,82155946379	-2,05651853014256E-8	9,70772058030432E-
1,0	19137,1083	-318,17177666344	2,216326137	-0,00827278547808372	1,74426934229	-1,96890608639569E-8	9,29251633226304E-
1,5	18365,9643	-305,293962631548	2,126225299	-0,00793499148661259	1,67273715620	-1,8878149340288E-8	8,90818626719845E-
2,0	17653,4742	-293,401576844168	2,043061691	-0,00762336901726897	1,60678236664	-1,81308696188453E-8	8,5542075093046E-12
2,5	16990,5476	-282,335452986254	1,965667853	-0,00733333115414798	1,54538761124	-1,74351519585181E-8	8,22459966642521E-
3,0	16374,5624	-272,05668189272	1,893807547	-0,00706413369980185	1,48842651268	-1,6789930039553E-8	7,91903594117132E-
3,5	15799,7893	-262,466621470365	1,826769045	-0,00681302464034801	1,43529805410	-1,61881789789827E-8	7,63408496100228E-
4,0	15263,3641	-253,519197179907	1,764242782	-0,00657889306212488	1,38577779422	-1,56274794655676E-8	7,36866012460867E-
4,5	14759,8129	-245,118621268298	1,705526815	-0,00635898453165828	1,33925579286	-1,51006094400567E-8	7,11919117055755E-
5,0	14288,0297	-237,250277474549	1,650547073	-0,00615313117689899	1,29572049511	-1,4607716522155E-8	6,88588234721046E-

ANNEXES

--	--	--	--	--	--	--	--

Coefficient de dilatation β :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
0	0,370721900912433	-0,00553373775648689	3,27415796482689 E-5	-9,61610113879008E- 8	1,40477233871974 E-10	-8,17307692420785E- 14
0,5	0,36142745416691	-0,00538353307266576	3,17728456836896 E-5	-9,30439393991274E- 8	1,35473373244336 E-10	-7,85256410362242E- 14
1,0	0,380249664411145	-0,00568786970505247	3,37342866030474 E-5	-9,93405892020798E- 8	1,455393695568E- 10	-8,49358974472621E- 14
1,5	0,340804667086556	-0,005072891426185	2,99134540386084 E-5	-8,75137335312624E- 8	1,2729741913475E -10	-7,37179487287023E- 14
2,0	0,365793760857846	-0,00545472072170849	3,22382140207492 E-5	-9,45636467234938E- 8	1,37946166029963 E-10	-8,01282051397362E- 14
2,5	0,364262237113296	-0,00545319503764736	3,23681381498528 E-5	-9,53972584883683E- 8	1,39894483289593 E-10	-8,17307692423104E- 14
3,0	0,330013870197532	-0,00490362094766053	2,88545543235502 E-5	-8,42089284459874E- 8	1,2214787086179E -10	-7,05128205230736E- 14
3,5	0,348836080441769	-0,00520795758004725	3,0815995242908E -5	-9,05055782489402E- 8	1,32213867174254 E-10	-7,69230769341117E- 14
4,0	0,404870927909998	-0,00608162322838598	3,62480700596558 E-5	-1,07341182921675E- 7	1,58223846299083 E-10	-9,29487179608866E- 14
4,5	0,323144481835749	-0,00480056923221931	2,82398982219495 E-5	-8,23832537623311E- 8	1,19441977844745 E-10	-6,89102564206029E- 14
5,0	0,321378549259981	-0,00477806311914673	2,81331273279786 E-5	-8,21596057470415E- 8	1,19267152668622 E-10	-6,89102564198008E- 14

AL2O3 nano :**CP:**

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	160506.346676 072	-2489.01669946862	16.461181989 3116	-0.0578925787183656	1.14218 789209 97E-4	-1.19925097676501E- 7	5.242317 80313571 E-11
0. 5	157313.538366 655	-2439.27416642547	16.131443982 0236	-0.0567257910482941	1.11893 535377 019E-4	-1.17450123738723E- 7	5.132217 31314103 E-11
1. 0	154217.374215 218	-2391.04330403294	15.811790406 2953	-0.0555950775839664	1.09641 282163 448E-4	-1.15054355842593E- 7	5.025723 03215934 E-11
1. 5	151212.816456 413	-2344.24305024351	15.501664834 9596	-0.0544983821737318	1.07457 717303 503E-4	-1.12732932687717E- 7	4.922604 5682289E -11
2. 0	148295.933099 512	-2298.81190842839	15.200656159 665	-0.0534342262354042	1.05339 823309 954E-4	-1.10482544308793E- 7	4.822709 14354129 E-11
2. 5	145463.126081 637	-2254.69428758044	14.908397924 1051	-0.0524013132911843	1.03285 003642 601E-4	-1.0830040187965E-7	4.725910 94102379 E-11
3. 0	142709.785082 273	-2211.81477613843	14.624364166 2183	-0.0513976680396005	1.01289 048127 131E-4	-1.06181682929684E- 7	4.631977 93464262 E-11
3. 5	140034.382481 281	-2170.15507226432	14.348469991 5779	-0.0504231303468063	9.93519 434722 585E-5	-1.04126732623224E- 7	4.540942 80405552 E-11
4. 0	137431.003542 215	-2129.61408641769	14.079982371 2377	-0.0494748428959874	9.74673 822590 722E-5	-1.0212808506503E-7	4.452435 45120522 E-11
4. 5	134899.615228 373	-2090.20067211114	13.819023755 5818	-0.0485534929118964	9.56373 038209 574E-5	-1.00188488583693E- 7	4.366611 92190105 E-11
5. 0	132434.859456 934	-2051.82330691337	13.564931244 4658	-0.0476565006506839	9.38560 252695 3E-5	-9.8301233013969E-8	4.283140 51676683 E-11

Conductivité K :

Φ	A_0	A_1	A_2
0	-0.71101	0.00719	-9.28925E-6
0.5	-0.72055	0.00729	-9.41858E-6
1.0	-0.73017	0.00739	-9.54917E-6
1.5	-0.7399	0.00749	-9.68107E-6
2.0	-0.74968	0.0076	-9.81397E-6
2.5	-0.75957	0.0077	-9.94823E-6
3.0	-0.76953	0.00781	-1.00836E-5
3.5	-0.77964	0.00791	-1.02209E-5
4.0	-0.78978	0.00802	-1.03589E-5
4.5	-0.80001	0.00813	-1.04981E-5
5.0	-0.81036	0.00823	-1.06389E-5

Masse volumique ρ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	1226.38 4524364 53	-10.8450779786146	0.11047061640 0228	-4.84866284077125E- 4	1.07257975812 627E-6	-1.19492619833258E- 9	5.328349670 08203E-13
0.5	1239.04 7693468 95	-10.7795543977784	0.10983055801 4046	-4.82079745178253E- 4	1.06637752237 797E-6	-1.18791678484311E- 9	5.296405224 90224E-13
1.0	1253.63 5152077 69	-10.7500417178039	0.10947059982 6491	-4.80452312965882E- 4	1.06286678328 341E-6	-1.18423249795553E- 9	5.281535943 91559E-13
1.5	1266.34 6576258 96	-10.6853384473789	0.10883624394 0636	-4.77686430288994E- 4	1.05670538347 597E-6	-1.17726438127767E- 9	5.249754897 72971E-13
2.0	1279.56 2329583	-10.630227244786	0.10827777715 2708	-4.75240210290061E- 4	1.05130001735 085E-6	-1.17124812371447E- 9	5.222957513 42239E-13
2.5	1292.75 0521061 54	-10.5745377806197	0.10771424794 0283	-4.72770391125232E- 4	1.04583300515 716E-6	-1.16514643674845E- 9	5.195669929 62249E-13
3.0	1306.13 1995356 29	-10.5224271797799	0.10717829126 9378	-4.70413706448718E- 4	1.04062673476 97E-6	-1.15936476936065E- 9	5.170016336 44875E-13
3.5	1319.26 0488816 79	-10.4655346152941	0.10660477833 8222	-4.67900161332793E- 4	1.03505300057 942E-6	-1.15312532427126E- 9	5.141993460 3796E-13
4.0	1332.60 1738978 42	-10.4126567290094	0.10606272797 9681	-4.65517690708208E- 4	1.02978542875 919E-6	-1.14726605584276E- 9	5.115931369 60024E-13
4.5	1345.69 6862825 32	-10.3551997425312	0.10548525074 7541	-4.62989329414473E- 4	1.02418057500 545E-6	-1.14099172423475E- 9	5.087745094 71408E-13
5.0	1358.95 3910956 09	-10.3006602817131	0.10492962094 9786	-4.60548004167918E- 4	1.01877027941 139E-6	-1.1349487777798E- 9	5.060702611 50946E-13

Viscosité dynamique μ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
0	0.379647817658213	-0.00431245007923954	1.84631930677073E-5	-3.52361357577069E-8	2.52622377625129E-11
0.5	0.382309200493741	-0.00434104559104069	1.85794955311164E-5	-3.54479558785338E-8	2.54079254082031E-11
1.0	0.387002544042475	-0.00439359383558161	1.88008155513357E-5	-3.58626606112524E-8	2.56993006995835E-11
1.5	0.39085629181654	-0.00443638326861477	1.897983950454E-5	-3.61962114992102E-8	2.59324009326848E-11
2.0	0.400791971581102	-0.00455464841137632	1.95090646150976E-5	-3.72498303614611E-8	2.6719114219408E-11
2.5	0.404340231498898	-0.00459347236164163	1.96693015487481E-5	-3.75447468289868E-8	2.69230769233741E-11
3.0	0.406242071591284	-0.00461192658029999	1.97355597948485E-5	-3.76480451958853E-8	2.69813519816481E-11
3.5	0.415032899267347	-0.00471556132409822	2.0194970976242E-5	-3.85541193833851E-8	2.76515151518184E-11
4.0	0.422190399752722	-0.00479790365680744	2.05512457044291E-5	-3.92400420599266E-8	2.81468531471617E-11
4.5	0.4247213690628	-0.00482424891354255	2.06544142950242E-5	-3.9419443766534E-8	2.8263403263714E-11
5.0	0.429593846802195	-0.00487823722715382	2.08796135109836E-5	-3.98376450027466E-8	2.85547785550925E-11

Nombre de Prandtl Pr:

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	20876.416 2621987	-347.22268773832	2.4196177 230857	-0.00903506070017848	1.905715160 04988E-5	-2.15195194134174E- 8	1.0160171560350 9E-11
0. 5	20478.937 2847214	-340.570179829705	2.3729723 4743341	-0.00885981794649136	1.868530224 46904E-5	-2.10971604667483E- 8	9.9596241748808 9E-12
1. 0	20097.014 5085965	-334.180627242964	2.3281894 1475803	-0.00869164396597085	1.832860684 62938E-5	-2.06921912066085E- 8	9.7674182926735 1E-12
1. 5	19728.685 5517138	-328.018522754038	2.2850006 4319465	-0.00852945622162387	1.798460668 20463E-5	-2.03016328442145E- 8	9.5820506457554 1E-12
2. 0	19373.136 7587169	-322.069974164504	2.2433067 4307273	-0.00837287476914289	1.765248117 92945E-5	-1.99245374037134E- 8	9.4030637177855 9E-12
2. 5	19030.706 7159727	-316.342262432258	2.2031702 3422454	-0.00822217788619842	1.733291286 39016E-5	-1.95617837657481E- 8	9.2309231950404 4E-12
3. 0	18699.983 1034988	-310.810289103105	2.1644048 6716851	-0.00807662741904819	1.702425482 437E-5	-1.92114115681745E- 8	9.0646568552979 5E-12
3. 5	18380.491 5855454	-305.466055414162	2.1269539 6253942	-0.00793600752786692	1.672604150 20153E-5	-1.88728818577609E- 8	8.9040032606504 5E-12
4. 0	18072.071 2391579	-300.307551948027	2.0908084 8574136	-0.00780030417240571	1.643828704 68414E-5	-1.85462622500724E- 8	8.7490196006373 8E-12
4. 5	17774.371 2491716	-295.328945751467	2.0559275 5593583	-0.00766936280606825	1.616065915 69025E-5	-1.82311675759986E- 8	8.5995179667622 6E-12
5. 0	17486.289 1059596	-290.510836115482	2.0221687 9373975	-0.00754262604661765	1.589193090 69583E-5	-1.79261586134755E- 8	8.4547957446497 1E-12

Coefficient de dilatation β :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
0	0.370721900912 433	-0.00553373775648689	3.274157964826 89E-5	-9.61610113879008E-8	1.404772338719 74E-10	-8.17307692420785E- 14
0.5	0.382015596986 898	-0.00571037581812488	3.384105749701 73E-5	-9.95642372173662E-8	1.457141947329 18E-10	-8.49358974480612E- 14
1.0	0.380249664411 145	-0.00568786970505247	3.373428660304 74E-5	-9.93405892020798E-8	1.455393695568 E-10	-8.49358974472621E- 14
1.5	0.340753675380 067	-0.00507257505559169	2.991296452830 75E-5	-8.75137335318498E-8	1.272974191356 62E-10	-7.37179487292668E- 14
2.0	0.345440026869 056	-0.00514885840526056	3.040669723049 44E-5	-8.91006086854138E-8	1.298284869771 26E-10	-7.53205128312707E- 14
2.5	0.377572167332 232	-0.00565372829935385	3.357262190016 61E-5	-9.90033689289989E-8	1.452771317951 01E-10	-8.49358974475968E- 14
3.0	0.344760481059 526	-0.00513938583346601	3.035853617158 79E-5	-8.89940294332051E-8	1.297410743893 61E-10	-7.53205128310532E- 14
3.5	0.345080261366 928	-0.00514416102307932	3.038509529249 23E-5	-8.90588662615966E-8	1.297993494475 63E-10	-7.53205128310072E- 14
4.0	0.346166648133 153	-0.00515719456435722	3.044370512755 6E-5	-8.9175935024675E-8	1.298867620359 17E-10	-7.53205128315894E- 14
4.5	0.342551765020 068	-0.00511144818497125	3.022795016972 28E-5	-8.87263079924807E-8	1.295371116847 82E-10	-7.53205128306731E- 14
5.0	0.373382390749 356	-0.00558435534014843	3.311694011715 38E-5	-9.75114180157345E-8	1.428334765410 07E-10	-8.33333333455656E- 14

ANNEXES

CU nano :

CP

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	160506,34 6676072	-2489,01669946862	16,46118 1989311 6	-0,0578925787183656	1,14218789209 97E-4	-1,19925097676501E- 7	5,2423178031357 1E-11
0, 5	153323,68 4745435	-2377,43212359672	15,72199 4080794 9	-0,0552783361838905	1,09011108890 363E-4	-1,14384056530455E- 7	4,9958978688131 2E-11
1, 0	146702,28 1975704	-2274,58665840151	15,04094 4266796 1	-0,0528713868148479	1,04221333490 739E-4	-1,09294518355477E- 7	4,7699370848123 8E-11
1, 5	140576,36 6976298	-2179,44606082223	14,41107 4337536 3	-0,0506465498439924	9,97977676810 914E-5	-1,04599449206693E- 7	4,5617892092319 9E-11
2, 0	134892,30 2855862	-2091,17516454301	13,82682 1288294 5	-0,0485839174164099	9,57000386225 089E-5	-1,00254890983034E- 7	4,3694428042201 6E-11
2, 5	129603,28 6991909	-2009,04404901001	13,28331 7604813 9	-0,0466660585229304	9,18927885554 924E-5	-9,62223542582794E- 8	4,1911380659133 2E-11
3, 0	124670,00 7472659	-1932,44218841909	12,77650 7105425 9	-0,0448785046646083	8,83467865458 889E-5	-9,24701450132046E- 8	4,0254313667869 7E-11
3, 5	120056,12 1684698	-1860,7992933262	12,30256 4113242 6	-0,043207474007125	8,50339095545 338E-5	-8,89674621655727E- 8	3,8709060402034 E-11
4, 0	115732,54 390859	-1793,66684458972	11,85853 2148065	-0,0416425221406607	8,19332970037 79E-5	-8,56919843935042E- 8	3,7265604521840 9E-11
4, 5	111671,88 9602599	-1730,61657833405	11,44154 8487901 5	-0,0401733812150662	7,90241030615 855E-5	-8,26210106906381E- 8	3,5913570209357 6E-11

Conductivité K :

Φ	A_0	A_1	A_2
0	-0,711010379969866	0,0071917157090421	-9,28925407925456E-6
0,5	-0,721589727881292	0,00729914950807607	-9,42803030303076E-6
1,0	-0,732293549107664	0,00740777748541281	-9,56837995338036E-6
1,5	-0,743100372379567	0,00751747249536714	-9,71010489510533E-6
2,0	-0,753996082715328	0,0076281514190596	-9,85306526806578E-6
2,5	-0,765018668905329	0,00774006010613584	-9,99764568764622E-6
3,0	-0,776144635958923	0,0078530521894659	-1,01436013986019E-5
3,5	-0,787416430751321	0,00796740364923127	-1,02913636363642E-5
4,0	-0,798753324925977	0,00808262694231719	-1,0440186480187E-5
4,5	-0,810240978812014	0,00819924584610362	-1,05908508158513E-5
5,0	-0,821856718385494	0,00831714399462523	-1,07431934731941E-5

Masse volumique ρ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	1226,384524 36453	-10,8450779786146	0,110470616 400228	-4,84866284077125E-4	1,072579758 12627E-6	-1,19492619833258E-9	5,3283496700820 3E-13
0,5	1265,414697 0775	-10,8002136571726	0,109991538 348283	-4,82747120642538E-4	1,067930033 47058E-6	-1,1898383156243E-9	5,3062908462413 8E-13
1,0	1303,781451 43257	-10,7427954342135	0,109413721 175342	-4,80214791592503E-4	1,062310237 25048E-6	-1,18353871290901E-9	5,2779411727239 6E-13
1,5	1341,949115 34444	-10,6818121901278	0,108809429 604586	-4,77578111125013E-4	1,056460225 91949E-6	-1,1769696337321E-9	5,2482843104349 3E-13
2,0	1380,979288 00774	-10,6369478677774	0,108330351 545749	-4,75458947662666E-4	1,051810501 20121E-6	-1,17188175094894E-9	5,2262254862229 5E-13
2,5	1419,873798 97603	-10,589480449111	0,107830520 358811	-4,73251798342649E-4	1,046951572 8058E-6	-1,16652938422947E-9	5,202777732921 1E-13
3,0	1457,502263 04696	-10,5181636054006	0,107143961 540971	-4,70266868237316E-4	1,040274807 17436E-6	-1,15891660721966E-9	5,1676470544097 8E-13
3,5	1496,268543 28946	-10,4683461892935	0,106626257 162317	-4,67987509751326E-4	1,035252440 67359E-6	-1,15336774246757E-9	5,1432189516660 3E-13
4,0	1534,723969 3572	-10,4127239185951	0,106063436 542205	-4,65521346141272E-4	1,029795489 40461E-6	-1,14728029404748E-9	5,1160130693695 9E-13
4,5	1573,081857 78353	-10,3551997417414	0,105485250 741355	-4,62989329388774E-4	1,024180574 94571E-6	-1,14099172416103E-9	5,0877450943370 2E-13
5,0	1611,848137 79202	-10,3053823211928	0,104967546 327662	-4,60709970755708E-4	1,019158208 09854E-6	-1,13544285897489E-9	5,0633169893326 7E-13

Viscosité dynamique μ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
0	0,37964781765821 3	- 0,0043124500792395 4	1,84631930677073E -5	- 3,52361357577069E -8	2,52622377625129E -11
0,5	0,38230920049374 1	- 0,0043410455910406 9	1,85794955311164E -5	- 3,54479558785338E -8	2,54079254082031E -11
1,0	0,38700254404247 5	- 0,0043935938355816 1	1,88008155513357E -5	- 3,58626606112524E -8	2,56993006995835E -11
1,5	0,39085629181654	- 0,0044363832686147 7	1,897983950454E-5	- 3,61962114992102E -8	2,59324009326848E -11
2,0	0,40079197158110 2	- 0,0045546484113763 2	1,95090646150976E -5	- 3,72498303614611E -8	2,6719114219408E- 11
2,5	0,40434023149889 8	- 0,0045934723616416 3	1,96693015487481E -5	- 3,75447468289868E -8	2,69230769233741E -11
3,0	0,40624207159128 4	- 0,0046119265802999 9	1,97355597948485E -5	- 3,76480451958853E -8	2,69813519816481E -11
3,5	0,41503289926734 7	- 0,0047155613240982 2	2,0194970976242E- 5	- 3,85541193833851E -8	2,76515151518184E -11
4,0	0,42219039975272 2	- 0,0047979036568074 4	2,05512457044291E -5	- 3,92400420599266E -8	2,81468531471617E -11
4,5	0,4247213690628	- 0,0048242489135425 5	2,06544142950242E -5	- 3,9419443766534E- 8	2,8263403263714E- 11
5,0	0,42959384680219 5	- 0,0048782372271538 2	2,08796135109836E -5	- 3,98376450027466E -8	2,85547785550925E -11

Nombre de Prandtl Pr:

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	20876,4162621 987	- 347,222687738 32	2,41961772308 57	- 0,00903506070017 848	1,9057151600498 8E-5	- 2,1519519413417 4E-8	1,0160171560350 9E-11
0, 5	19970,4619250 572	- 332,088141409 1	2,31368984412 48	- 0,00863779127195 887	1,8215594637937 1E-5	- 2,0565185301425 6E-8	9,7077205803043 2E-12
1, 0	19137,1083689 751	- 318,171776663 44	2,21632613719 823	- 0,00827278547808 372	1,7442693422944 7E-5	- 1,9689060863956 9E-8	9,2925163322630 4E-12
1, 5	18365,9643632 296	- 305,293962631 548	2,12622529958 199	- 0,00793499148661 259	1,6727371562099 1E-5	- 1,8878149340288 E-8	8,9081862671984 5E-12
2, 0	17653,4742279 473	- 293,401576844 168	2,04306169103 28	- 0,00762336901726 897	1,6067823666426 6E-5	- 1,8130869618845 3E-8	8,5542075093046 E-12
2, 5	16990,5476712 431	- 282,335452986 254	1,96566785332 664	- 0,00733333115414 798	1,5453876112435 8E-5	- 1,7435151958518 1E-8	8,2245996664252 1E-12
3, 0	16374,5624422 82	- 272,056681892 72	1,89380754771 253	- 0,00706413369980 185	1,4884265126856 1E-5	- 1,6789930039553 E-8	7,9190359411713 2E-12
3, 5	15799,7893439 429	- 262,466621470 365	1,82676904562 387	- 0,00681302464034 801	1,4352980541012 3E-5	- 1,6188178978982 7E-8	7,6340849610022 8E-12
4, 0	15263,3641012 508	- 253,519197179 907	1,76424278252 771	- 0,00657889306212 488	1,3857777942273 8E-5	- 1,5627479465567 6E-8	7,3686601246086 7E-12
4, 5	14759,8129639 098	- 245,118621268 298	1,70552681522 969	- 0,00635898453165 828	1,3392557928606 9E-5	- 1,5100609440056 7E-8	7,1191911705575 5E-12
5, 0	14288,0297912 176	- 237,250277474 549	1,65054707374 294	- 0,00615313117689 899	1,2957204951159 5E-5	- 1,4607716522155 E-8	6,8858823472104 6E-12

Coefficient de dilatation β :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
0	0,37072190091243 3	- 0,0055337377564868 9	3,27415796482689E -5	- 9,61610113879008E -8	1,40477233871974E -10	- 8,17307692420785E -14
0,5	0,36142745416691	- 0,0053835330726657 6	3,17728456836896E -5	- 9,30439393991274E -8	1,35473373244336E -10	- 7,85256410362242E -14
1,0	0,38024966441114 5	- 0,0056878697050524 7	3,37342866030474E -5	- 9,93405892020798E -8	1,455393695568E- 10	- 8,49358974472621E -14
1,5	0,34080466708655 6	-0,005072891426185	2,99134540386084E -5	- 8,75137335312624E -8	1,2729741913475E- 10	- 7,37179487287023E -14
2,0	0,36579376085784 6	- 0,0054547207217084 9	3,22382140207492E -5	- 9,45636467234938E -8	1,37946166029963E -10	- 8,01282051397362E -14
2,5	0,36426223711329 6	- 0,0054531950376473 6	3,23681381498528E -5	- 9,53972584883683E -8	1,39894483289593E -10	- 8,17307692423104E -14
3,0	0,33001387019753 2	- 0,0049036209476605 3	2,88545543235502E -5	- 8,42089284459874E -8	1,2214787086179E- 10	- 7,05128205230736E -14
3,5	0,34883608044176 9	- 0,0052079575800472 5	3,0815995242908E- 5	- 9,05055782489402E -8	1,32213867174254E -10	- 7,69230769341117E -14
4,0	0,40487092790999 8	- 0,0060816232283859 8	3,62480700596558E -5	- 1,07341182921675E -7	1,58223846299083E -10	- 9,29487179608866E -14
4,5	0,32314448183574 9	- 0,0048005692322193 1	2,82398982219495E -5	- 8,23832537623311E -8	1,19441977844745E -10	- 6,89102564206029E -14
5,0	0,32137854925998 1	- 0,0047780631191467 3	2,81331273279786E -5	- 8,21596057470415E -8	1,19267152668622E -10	- 6,89102564198008E -14

CuO nano :

CP:

Φ	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
0	160506,346676 072	- 2489,01669946 862	16,4611819893 116	- 0,0578925787183 656	1,1421878920997 E-4	- 1,1992509767650 1E-7	5,2423178031357 1E-11
0, 5	155214,027244 363	- 2406,69563907 075	15,9156977337 227	- 0,0559629785233 029	1,1037432098776 3E-4	- 1,1583398921653 3E-7	5,0603586530306 6E-11
1, 0	150215,492423 027	- 2328,95263265 756	15,4006667228 458	- 0,0541419472895 27	1,0674869734001 3E-4	- 1,1197928291920 6E-7	4,8891102872492 8E-11
1, 5	145488,297024 535	- 2255,44195033 289	14,9138137138 85	- 0,0524214496390 162	1,0332585467854 3E-4	- 1,0834375847205 2E-7	4,7277973789196 3E-11
2, 0	141007,951750 366	- 2185,77082374 55	14,4524466312 897	- 0,0507915509828 158	1,0008498089575 1E-4	- 1,0490397332145 4E-7	4,5753096340637 E-11
2, 5	136757,983851 349	- 2119,69084012 767	14,0149672585 836	- 0,0492467548573 71	9,7015420404660 1E-5	- 1,0164890086236 6E-7	4,4311699283245 E-11
3, 0	132719,733303 3	- 2056,90648939 336	13,5993764098 559	- 0,0477797900755 879	9,4102179237203 7E-5	- 9,8561934014510 6E-8	4,2946053860647 6E-11
3, 5	128877,926823 887	- 1997,17991069 056	13,2040903042 555	- 0,0463849917701 149	9,1333774786116 E-5	- 9,5630574038332 3E-8	4,1650441117094 3E-11
4, 0	125217,997807 959	- 1940,28237786 225	12,8275746094 059	- 0,0450568313575 553	8,8698920415498 5E-5	- 9,2842451451466 5E-8	4,0419166608851 4E-11
4, 5	121726,782914 165	- 1886,00730353 002	12,4684443158 909	- 0,0437903226383 621	8,6187448385568 6E-5	- 9,0186438446141 7E-8	3,9247115956896 7E-11
5, 0	118394,787197 756	- 1834,21344999 038	12,1258049322 35	- 0,0425824515981 248	8,3793665380146 6E-5	- 8,7656832247829 9E-8	3,8131919879557 5E-11

Conductivité K :

Φ	A_0	A_1	A_2
0	-0,711010379969866	0,0071917157090421	-9,28925407925456E-6
0,5	-0,719101581631974	0,00728124801534141	-9,40533799533849E-6
1,0	-0,727251900646582	0,00737151319225871	-9,5223659673664E-6
1,5	-0,735497959601078	0,00746275046589682	-9,64071095571136E-6
2,0	-0,743761244754085	0,00755447112414369	-9,75961538461588E-6
2,5	-0,752097392850274	0,00764703491524419	-9,87963869463917E-6
3,0	-0,760497726056428	0,00774039963057437	-1,0000722610723E-5
3,5	-0,768968304211834	0,00783459007549549	-1,01228787878793E-5
4,0	-0,777516789346666	0,00792967248543722	-1,02462237762242E-5
4,5	-0,786126886255088	0,00802554685807074	-1,0370594405595E-5
5,0	-0,794756985804277	0,00812196669456579	-1,04956177156183E-5

Masse volumique ρ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	1226,38452436 453	- 10,8450779786 146	0,110470616400 228	- 4,8486628407712 5E-4	1,0725797581262 7E-6	- 1,1949261983325 8E-9	5,3283496700820 3E-13
0, 5	1253,01997838 811	- 10,7949060396 253	0,109949677880 966	- 4,8257147640930 9E-4	1,0675165079560 9E-6	- 1,1893203806807 2E-9	5,3035947678235 4E-13
1, 0	1279,36552325 173	- 10,7394689371 884	0,109389026307 874	- 4,8011743159443 1E-4	1,0620952613058 4E-6	- 1,1832866795785 2E-9	5,2767156826968 1E-13
1, 5	1305,94963368 862	- 10,6881500205 221	0,108857722757 676	- 4,7777377867670 4E-4	1,0569048234948 4E-6	- 1,1775067993763 6E-9	5,2509803884917 8E-13
2, 0	1332,51928893 077	- 10,6369478663 803	0,108330351535 186	- 4,7545894762008 6E-4	1,0518105011046 8E-6	- 1,1718817508322 2E-9	5,2262254856349 2E-13
2, 5	1358,84603771 941	- 10,5808756168 432	0,107762541138 425	- 4,7296605886227 7E-4	1,0462776031606 3E-6	- 1,1656836029190 6E-9	5,1983660103701 3E-13
3, 0	1385,15180040 241	- 10,5247203663 106	0,107196543575 284	- 4,7049103269439 7E-4	1,0408106387813 6E-6	- 1,1595975721469 2E-9	5,1712418276324 E-13
3, 5	1411,31048679 63	- 10,4655346148 94	0,106604778334 979	- 4,6790016131883 8E-4	1,0350530005457 7E-6	- 1,1531253242281 8E-9	5,1419934601506 6E-13
4, 0	1438,20126229 134	- 10,4202575251 697	0,106122840691 247	- 4,6577066093166 4E-4	1,0303828576914 7E-6	- 1,1480167928380 5E-9	5,1198529354251 8E-13
4, 5	1464,71690958 838	- 10,3677924056 484	0,105583649912 87	- 4,6339852721232 1E-4	1,0251357039615 9E-6	- 1,1421781729596 2E-9	5,0938725448635 6E-13
5, 0	1490,45390775 534	- 10,3006602779 822	0,104929620920 956	- 4,6054800404934 8E-4	1,0187702791376 8E-6	- 1,1349487774417 2E-9	5,0607026097919 3E-13

Viscosité dynamique μ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
0 3	0,37964781765821	- 0,0043124500792395 4	1,84631930677073E -5	- 3,52361357577069E -8	2,52622377625129E -11
0, 5 1	0,38230920049374	- 0,0043410455910406 9	1,85794955311164E -5	- 3,54479558785338E -8	2,54079254082031E -11
1, 0 5	0,38700254404247	- 0,0043935938355816 1	1,88008155513357E -5	- 3,58626606112524E -8	2,56993006995835E -11
1, 5	0,39085629181654	- 0,0044363832686147 7	1,897983950454E-5	- 3,61962114992102E -8	2,59324009326848E -11
2, 0 2	0,40079197158110	- 0,0045546484113763 2	1,95090646150976E -5	- 3,72498303614611E -8	2,6719114219408E- 11
2, 5 8	0,40434023149889	- 0,0045934723616416 3	1,96693015487481E -5	- 3,75447468289868E -8	2,69230769233741E -11
3, 0 4	0,40624207159128	- 0,0046119265802999 9	1,97355597948485E -5	- 3,76480451958853E -8	2,69813519816481E -11
3, 5 7	0,41503289926734	- 0,0047155613240982 2	2,0194970976242E- 5	- 3,85541193833851E -8	2,76515151518184E -11
4, 0 2	0,42219039975272	- 0,0047979036568074 4	2,05512457044291E -5	- 3,92400420599266E -8	2,81468531471617E -11
4, 5	0,4247213690628	- 0,0048242489135425 5	2,06544142950242E -5	- 3,9419443766534E- 8	2,8263403263714E- 11
5, 0 5	0,42959384680219	- 0,0048782372271538 2	2,08796135109836E -5	- 3,98376450027466E -8	2,85547785550925E -11

Nombre de Prandtl Pr:

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	20876,4162621 987	- 347,222687738 32	2,41961772308 57	- 0,00903506070017 848	1,9057151600498 8E-5	- 2,1519519413417 4E-8	1,0160171560350 9E-11
0, 5	20232,5211173 153	- 336,451112979 713	2,34412684188 771	- 0,00875158342065 103	1,8455924220366 5E-5	- 2,0836946200068 4E-8	9,8362173122284 3E-12
1, 0	19626,6730553 622	- 326,318891438 125	2,27313717274 097	- 0,00848508627922 35	1,7890875877693 3E-5	- 2,0195635948289 E-8	9,5319362667128 9E-12
1, 5	19055,7864902 982	- 316,773986358 763	2,20628101571 714	- 0,00823417687177 271	1,7359027879956 E-5	- 1,9592176931117 6E-8	9,2456944368648 7E-12
2, 0	18515,6221515 329	- 307,741959378 889	2,14301095723 8	- 0,00799669933807 08	1,6855588433872 4E-5	- 1,9020873527633 5E-8	8,9746650253081 8E-12
2, 5	18005,4434995 86	- 299,213957121 214	2,08329070722 668	- 0,00777261944041 956	1,6380711955512 E-5	- 1,8482169892794 4E-8	8,7191911692939 4E-12
3, 0	17521,9946113 207	- 291,132975863 209	2,02670200513 161	- 0,00756029244413 025	1,5930745444295 7E-5	- 1,7971723829100 2E-8	8,4771160060816 5E-12
3, 5	17063,8846135 565	- 283,476705110 917	1,97309551366 096	- 0,00735918514486 835	1,5504619068271 E-5	- 1,7488392957606 6E-8	8,2479329997218 1E-12
4, 0	16629,6786072 596	- 276,222027753 572	1,92231599184 297	- 0,00716874193750 545	1,5101215995647 5E-5	- 1,7030982569624 8E-8	8,0311111044642 6E-12
4, 5	16216,6945716 968	- 269,321554839 362	1,87401274155 652	- 0,00698757300995 055	1,4717428185970 5E-5	- 1,6595776637127 9E-8	7,8247957451445 7E-12
5, 0	15823,6166217 778	- 262,753495468 109	1,82803464367 008	- 0,00681511698317 178	1,4352077954399 7E-5	- 1,6181452678249 9E-8	7,6283660067363 3E-12

Coefficient de dilatation β :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
0	0,370721900912 433	- 0,00553373775648 689	3,2741579648268 9E-5	- 9,6161011387900 8E-8	1,4047723387197 4E-10	- 8,1730769242078 5E-14
0,5	0,382015596986 898	- 0,00571037581812 488	3,3841057497017 3E-5	- 9,9564237217366 2E-8	1,4571419473291 8E-10	- 8,4935897448061 2E-14
1,0	0,380249664411 145	- 0,00568786970505 247	3,3734286603047 4E-5	- 9,9340589202079 8E-8	1,455393695568E -10	- 8,4935897447262 1E-14
1,5	0,340753675380 067	- 0,00507257505559 169	2,9912964528307 5E-5	- 8,7513733531849 8E-8	1,2729741913566 2E-10	- 7,3717948729266 8E-14
2,0	0,345440026869 056	- 0,00514885840526 056	3,0406697230494 4E-5	- 8,9100608685413 8E-8	1,2982848697712 6E-10	- 7,5320512831270 7E-14
2,5	0,377572167332 232	- 0,00565372829935 385	3,3572621900166 1E-5	- 9,9003368928998 9E-8	1,4527713179510 1E-10	- 8,4935897447596 8E-14
3,0	0,344760481059 526	- 0,00513938583346 601	3,0358536171587 9E-5	- 8,8994029433205 1E-8	1,2974107438936 1E-10	- 7,5320512831053 2E-14
3,5	0,345080261366 928	- 0,00514416102307 932	3,0385095292492 3E-5	- 8,9058866261596 6E-8	1,2979934944756 3E-10	- 7,5320512831007 2E-14
4,0	0,346166648133 153	- 0,00515719456435 722	3,0443705127556 E-5	- 8,9175935024675 E-8	1,2988676203591 7E-10	- 7,5320512831589 4E-14
4,5	0,342551765020 068	- 0,00511144818497 125	3,0227950169722 8E-5	- 8,8726307992480 7E-8	1,2953711168478 2E-10	- 7,5320512830673 1E-14
5,0	0,373382390749 356	- 0,00558435534014 843	3,3116940117153 8E-5	- 9,7511418015734 5E-8	1,4283347654100 7E-10	- 8,3333333345565 6E-14

TiO₂ nano :CP:

Φ	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
0	160506,346676 072	- 2489,01669946 862	16,4611819893 116	- 0,0578925787183 656	1,1421878920997 E-4	- 1,1992509767650 1E-7	5,2423178031357 1E-11
0, 5	157014,382657 504	- 2434,63206749 687	16,1006964316 348	- 0,0566170463015 62	1,1167687854558 8E-4	- 1,1721953898086 8E-7	5,1219591430977 E-11
1, 0	153641,047810 814	- 2382,10225308 986	15,7525822799 273	- 0,0553857587010 771	1,0922447641591 3E-4	- 1,1461106338367 6E-7	5,0060187838151 3E-11
1, 5	150379,569211 655	- 2331,31851447 209	15,4160943218 98	- 0,0541959666881 653	1,0685582679629 E-4	- 1,1209319376543 6E-7	4,8941903525711 2E-11
2, 0	147224,884885 917	- 2282,20302147 72	15,0907216610 886	- 0,0530458705352 938	1,0456734089665 E-4	- 1,0966209255093 E-7	4,7863014638390 8E-11
2, 5	144170,688589 41	- 2234,65320265 034	14,7757520797 535	- 0,0519328060095 901	1,0235335921663 6E-4	- 1,0731129476570 8E-7	4,6820416600539 9E-11
3, 0	141213,142644 649	- 2188,61204426 87	14,4708248509 791	- 0,0508555559089 63	1,0021157270620 5E-4	- 1,0503847003995 2E-7	4,5813129019833 9E-11
3, 5	138347,529075 273	- 2144,00523486 214	14,1754403728 728	- 0,0498123149433 055	9,8138283811204 3E-5	- 1,0283955194063 7E-7	4,4839272812161 E-11
4, 0	135568,026519 082	- 2100,73666877 121	13,8889225695 96	- 0,0488005231117 366	9,6127993833952 5E-5	- 1,0070819654770 6E-7	4,3895776081271 E-11
4, 5	132873,740265 291	- 2058,80204579 568	13,6113079337 36	- 0,0478205657310 712	9,4182039985911 3E-5	- 9,8646505001491 6E-8	4,2983905167371 2E-11
5, 0	130258,655769 186	- 2018,10011357 635	13,3418717457 171	- 0,0468696528066 027	9,2294335341205 9E-5	- 9,6647351334422 5E-8	4,2100163338387 E-11

Conductivité K :

Φ	A_0	A_1	A_2
0	-0,711010379969866	0,0071917157090421	-9,28925407925456E-6
0,5	-0,716924729213267	0,00726526525684473	-9,38495337995383E-6
1,0	-0,72291170633655	0,00733958897596302	-9,48173659673699E-6
1,5	-0,728893630207433	0,0074142143885503	-9,57888111888166E-6
2,0	-0,734917242337338	0,00748943020206033	-9,67681818181868E-6
2,5	-0,740958627799343	0,00756509537453776	-9,77533799533848E-6
3,0	-0,747006149878439	0,00764114600854777	-9,87434731934779E-6
3,5	-0,753083707480343	0,00771772379523024	-9,97404428904482E-6
4,0	-0,759204035929087	0,00779491250264873	-1,00745571095575E-5
4,5	-0,765352033915849	0,0078726451168183	-1,01758158508164E-5
5,0	-0,77151552834678	0,00795083734986178	-1,02776689976695E-5

Masse volumique ρ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	1226,38452436 453	- 10,8450779786 146	0,110470616400 228	- 4,8486628407712 5E-4	1,0725797581262 7E-6	- 1,1949261983325 8E-9	5,3283496700820 3E-13
0,5	1240,89769332 771	- 10,7795543951 675	0,109830557993 976	- 4,8207974509613 9E-4	1,0663775221893 6E-6	- 1,1879167846125 3E-9	5,2964052237299 7E-13
1,0	1257,07125940 484	- 10,7450886193 215	0,109431973469 866	- 4,8029211778977 8E-4	1,0624941411467 4E-6	- 1,1837715155490 3E-9	5,2791666631377 3E-13
1,5	1272,29610198 492	- 10,6929392511 984	0,108896356711 244	- 4,7793940075463 5E-4	1,0573028129657 9E-6	- 1,1780151189559 7E-9	5,2536764670332 4E-13
2,0	1287,31928993 077	- 10,6369478663 803	0,108330351535 186	- 4,7545894762008 6E-4	1,0518105011046 8E-6	- 1,1718817508322 2E-9	5,2262254856349 2E-13
2,5	1302,00052106 153	- 10,5745377806 197	0,107714247940 283	- 4,7277039112523 2E-4	1,0458330051571 6E-6	- 1,1651464367484 5E-9	5,1956699296224 9E-13
3,0	1316,92767113 203	- 10,5164982419 886	0,107130370004 562	- 4,7020800086420 9E-4	1,0401320835599 4E-6	- 1,1587329293865 6E-9	5,1666666629790 2E-13
3,5	1332,69568037 192	- 10,4746052432 582	0,106675225981 286	- 4,6819110811167 5E-4	1,0357269230912 3E-6	- 1,1539554502234 8E-9	5,1462418265039 E-13
4,0	1347,80126446 306	- 10,4202575283 982	0,106122840716 46	- 4,6577066103636 7E-4	1,0303828579353 3E-6	- 1,1480167931400 8E-9	5,1198529369793 4E-13
4,5	1362,19462670 492	- 10,3524407644 49	0,105464530050 828	- 4,6290679600080 8E-4	1,0239967184273 9E-6	- 1,1407745771744 9E-9	5,0866830022030 3E-13
5,0	1377,85120109 248	- 10,3081938920 323	0,104989025127 646	- 4,6079731907631 2E-4	1,0193576479694 1E-6	- 1,1356852769001 E-9	5,0645424792502 7E-13

Viscosité dynamique μ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
0	0,376678486079672	-0,00428195250019617	1,83514293819055E-5	-3,50679577010273E-8	2,51806069552821E-11
0,5	0,379223309448914	-0,00430877339350046	1,84579556920222E-5	-3,5256470497207E-8	2,53058868989854E-11
1,0	0,382547834839104	-0,00434392645854964	1,85966196506034E-5	-3,54971307927395E-8	2,54602390502376E-11
1,5	0,385570281657373	-0,00437698765173258	1,8733247988312E-5	-3,57491697843712E-8	2,56350315649299E-11
2,0	0,398915182009558	-0,00453720190255237	1,94554989584164E-5	-3,71964657182153E-8	2,67220296048527E-11
2,5	0,400386425776614	-0,00455005320906063	1,94942576116047E-5	-3,72395118560145E-8	2,67306614496956E-11
3,0	0,402635821360518	-0,00457342000267287	1,9586129723314E-5	-3,74013444891644E-8	2,68384980693562E-11
3,5	0,410528489341925	-0,00466572291763022	1,99920721058855E-5	-3,81955945106502E-8	2,74211996610986E-11
4,0	0,419262102492135	-0,00476778966958502	2,04406731506608E-5	-3,90730926707812E-8	2,80652223394302E-11
4,5	0,4193317116467	-0,0047636886767355	2,04029876510942E-5	-3,89636365280173E-8	2,79602031241553E-11
5,0	0,424778495098975	-0,0048249049608219	2,06622092570947E-5	-3,94528235580772E-8	2,83069707482494E-11

Nombre de Prandtl Pr:

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	20876,4162621	- 268773832	2,419617723085	- 8506070017848	1,9057151600498	- 5194134174E-8	1,016017156035
0,5	20470,7263505	- 2872157342	2,371875855156	- 5547937995014	1,8675673242571	- 7915987455E-8	9,954044109526
1,0	20080,9704534	- 0998578081	2,326021212346	- 8301885319393	1,8309366556615	- 8627413343E-8	9,756160122742
1,5	19705,6037707	- 9749014255	2,281851860849	- 1688120030998	1,7956455271046	- 1219000693E-8	9,565473848378
2,0	19345,9567325	- 5509602441	2,239582862619	- 5799123652627	1,7619156714243	- 8833544793E-8	9,383464044594
2,5	18999,2680839	- 7734771091	2,198828175939	- 0477541682253	1,7293862428393	- 2348261787E-8	9,207883979366
3,0	18664,9151666	- 5881088871	2,159512908606	- 5694834058272	1,6979957397277	- 4661345683E-8	9,038390515441
3,5	18342,2770539	- 9707459104	2,121566686175	- 1425243731429	1,6676912635930	- 9998648804E-8	8,874722214915
4,0	18032,1906739	- 5890713578	2,085125805521	- 7727469267529	1,6386136521859	- 5240421362E-8	8,717818620259
4,5	17732,7732650	- 0181454782	2,049930178446	- 4496045507035	1,6105221845603	- 4075845871E-8	8,566192803381
5,0	17444,4175939	- 095760044	2,016051852080	- 1763276131568	1,5834969886393	- 897025199E-8	8,420408489768

Coefficient de dilatation β :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
0	0,3707219009 12433	- 0,0055337377564868 9	3,2741579648268 9E-5	- 9,6161011387900 8E-8	1,4047723387197 4E-10	- 8,1730769242078 5E-14
0,5	0,3820155969 86898	- 0,0057103758181248 8	3,3841057497017 3E-5	- 9,9564237217366 2E-8	1,4571419473291 8E-10	- 8,4935897448061 2E-14
1,0	0,3802496644 11145	- 0,0056878697050524 7	3,3734286603047 4E-5	- 9,9340589202079 8E-8	1,455393695568E -10	- 8,4935897447262 1E-14
1,5	0,3407536753 80067	- 0,0050725750555916 9	2,9912964528307 5E-5	- 8,7513733531849 8E-8	1,2729741913566 2E-10	- 7,3717948729266 8E-14
2,0	0,3454400268 69056	- 0,0051488584052605 6	3,0406697230494 4E-5	- 8,9100608685413 8E-8	1,2982848697712 6E-10	- 7,5320512831270 7E-14
2,5	0,3428192327 52314	- 0,0051153511528030 1	3,0247245697505 9E-5	- 8,8765719413952 4E-8	1,2956624921432 2E-10	- 7,5320512830921 6E-14
3,0	0,3447604810 59526	- 0,0051393858334660 1	3,0358536171587 9E-5	- 8,8994029433205 1E-8	1,2974107438936 1E-10	- 7,5320512831053 2E-14
3,5	0,3450802613 66928	- 0,0051441610230793 2	3,0385095292492 3E-5	- 8,9058866261596 6E-8	1,2979934944756 3E-10	- 7,5320512831007 2E-14
4,0	0,3255785053 13166	- 0,0048303518188981 3	2,8375493314228 5E-5	- 8,2655637206436 5E-8	1,1964594054733 6E-10	- 6,8910256419752 8E-14
4,5	0,3425517650 20068	- 0,0051114481849712 5	3,0227950169722 8E-5	- 8,8726307992480 7E-8	1,2953711168478 2E-10	- 7,5320512830673 1E-14
5,0	0,3733823907 49356	- 0,0055843553401484 3	3,3116940117153 8E-5	- 9,7511418015734 5E-8	1,4283347654100 7E-10	- 8,3333333345565 6E-14

SiO₂ nano :CP:

Φ	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
0	160506,346676 072	- 2489,01669946 862	16,4611819893 116	- 0,0578925787183 656	1,1421878920997 E-4	- 1,1992509767650 1E-7	5,2423178031357 1E-11
0, 5	158663,491138 379	- 2460,30039683 981	16,2708051298 159	- 0,0572188386570 775	1,1287590736189 E-4	- 1,1849549007981 6E-7	5,178707509084E -11
1, 0	156846,054555 188	- 2431,98464263 734	16,0831221899 38	- 0,0565548333589 215	1,1155296178121 6E-4	- 1,1708780698521 1E-7	5,1161102869351 9E-11
1, 5	155052,657138 878	- 2404,04476696 202	15,8979469822 735	- 0,0558998089413 903	1,1024822788827 E-4	- 1,1569993819136 5E-7	5,0544182935552 7E-11
2, 0	153282,443578 646	- 2376,46646340 138	15,7151783127 57	- 0,0552533817020 396	1,0896088417197 7E-4	- 1,1433094354950 8E-7	4,9935865942615 5E-11
2, 5	151535,165598 625	- 2349,24651839 945	15,5347992597 069	- 0,0546155084656 854	1,0769088091758 7E-4	- 1,1298081307513 5E-7	4,9336168230819 3E-11
3, 0	149810,473929 36	- 2322,37980629 12	15,3567778661 68	- 0,0539860830470 218	1,0643801986644 2E-4	- 1,1164934990003 7E-7	4,8745008100907 6E-11
3, 5	148107,968107 266	- 2295,85964907 266	15,1810656012 232	- 0,0533649124758 832	1,0520186000067 7E-4	- 1,1033600761378 5E-7	4,8162099605567 1E-11
4, 0	146427,389345 772	- 2269,68323044 016	15,0076534819 884	- 0,0527520069677 735	1,0398252400993 1E-4	- 1,0904104958847 7E-7	4,7587630652196 1E-11
4, 5	144768,291794 709	- 2243,84283175 414	14,8364835963 67	- 0,0521471299507 447	1,0277945959178 5E-4	- 1,0776378062109 3E-7	4,7021233593552 9E-11
5, 0	143129,015873 688	- 2218,30898137 255	14,6673362901 803	- 0,0515494061507 258	1,0159070169086 7E-4	- 1,0650184593735 E-7	4,6461731960303 1E-11

Conductivité K :

Φ	A₀	A₁	A₂
0	-0,711010379969866	0,0071917157090421	-9,28925407925456E-6
0,5	-0,707478157465424	0,00718881411233768	-9,28657342657393E-6
1,0	-0,703882000610245	0,00718559718463621	-9,28344988345034E-6
1,5	-0,700233518237496	0,00718211986183451	-9,27994172494223E-6
2,0	-0,696588484470688	0,00717875682807422	-9,27666666666709E-6
2,5	-0,692884095577335	0,00717510080131207	-9,27297202797251E-6
3,0	-0,689129407454262	0,00717121022443725	-9,26895104895153E-6
3,5	-0,685361494667662	0,00716731770000961	-9,26496503496561E-6
4,0	-0,681558386745062	0,0071632876406189	-9,26080419580464E-6
4,5	-0,677693340311098	0,00715895251013782	-9,25621212121248E-6
5,0	-0,673818585410542	0,00715464673163707	-9,25171328671371E-6

Masse volumique ρ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	1226,38452436 453	- 10,8450779786 146	0,110470616400 228	- 4,8486628407712 5E-4	1,0725797581262 7E-6	- 1,1949261983325 8E-9	5,3283496700820 3E-13
0,5	1231,93429318 24	- 10,8018790240 895	0,110005129911 59	- 4,8280598812555 8E-4	1,0680727573372 4E-6	- 1,1900219937656 3E-9	5,3072712392391 6E-13
1,0	1236,21286734 144	- 10,7346900793 324	0,109351479985 487	- 4,7996058184078 2E-4	1,0617277979485 7E-6	- 1,1828289024153 6E-9	5,2743464025071 1E-13
1,5	1241,19800779 501	- 10,6808153384 679	0,108802112855 819	- 4,7754973391974 6E-4	1,0563989484047 1E-6	- 1,1768998607964 E-9	5,2479575133760 5E-13
2,0	1246,71929112 578	- 10,6369478699 712	0,108330351562 688	- 4,7545894773221 5E-4	1,0518105013613 6E-6	- 1,1718817511450 1E-9	5,2262254872202 4E-13
2,5	1251,25052224 822	- 10,5745377840 757	0,107714247966 885	- 4,7277039123420 4E-4	1,0458330054077 2E-6	- 1,1651464370550 3E-9	5,1956699311821 4E-13
3,0	1256,45180344 005	- 10,5247203669 738	0,107196543580 14	- 4,7049103271330 4E-4	1,0408106388226 5E-6	- 1,1595975721948 7E-9	5,1712418278637 E-13
3,5	1261,39998568 427	- 10,4700749531 085	0,106640545161 501	- 4,6805001979507 5E-4	1,0354052250651 2E-6	- 1,1535656586645 8E-9	5,1442810436679 E-13
4,0	1266,20397519 404	- 10,4127239155 686	0,106063436518 854	- 4,6552134604535 E-4	1,0297954891833 6E-6	- 1,1472802937757 8E-9	5,1160130679818 2E-13
4,5	1270,84462886 31	- 10,3524407674 158	0,105464530073 97	- 4,6290679609689 8E-4	1,0239967186513 8E-6	- 1,1407745774524 3E-9	5,0866830036370 4E-13
5,0	1276,13718261 736	- 10,3042026756 227	0,104958067596 807	- 4,6066948177346 6E-4	1,0190612260256 9E-6	- 1,1353193387986 8E-9	5,0626633955126 2E-13

Viscosité dynamique μ :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
0	0,379647817658213	-0,00431245007923954	1,84631930677073E-5	-3,52361357577069E-8	2,52622377625129E-11
0,5	0,382309200493741	-0,00434104559104069	1,85794955311164E-5	-3,54479558785338E-8	2,54079254082031E-11
1,0	0,387002544042475	-0,00439359383558161	1,88008155513357E-5	-3,58626606112524E-8	2,56993006995835E-11
1,5	0,39085629181654	-0,00443638326861477	1,897983950454E-5	-3,61962114992102E-8	2,59324009326848E-11
2,0	0,400791971581102	-0,00455464841137632	1,95090646150976E-5	-3,72498303614611E-8	2,6719114219408E-11
2,5	0,404340231498898	-0,00459347236164163	1,96693015487481E-5	-3,75447468289868E-8	2,69230769233741E-11
3,0	0,406242071591284	-0,00461192658029999	1,97355597948485E-5	-3,76480451958853E-8	2,69813519816481E-11
3,5	0,415032899267347	-0,00471556132409822	2,0194970976242E-5	-3,85541193833851E-8	2,76515151518184E-11
4,0	0,422190399752722	-0,00479790365680744	2,05512457044291E-5	-3,92400420599266E-8	2,81468531471617E-11
4,5	0,4247213690628	-0,00482424891354255	2,06544142950242E-5	-3,9419443766534E-8	2,8263403263714E-11
5,0	0,429593846802195	-0,00487823722715382	2,08796135109836E-5	-3,98376450027466E-8	2,85547785550925E-11

Nombre de Prandtl Pr:

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0	20876,4162621 987	- 347,222687738 32	2,41961772308 57	- 0,00903506070017 848	1,9057151600498 8E-5	- 2,1519519413417 4E-8	1,0160171560350 9E-11
0,5	20783,5576808 814	- 345,620637235 087	2,40806826568 499	- 0,00899055064523 514	1,8960477806287 4E-5	- 2,1407359016682 2E-8	1,0105882344698 1E-11
1,0	20694,1435578 615	- 344,078100358 196	2,39694936947 114	- 0,00894770862354 424	1,8867451249509 E-5	- 2,1299463956409 3E-8	1,0053676462378 E-11
1,5	20606,1453755 974	- 342,557287575 239	2,38596837352 71	- 0,00890532857714 057	1,8775282537315 3E-5	- 2,1192401241522 2E-8	1,0001797377442 4E-11
2,0	20522,0135751 307	- 341,104100697 2	2,37548258326 931	- 0,00886488995409 237	1,8687408450590 1E-5	- 2,1090417963385 1E-8	9,9524264624416 4E-12
2,5	20438,7768456 456	- 339,662855366 084	2,36505829801 984	- 0,00882459582546 891	1,8599651782264 8E-5	- 2,0988348270842 4E-8	9,9029084886138 9E-12
3,0	20359,6188296 787	- 338,293292498 18	2,35516140851 029	- 0,00878637898047 601	1,8516511485110 5E-5	- 2,0891763462632 1E-8	9,8561111030232 1E-12
3,5	20282,4698285 77	- 336,956549613 625	2,34548846703 199	- 0,00874897824526 077	1,8435044990292 4E-5	- 2,0797009147974 6E-8	9,8101470507623 3E-12
4,0	20207,3357289 717	- 335,652953992 658	2,33604386895 961	- 0,00871242013466 836	1,8355334752957 7E-5	- 2,0704214887585 8E-8	9,7650980311827 4E-12
4,5	20135,0894383 628	- 334,398782778 973	2,32695360063 68	- 0,00867722276894 227	1,8278574872227 5E-5	- 2,0614843017210 8E-8	9,7217075083303 2E-12
5,0	20064,3112340 454	- 333,167539295 111	2,31801218274 051	- 0,00864253864732 259	1,8202804561423 2E-5	- 2,0526480759950 5E-8	9,6787418220832 5E-12

Coefficient de dilatation β :

Φ	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
0	0,370721900912 433	- 0,00553373775648 689	3,2741579648268 9E-5	- 9,6161011387900 8E-8	1,4047723387197 4E-10	- 8,1730769242078 5E-14
0,5	0,382015596986 898	- 0,00571037581812 488	3,3841057497017 3E-5	- 9,9564237217366 2E-8	1,4571419473291 8E-10	- 8,4935897448061 2E-14
1,0	0,380249664411 145	- 0,00568786970505 247	3,3734286603047 4E-5	- 9,9340589202079 8E-8	1,455393695568E -10	- 8,4935897447262 1E-14
1,5	0,360982317188 575	- 0,00539504092988 235	3,1961379647855 7E-5	- 9,3994619927076 3E-8	1,3750910309231 5E-10	- 8,0128205139377 1E-14
2,0	0,344469773750 828	- 0,00513676993100 445	3,0350626905848 1E-5	- 8,8985870924572 5E-8	1,2974107438862 6E-10	- 7,5320512830598 7E-14
2,5	0,323478568171 213	- 0,00480409733167 807	2,8251837557499 8E-5	- 8,2396074275515 E-8	1,1944197784530 9E-10	- 6,8910256420952 E-14
3,0	0,361592804804 675	- 0,00540243202195 723	3,19958480345E- 5	- 9,4067615264100 8E-8	1,3756737815125 2E-10	- 8,0128205139785 8E-14
3,5	0,340242098213 578	- 0,00506538255146 242	2,9877261992372 7E-5	- 8,7438407192032 4E-8	1,2723914407600 8E-10	- 7,3717948728413 9E-14
4,0	0,344317697595 82	- 0,00513395429804 363	3,0334721063692 6E-5	- 8,8949956007766 8E-8	1,297119368609E -10	- 7,5320512831471 9E-14
4,5	0,327754162451 57	- 0,00487536692857 225	2,8723478811383 E-5	- 8,3941207005847 E-8	1,2194390815811 8E-10	- 7,0512820523254 8E-14
5,0	0,325133368334 835	- 0,00484185967611 479	2,8564027278395 1E-5	- 8,3606317734387 4E-8	1,2168167039531 7E-10	- 7,0512820522907 5E-14

Annexe 2

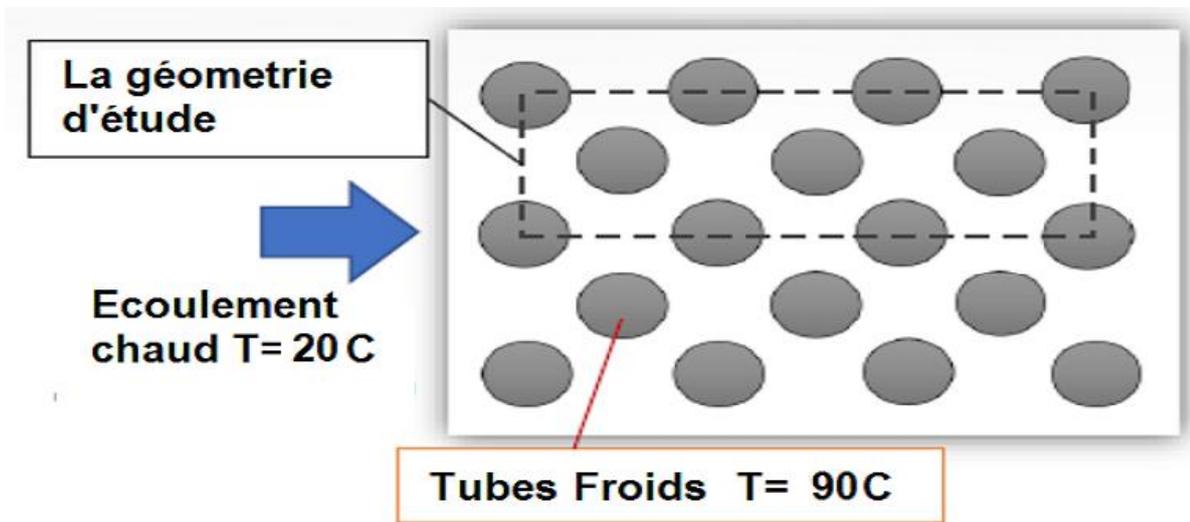


Figure : La géométrie et le domaine de calcul

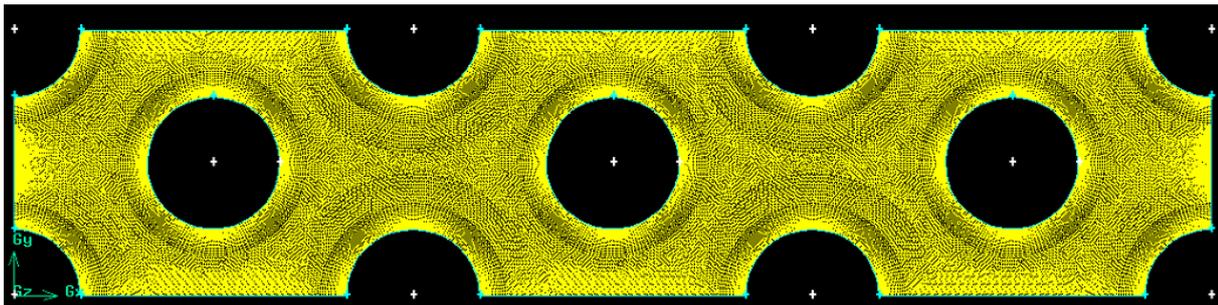
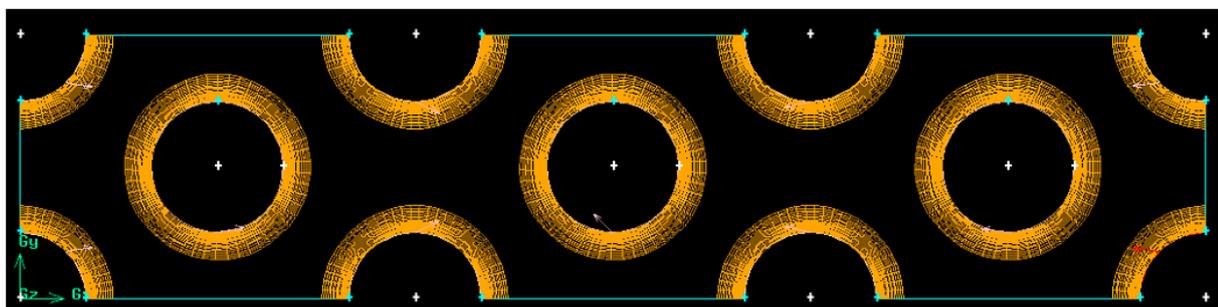


Figure : Maillage hybride structure- Non structure



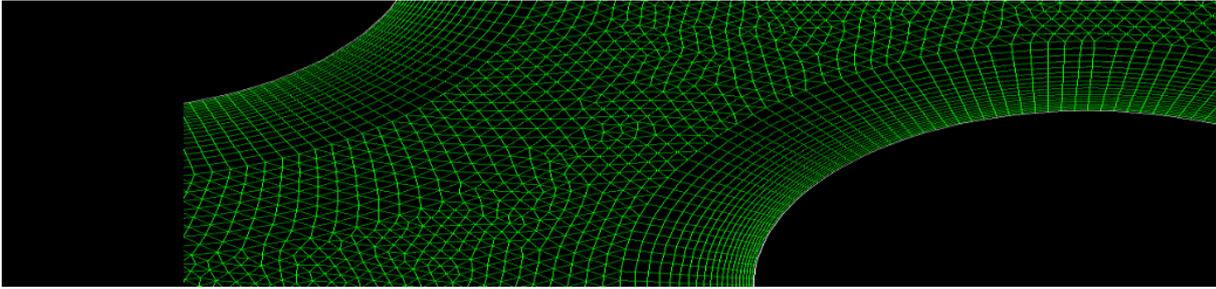


Figure : maillage structure pour capter la couche limite

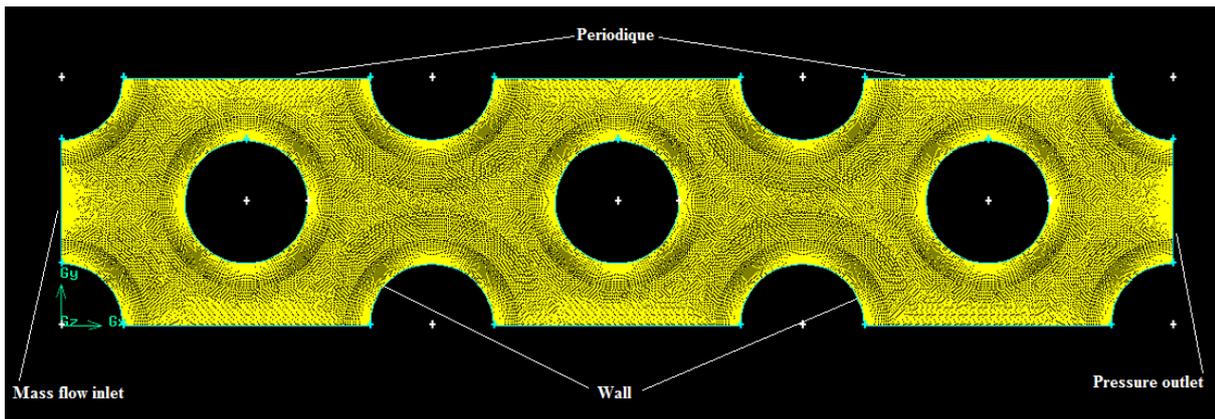


Figure : Conditions aux limites

Condition	Valeur
Inlet- Mass flow inlet	$M_{\dot{}}=0.01-3 \text{ Kg.s}$ $T1= 293.15$ K
Outlet- Pressure outlet	$Pe= 1 \text{ atm}$ $T2 \text{ a calculer}$
Wall- Wall	$T_{\text{paroi}}= 363.15 \text{ K}$