



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des sciences et de la technologie

Département de génie mécanique

Mémoire

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Par : - Zerfaoui Aimen

- Chorfi Akram

Sujet

**Simulation numérique de la convection forcée laminaire
des nanofluides dans une conduite cylindrique**

Présenté et soutenu publiquement, le 07 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

Pr. BELAZIZIA Abdennaceur

Professeur

Président

Dr. AGGOUNE Rabeh

M.C.B

Examineur

Dr. BOUAFFANE Abdelkrim

M.C.B

Rapporteur

Promotion : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





Remerciements :

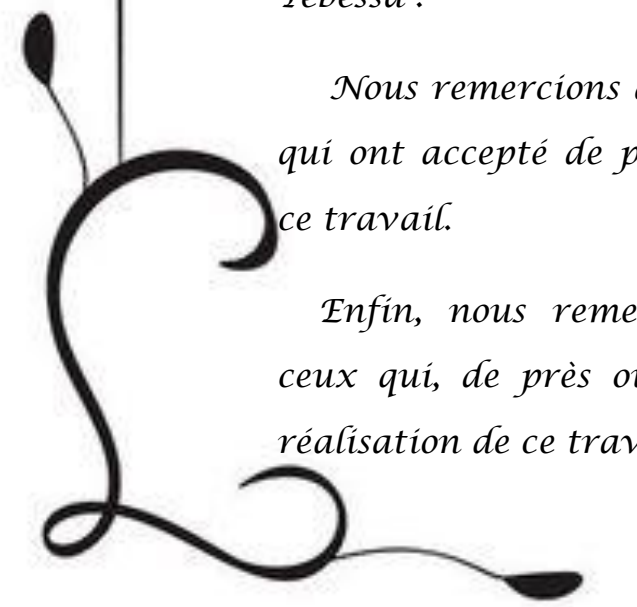
Dieu merci, Venez nous donner du courage et de la patience au cours de toutes ces années de l'étude.

*Nous remercions sincèrement et notre profonde gratitude et reconnaissance envers notre encadreur Dr. **Bouaaffane Abdelkrim**, pour son encouragement continue, pour la suivi de près de notre travail, pour ses conseils judicieux et ses observations pendant la période de la réalisation de ce mémoire.*

Nous remercions tous les enseignants du département sciences et de la technologie, en particulier les enseignants de la génie mécanique de l'université de Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa .

Nous remercions aussi tous les membres de jury qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.

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



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents.

A mes très chers frères et sœurs.

A toute ma famille sans exception.

A mes chères amies.

Zerfaoui Aimen

Chorfi Akram

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I: Généralité et synthèse bibliographique

I.1	Introduction	3
I.2	Les nanoparticules et les fluides porteurs.....	3
I.3	Généralité sur les techniques de synthèse des nanoparticules	5
I.4	Définition des nanofluides.....	6
I.5	Méthodes de préparation des nanofluides	7
I.5.1	Méthode en une seule étape	8
I.5.2	Méthode en deux étapes	9
I.6	Propriétés thermo-physiques des nanofluides	9
I.6.1	Densité volumique.....	9
I.6.2	La viscosité dynamique	10
I.6.3	Chaleur spécifique.....	11
I.6.4	La conductivité thermique.....	11
I.7	Domaines d'application des nanofluides.....	12
I.8	Avantages et inconvénients des nanofluides	13
I.8.1	Avantages des nanofluides	13
I.8.2	Inconvénients des nanofluides	13
I.9	Synthèse bibliographique	13

Chapitre II: Géométrie et modélisation mathématique

II.1	Introduction	23
II.2	Géométrie du problème étudié	23
II.3	Equations gouvernantes.....	23
II.3.1	Equation de continuité.....	24
II.3.2	Equations de la quantité de mouvement.....	24
II.3.3	Equation d'énergie	24
II.4	Hypothèses simplificatrices	24

II.5	Conditions aux limites dimensionnelles	26
II.6	Choix du modèle de la viscosité :	26
II.7	Choix du modèle de la conductivité thermique :	28
II.7.1	Choix du modèle de la conductivité du Al_2O_3 – Eau	28
II.7.2	Choix du modèle de la conductivité du Al_2O_3 – EG	29
II.7.3	Choix du modèle de la conductivité du CuO – Eau	29
II.7.4	Choix du modèle de la conductivité du CuO – EG	30
II.7.5	Choix du modèle de la conductivité du SiO_2 – Eau	30
II.7.6	Choix du modèle de la conductivité du SiO_2 – EG	31
II.8	Modèle mathématique en forme adimensionnelle:	32
II.9	Conditions aux limites adimensionnelles	33
II.10	Nombre de Nusselt local et moyen	33
II.11	Coefficient des pertes de charge local et moyen	35
II.12	La performance thermique	35

Chapitre III: Discrétisation et résolutions numérique

III.1	Introduction	37
III.2	Présentation de la méthode des volumes finis (M.V.F)	37
III.2.1	Descriptif	37
III.2.2	Principe de la méthode	37
III.3	Etapas de la méthode des volumes finis	38
III.4	Distribution des volumes de contrôle	38
III.5	Discrétisation des équations de conservation	39
III.5.1	Discrétisation de l'équation de continuité	40
III.5.2	Discrétisation de l'équation de quantité de mouvement	42
III.5.3	Discrétisation de l'équation d'énergie	48
III.6	Algorithme de couplage pression – vitesse : SIMPLE	53
III.7	Résolution du système linéaire des équations discrétisées	55
III.7.1	Algorithme de THOMAS (TDMA)	55

III.7.2	Application de l'algorithme de THOMAS à des problèmes à 2D (TDMA).....	56
III.8	Critère de convergence	57
Chapitre IV: Résultats et Interprétations		
IV.1	Introduction.....	58
IV.2	Procédure de résolution et de convergence.....	58
IV.3	Validation du code de calcul.....	61
IV.4	Choix du maillage :.....	63
IV.5	Résultats et discussion	63
IV.5.1	Effet de la concentration sur le coefficient de convection	64
IV.5.2	Influence de la concentration volumique sur la chute de pression.....	69
IV.5.3	Effet de la concentration sur la performance thermique	76
IV.5.4	Comparaison du h_{moyen} des différent nanofluides	80
IV.5.5	Comparaison du PTH des différents nanofluides.....	83
Conclusion générale		87

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons étudiés numériquement les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques de l'écoulement laminaire de divers nanofluides à l'intérieur d'une conduite cylindrique dont sa surface latérale est soumise à une densité de flux constante. Les nanofluides étudiés sont: Al_2O_3 -Eau, Al_2O_3 -EG, CuO-Eau, CuO-EG, SiO_2 -Eau, SiO_2 -EG. La méthode des volumes finis et l'algorithme SIMPLE sont utilisés pour résoudre de manière itérative les équations gouvernantes. Le coefficient de convection, la chute de pression et la performances PTH sont présentés et discutés pour des concentrations volumiques de nanoparticules variant de 0% à 8% et pour nombre de Reynolds 500 et 1500.

Les résultats montrent que l'augmentation de la concentration en nanoparticules améliore significativement le coefficient de convection moyen en particulier pour CuO-Eau, CuO-EG, Al_2O_3 -Eau et Al_2O_3 -EG. L'ajout de nanoparticules à les deux fluides de base l'eau et l'éthylène glycol a un effet négatif sur la puissance de pompage, où l'augmentation de la concentration conduit à augmenter la chute de pression. La chute de pression la plus élevée se produit pour (CuO-Eau, CuO-EG) suivie de (Al_2O_3 -Eau, Al_2O_3 -EG) et (SiO_2 -Eau, SiO_2 -EG). La comparaison entre les fluides étudiés indique que les valeurs PTH de (CuO-Eau, CuO-EG) et (Al_2O_3 -Eau, Al_2O_3 -EG) sont supérieures à l'unité, car elles montrent une amélioration significative du taux de transfert de chaleur avec une augmentation acceptable des pertes de charge. D'autre part, les valeurs de PTH liées à (SiO_2 -Eau, SiO_2 -EG) sont proches de l'unité en raison de la faible augmentation du nombre de Nusselt moyen. Finalement, le nanofluide CuO-Eau présente meilleur PTH

Mots clés : Amélioration du transfert de chaleur, Convection forcée, Nanofluide, Puissance de pompage.

Abstract

In this thesis, we have numerically studied the hydrodynamic and thermal characteristics of the laminar flow of various nanofluids inside a cylindrical pipe whose lateral surface is subjected to a constant flux density. The studied nanofluids are: Al_2O_3 -Water, Al_2O_3 -EG, CuO-Water, CuO-EG, SiO_2 -Water, SiO_2 -EG. The finite volume method and the SIMPLE algorithm are used to iteratively solve the governing equations. The convection coefficient, the pressure drop and the PTH performances are presented and discussed for volume concentrations of nanoparticles varying from 0% to 8% and for Reynolds number 500 and 1500.

The results show that increasing the concentration of nanoparticles significantly improve the average convection coefficient in particular for CuO-Water, CuO-EG, Al_2O_3 -Water and Al_2O_3 -EG. Adding nanoparticles to the two base fluids water and ethylene glycol has a negative effect on pumping power, where increasing concentration leads to increased pressure drop. The highest pressure drop occurs for (CuO-Water, CuO-EG) followed by (Al_2O_3 -Water, Al_2O_3 -EG) and (SiO_2 -Water, SiO_2 -EG). The comparison between the studied fluids indicates that the values PTH of (CuO-Water, CuO-EG) and (Al_2O_3 -Water, Al_2O_3 -EG) are greater than unity, as they show a significant improvement in heat transfer rate with an acceptable increase in pressure drops. On the other hand, the PTH values related to (SiO_2 -Water, SiO_2 -EG) are close to unity due to the small increase in the average Nusselt number. Finally, the CuO-Water nanofluid exhibits better PTH.

Keywords: Heat transfer enhancement, Forced convection, Nanofluid, Pumping power.

ملخص

في هذه المذكرة ، درسنا عددياً الخصائص الهيدروديناميكية والحرارية للتدفق الصفحي للسوائل النانوية المختلفة داخل أنبوب أسطواني يتعرض سطحه الجانبي لكثافة تدفق ثابتة . السوائل النانوية المدروسة هي: $\text{SiO}_2\text{-EG}$ ، $\text{SiO}_2\text{-Water}$ ، CuO-EG ، CuO-Water ، $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-EG}$ ، $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Water}$. يتم استخدام طريقة الحجم المنتهية وخوارزمية SIMPLE لحل المعادلات الحاكمة بشكل متكرر. يتم تقديم ومناقشة معامل الحمل الحراري وانخفاض الضغط وأداء PTH لتركيزات حجم الجسيمات النانوية التي تتراوح من 0% إلى 8% ولرينولدز رقم 500 و 1500.

أظهرت النتائج أن زيادة تركيز الجسيمات النانوية يحسن بشكل كبير متوسط معامل الحمل الحراري على وجه الخصوص بالنسبة لـ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-EG}$ ، $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Water}$ ، CuO-EG ، CuO-Water . إضافة الجسيمات النانوية إلى المائعين القاعديين (EG و water)، له تأثير سلبي على قوة الضخ ، حيث تؤدي زيادة التركيز إلى زيادة انخفاض الضغط . يحدث أعلى انخفاض للضغط لـ : (CuO-EG ، CuO-Water) يليه ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-EG}$ ، $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Water}$) وأخيراً ($\text{SiO}_2\text{-EG}$ ، $\text{SiO}_2\text{-Water}$) تشير المقارنة بين السوائل المدروسة إلى أن قيم PTH لـ (CuO-EG ، CuO-Water) و ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-EG}$ ، $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Water}$) أكبر من الوحدة ، حيث تظهر تحسناً كبيراً في معدل نقل الحرارة مع زيادة مقبولة في انخفاض الضغط. من ناحية أخرى ، فإن قيم PTH المتعلقة بـ ($\text{SiO}_2\text{-EG}$ ، $\text{SiO}_2\text{-Water}$) قريبة من الوحدة بسبب الزيادة الطفيفة في متوسط عدد Nusselt. أخيراً ، يُظهر السائل النانوي CuO-Water أفضل PTH.

الكلمات المفتاحية: تعزيز نقل الحرارة ، الحمل القسري ، الموائع النانوية ، قوة الضخ.

Listes des figures

Chapitre I: Généralité et synthèse bibliographique

Figure I-1: Images TEM de quelques exemples de nanoparticules :(a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone (c) et Nano feuilles de graphène.	3
Figure I-2 : Deux approches de fabrication des nanomatériaux.	6
Figure I-3 : Procédé de synthèse de nano-fluide en une seule étape	8
Figure I-4 : Procédure schématique de la préparation de nano-fluides en deux étapes.	9
Figure I-5 : Configuration géométrique à l'étude.	14
Figure I-6 : Diagramme schématique de l'installation expérimentale	15
Figure I-7 : Vue schématique du montage expérimental	16
Figure I-8 : Vue schématique de l'appareil expérimental.	17
Figure I-9 : Schéma de la configuration géométrique à l'étude.	18
Figure I-10 : Diagramme schématique de la configuration physique et du système de coordonnées	19
Figure I-11 : Schéma du système expérimental.	20
Figure I-12 : Configuration générale du problème actuel sous forme dimensionnelle.	20
Figure I-13 : Domaine de calcul utilisé pour les investigations numériques.	21
Figure I-14 : Schéma de principe de la région numérique (partie test).	22

Chapitre II: Géométrie et modélisation mathématique

Figure II-1 : schéma descriptif du problème à étudier.	23
Figure II-2 : variation de la viscosité du nanofluide en fonction de la concentration pour (a) fluide de base : Eau et (b) fluide de base : EG.	27
Figure II-3: variation de la conductivité thermique du Al_2O_3 -Eau en fonction de la concentration.	28
Figure II-4: variation de la conductivité thermique du Al_2O_3 -EG en fonction de la concentration.	29
Figure II-5: variation de la conductivité thermique du CuO-Eau en fonction de la concentration.	29
Figure II-6: variation de la conductivité thermique du CuO-EG en fonction de la concentration.	30
Figure II-7 : variation de la conductivité thermique du SiO_2 -Eau en fonction de la concentration.	30
Figure II-8: variation de la conductivité thermique du SiO_2 -EG en fonction de la concentration.	31

Chapitre III: Discrétisation et résolutions numérique

Figure III-1 : (a) Maillage typique, (b) Maillage décalé pour U_e , (c) Maillage décalé pour V_n	39
Figure III-2 : Volume de contrôle typique bidimensionnel.	40
Figure III-3 : volume de contrôle décalé vers le haut.	42
Figure III-4 : Volume de contrôle décalé vers le droit.	47

Figure III-5 : Algorithme SIMPLE.....	54
Figure III-6 : Application ligne par ligne de la méthode TDMA	56

Chapitre IV: Résultats et Interprétations

Figure IV-1 : Variation des Résidus au cours du calcul itératif pour Al_2O_3 -Eau	59
Figure IV-2 : Variation de Résidu avec itération pour CuO-Eau	59
Figure IV-3 : Variation de Résidu avec itération pour SiO_2 – Eau.....	60
Figure IV-4 : Variation du h_{moyen} avec itération pour Al_2O_3 - Eau	60
Figure IV-5 : Variation du h_{moyen} avec itération pour Al_2O_3 – EG	61
Figure IV-6 : Comparaison entre les résultats actuels et ceux de Bianco	62
Figure IV-7: Effet de la concentration sur Rh_{moyen} cas de l'eau fluide de base (a) $Re_{fb} = 500$, (b) $Re_{fb} = 1500$	66
Figure IV-8: Effet de la concentration sur Rh_{moyen} cas de l'Ethylène Glycol fluide de base (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$	68
Figure IV-9: Effet de la concentration sur Rh_{moyen} cas de l'Eau fluide de base	70
Figure IV-10: Effet de la concentration sur la densité volumique du nanofluide cas de l'eau fluide de base	71
Figure IV-11 : Effet de la concentration sur Rh_{moyen} cas de l'Ethylène Glycol fluide de base (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$	73
Figure IV-12 : Effet de la concentration sur la densité volumique du nanofluide cas de l'Ethylène Glycol fluide de base	74
Figure IV-13 : Effet de la concentration volumique sur PTH pour l'eau fluide de base avec :	77
Figure IV-14: Effet de la concentration volumique sur PTH pour EG fluide de base:	79
Figure IV-15: Comparaison du h_{moyen} du Al_2O_3 – Eau ; Al_2O_3 – EG : (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$	80
Figure IV-16 : Comparaison du h_{moyen} du CuO – Eau et CuO – EG (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$	81
Figure IV-17: Comparaison du h_{moyen} du SiO_2 – Eau et SiO_2 – EG (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$	82
Figure IV-18 : Comparaison entre PTH du Al_2O_3 – Eau et Al_2O_3 – EG (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$	84
Figure IV-19 : Comparaison entre PTH du CuO– Eau et CuO – EG (a) $Re_{fb} = 500$; (b) $Re_{fb} = 1500$	85
Figure IV-20: Comparaison entre PTH du SiO_2 –Eau et SiO_2 –EG (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$	86

Listes des tableaux

Chapitre I: Généralité et synthèse bibliographique

Tableau I-1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base.....	5
Tableau I-2 : Conductivité thermique de divers fluides de base à 20°C	7
Tableau I-3 : Conductivité thermique de divers matériaux à 20°C	7

Chapitre II: Géométrie et modélisation mathématique

Tableau II-1 : Conditions aux limites dimensionnelle	26
Tableau II-2 : Conditions aux limites sous forme adimensionnelle.	33

Chapitre III: Discrétisation et résolutions numérique

Tableau III-1 : les différents termes de l'équation de transport adimensionnelle.....	40
Tableau III-2 : La fonction $A(Pe)$ pour différents schémas numériques.....	52

Chapitre IV: Résultats et Interprétations

Tableau IV-1: Comparaison entre $f_{analytique}$ et $f_{nuérique}$ du CuO–Eau	62
Tableau IV-2 : Nombre de Nusselt moyen et facteur de frottement du CuO-Eau à $Re_{fb}=1000$ et $\phi = 4\%$	63
Tableau IV-3 : Les propriétés thermophysiques de différentes nanoparticules et de différents fluides de base à $T= 300$ (K)	64
Tableau IV-4 : Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 500$	65
Tableau IV-5: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 1500$	65
Tableau IV-6: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 500$	67
Tableau IV-7: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 1500$	67
Tableau IV-8: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 500$	72
Tableau IV-9: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 1500$	72
Tableau IV-10: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 500$	75
Tableau IV-11 : Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 1500$	75
Tableau IV-12: Effet de la concentration sur $R_{\overline{Nu}_{nf}}$, $R_{\bar{f}}$ et PTH pour $Re_{fb} = 500$	76
Tableau IV-13 : Effet de la concentration sur $R_{\overline{Nu}_{nf}}$, $R_{\bar{f}}$ et PTH pour $Re_{fb} = 1500$	76
Tableau IV-14 : Effet de la concentration sur $R_{\overline{Nu}_{nf}}$, $R_{\bar{f}}$ et PTH pour $Re_{fb} = 500$	78
Tableau IV-15 : Effet de la concentration sur $R_{\overline{Nu}_{nf}}$, $R_{\bar{f}}$ et PTH pour $Re_{fb} = 1500$	78

Nomenclature

Symboles Latins		
L	Longueur de la conduite	[m]
D	Diamètre du tube	[m]
R	Rayon du tube	[m]
C_p	Chaleur spécifique	[J/kg. k]
H	Coefficient d'échange convectif	[w/m ² .k]
\dot{q}_p	Densité de flux thermique	[w/m ²]
T_0	Température à l'entrée du tube	[K]
P_0	Pression à l'entrée du tube	[Pa]
U_0	Vitesse à l'entrée du tube	[m/s]
P	Pression dimensionnelle	[Pa]
T	La température	[k]
T_m	Température moyenne dimensionnelle du fluide à la section transversale	[k]
U, V	Composantes de la vitesse dans les directions (oz),(or)	[m/s]
P^*	Pression adimensionnelle	[-]
θ	Température adimensionnelle	[-]
θ_m	Température moyenne adimensionnelle du fluide à la section transversale	[-]
U^*	Vitesse adimensionnelle dans la direction (oz)	[-]
V^*	Vitesse adimensionnelle dans la direction (or)	[-]
f	Coefficient des pertes de charge	[-]

Symboles Grecs		
ρ	La masse volumique	[kg/m ³]
μ	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
λ	Conductivité thermique	[w/m.k]
ϕ	Concentration (fraction) volumique	[-]
Nombres adimensionnels		
Re	Nombre de Reynolds	[-]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]
Pr	Nombre de Prandtl	[-]
abréviations		
PTH	La performance thermique	[-]
EG	L'éthylène-Glycol	
Al ₂ O ₃	L'alumine (oxyde d'aluminium)	
CuO	L'oxyde de cuivre	
SiO ₂	Le dioxyde de silicium	
Indices		
nf	Nanofluide	
fb	Fluide de base	
p	Particule	

Introduction générale

Le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies. Il se manifeste sous différentes formes (conduction, convection et rayonnement). La convection est le mode le plus répandu dans certains domaines bien spécifiques tels que le refroidissement des pièces électroniques, les échangeurs de chaleur et les radiateurs, ...etc.

L'amélioration du transfert de chaleur convectif par l'utilisation des différents nanofluides est l'objet principal de plusieurs travaux, et pour se faire, un grand nombre de chercheurs ont mené une multitude de simulations numériques et d'essais expérimentaux portant sur la description des phénomènes régissant la convection.

Dans le présent travail, nous avons étudiés la convection forcée laminaire de différents nano fluides dans une conduite cylindrique horizontal dont sa parois est chauffée avec une densité de flux constante. Notre objectif est d'améliorer le transfert de chaleur par convection avec une perte de charge raisonnable en utilisant des nanoparticules différentes. Par conséquent, cette étude nous permet de déterminer le type de nanoparticules qui donne une meilleure performance thermique.

Le contenu de cette thèse est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les propriétés physiques et thermiques des nanofluides, leur domaine d'applications, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous concluons ce chapitre par une synthèse bibliographique des différents travaux concernant le transfert de chaleur par convection forcée dans un tube circulaire en présence de nanofluides.
- Dans le second chapitre, nous avons présentés la géométrie et la modélisation du système d'équations qui régit l'écoulement et le transfert de chaleur par convection forcée laminaire dans un canal horizontal à section circulaire. On a commencé par l'ajustement des équations gouvernantes sous leurs formes générales, puis on a passé à différents traitements de ces équations basés sur les hypothèses simplificatrices. ainsi que les conditions aux limites associées. Ensuite nous avons exprimés les équations de conservation et les conditions aux limites sous forme adimensionnelles. Les expressions du coefficient de convection, la chute de pression et la performance thermique sont montrés à la fin du chapitre.
- Au troisième chapitre, nous avons introduit la méthode numérique utilisée dans la résolution (méthode des volumes finis), puis nous avons converti le système d'équations différentielles régissant l'écoulement obtenu dans le chapitre précédent de la formule différentielle à la formule algébrique en utilisant cette méthode, cette dernière nous conduit en une matrice

pentagonale qui la convertit en une matrice à trois diagonales en balayant ligne par ligne, puis en la résolvant par la méthode TDMA.

- Dans le dernier chapitre, nous illustrons les résultats de simulations numériques de notre étude. ces derniers obtenus seront discutés en présentant l'influence des paramètres hydrodynamiques et thermiques sur l'amélioration du transfert de chaleur convectif par l'ajout des nanoparticules dans les fluides de base. Les calculs sont effectués à l'aide d'un code FORTRAN, principalement basé sur l'algorithme SIMPLE .

Enfin, une conclusion générale est donnée à la fin du mémoire qui résume les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Généralité et synthèse bibliographique

I.1 Introduction

Le transfert de chaleur dans les fluides conduit à de nombreuses applications pratiques et industrielles, y compris le transport, l'approvisionnement en énergie, la climatisation et refroidissement de l'électronique...etc. L'essor actuel des nanosciences découle de l'accent mis sur les propriétés spécifiques de la matière aux dimensions nanométriques. Cela a généré de nouveaux axes de recherche dans de nombreux laboratoires et permis de développer des fluides aux propriétés originales.

Dans ce chapitre on commence par la définition des nanoparticules et des nano-fluides. Nous présentons également la généralisation aux techniques de synthèse des nanoparticules et aux méthodes de préparation des nanofluides (méthode d'une seule étape, méthode en deux étapes), les propriétés physiques et thermiques des nano fluides et leur domaine d'application, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous concluons ce chapitre par une synthèse bibliographique consacrée à une revue des différents travaux concernant le transfert de chaleur par convection forcée dans un tube circulaire en présence de nanofluides.

I.2 Les nanoparticules et les fluides porteurs

Les nanoparticules sont des agrégats de centaines à des milliers d'atomes formant des objets ayant au moins une dimension nanométrique (1 à 100 nanomètres). Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Ils ont des intérêts à la fois fondamentaux et appliqués et sont fortement étudiés aujourd'hui. En général, les nanoparticules peuvent être classées en trois grandes catégories en fonction de leur forme (Figure I-1) [1]. Ils sont généralement sphériques et cylindriques, ou tubulaires comme les nanotubes de carbone (NTC) [2].

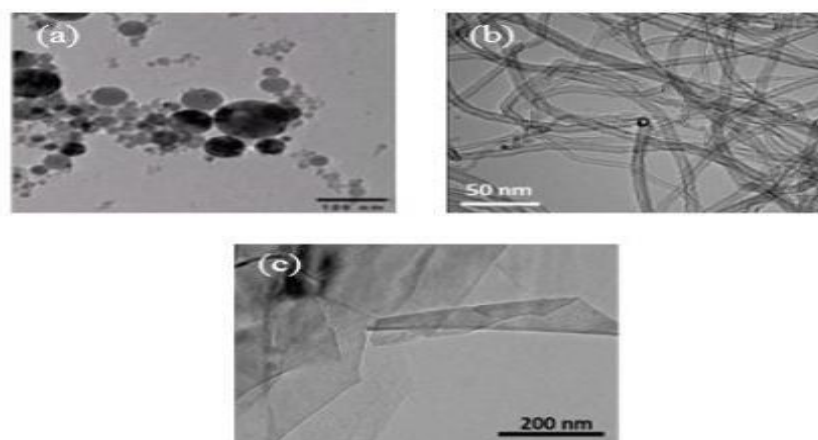


Figure I-1: Images TEM de quelques exemples de nanoparticules : (a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone (c) et Nano feuilles de graphène.

Les nanoparticules les plus utilisées sont classées dans trois grandes familles, à savoir :

- Les nanoparticules d'oxydes métalliques :
 - L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).
 - L'oxyde de cuivre (CuO).
 - L'oxyde de silicium (SiO_2).
 - L'oxyde de Titantium (TiO_2).
- Les nanoparticules métalliques :
 - L'aluminium (Al).
 - Le cuivre (Cu).
 - L'or (Au).
 - L'argent (Ag).
- Les nanoparticules non métalliques :
 - Les nanotubes de carbone (CNT).
 - Le diamant (C).

Les liquides de base les plus utilisés sont :

- L'eau.
- L'éthylène glycol (EG).
- Les huiles.
- Les fluides frigorigènes (R12, R22, etc.).[2,3]

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 tous phénomènes d'agréations, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule.[4,5]

Le tableau I-1 regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparés par différents groupes de recherche.[4,5]

Tableau I-1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base

	Acétone	Eau	Éthylène glycol	Huile	Toluène	Décène
Ag		x		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				

I.3 Généralité sur les techniques de synthèse des nanoparticules

Depuis ces dix dernières années, de nombreuses techniques ont été développées pour fabriquer des nanomatériaux. Comment choisir une technique appropriée pour fabriquer un nanomatériau de qualité contrôlée et quels sont les avantages et les inconvénients de ces techniques devient un grand problème quand on produit des nanoparticules à l'échelle industrielle. Il y a une règle évidente en raison du fort rapport surface sur volume induit par la taille nanométrique, auquel cas l'interaction entre les atomes de surface et le milieu extérieur ne peut pas être négligeable. Ainsi bien contrôler la taille de particule et maîtriser l'interface des particules devient un critère important quand on choisit la technique de fabrication. Selon les conditions de synthèse, il peut être divisé en méthode en phase gazeuse, méthode en phase liquide et méthode en phase solide. Et selon la méthode de synthèse : méthode physique, méthode physico-chimique et méthode chimique. En résumé, il existe deux approches directionnelles : "bottom-up" et "top-down" L'approche "top-down" est faite à partir de matériaux en vrac avec des dimensions supérieures à un micron,

tandis que l'approche "bottom-up" est faite d'atomes ou de molécules à travers différents processus pour former des nanoparticules :

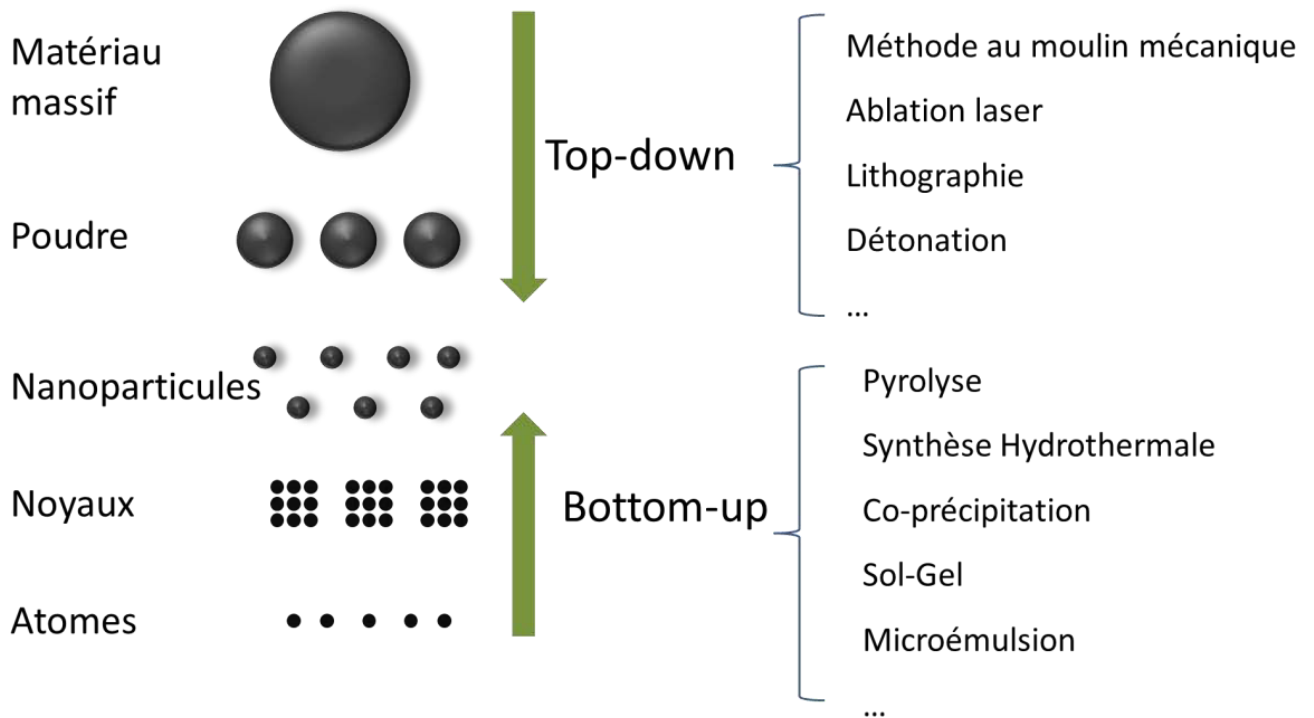


Figure I-2 : Deux approches de fabrication des nanomatériaux.

L'approche « top-down » a permis d'obtenir des nanomatériaux en grande quantité, mais la qualité des produits est souvent mal maîtrisée (distribution granulométrique large, défauts de structure...). L'approche « bottom-up » est plus étudiée en laboratoire et permet un meilleur contrôle de la qualité des nanomatériaux (répartition granulométrique, morphologie, pureté), mais la faiblesse par rapport à l'approche "top-down" est générale Production en faible quantité.[6]

I.4 Définition des nanofluides

Les nano fluides sont des solutions colloïdales constituées de particules de taille nanométrique (moins de 100 nm de diamètre) (appelées nanoparticules) en suspension dans un liquide porteur. Ce type de solution suscite un grand intérêt depuis la découverte de ses propriétés thermiques exceptionnelles. En fait, les fluides de base couramment utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont une très faible conductivité thermique (Tableau I-2), ce qui limite leur capacité à transférer la chaleur. Ensuite, l'idée est d'insérer des nanoparticules à très haute conductivité thermique (Tableau I-3) dans le liquide de base afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi d'améliorer ses performances thermiques [5,7].

Tableau I-2 : Conductivité thermique de divers fluides de base à 20°C

Fluides de base	Conductivité thermique λ (W/m.K)
Eau	0.599
50% eau + 50% éthylène glycol	0.41
Ethylène glycol	0.25
huile de moteur	0.14

Tableau I-3 : Conductivité thermique de divers matériaux à 20°C

Matériaux	Conductivité thermique λ (W/m.K)
Nanotube de carbone	3000-6000
Diamant	1000-2600
Cuivre (métal pur)	401
Nickel (métal pur)	237
Silicone (non métallique)	148
Alumine (Al_2O_3)	40

I.5 Méthodes de préparation des nanofluides

La synthèse des nanoparticules est la tâche principale de la préparation du nanofluide. L'uniformité de la dispersion des particules dépend principalement de la méthode de préparation utilisée et peut avoir un effet significatif sur les propriétés thermophysiques du nanofluide. Si deux nanofluides similaires devaient être préparés en utilisant des méthodes de préparation, leurs propriétés thermophysiques et la tendance à l'agglomération est plus susceptible de varier de chaque autre. En effet, les nanofluides ne sont pas simplement formés à partir d'un mélange solide-liquide mais nécessite des conditions spéciales pour être présents dans la suspension tels que l'homogénéité physique et stabilité chimique, durabilité et dispersibilité. Il existe principalement deux techniques utilisées pour fabriquer des nanofluides, à savoir l'approche ascendante connue sous le nom de méthode en une étape et l'approche descendante identifiée comme la méthode en deux étapes.[8]

I.5.1 Méthode en une seule étape

Est basée sur la méthode d'évaporation sous vide sur un substrat d'huile courante (VEROS), qui a été développée à l'origine par Yatsuya et al.[8] pour produire des nanoparticules métalliques. Le principe de base de la méthode VEROS est qu'un faisceau d'électrons vaporisé du métal pur sous vide, puis des particules métalliques nanométriques se condensent sur un substrat rotatif recouvert d'huile se déplaçant radialement vers l'extérieur. La suspension de nanoparticules avant séchage est un nano-fluide. Désormais, la méthode VEROS a été modifiée par Wagener et al.[9] Avec l'emploi de la pulvérisation magnétron haute pression et amélioré par Eastman et al. [10] avec condensation directe de nanoparticules métalliques sur de l'éthylène glycol liquide. Egalement les autres procédés en une seule étape tels que la réduction chimique sous irradiation micro-onde. [11] et le système de synthèse de nanoparticules à arc submergé sous vide (SANSS) [12] s'était développée au cours de la dernière décennie. Les avantages de la méthode en une étape sont des agglomérations minimales de nanoparticules et une excellente stabilité, mais seuls les liquides à faible pression de vapeur conviennent au fluide de base.

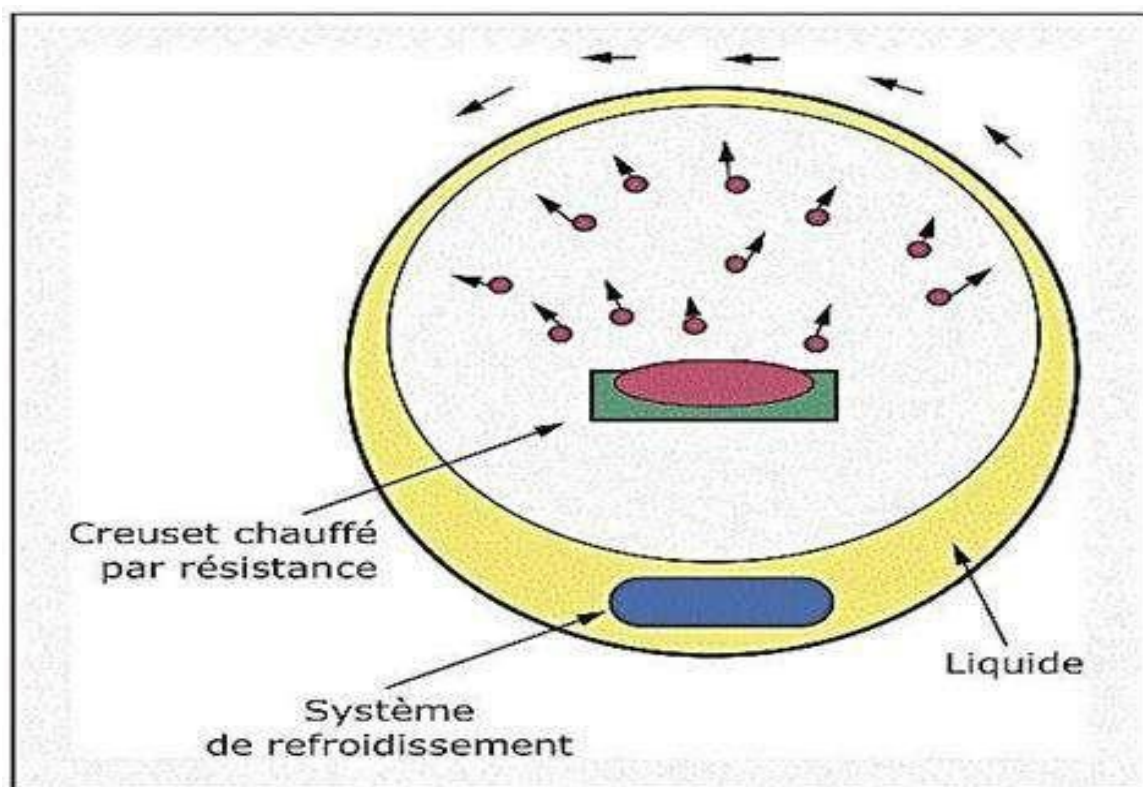


Figure I-3 : Procédé de synthèse de nano-fluide en une seule étape .[10]

I.5.2 Méthode en deux étapes

La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules, et dans la deuxième étape, les nanoparticules sont dispersées dans un fluide de base. La figure I.4 montre un exemple de la procédure schématique de l'approche en deux étapes utilisée pour synthétiser les nanoparticules-fluide, pour permettre une parfaite dispersion. Parmi les équipements utilisés pour disperser les nanoparticules dans le liquide de base figurent les bains à ultrasons, les agitateurs magnétiques, les mélangeurs à cisaillement élevé. De plus, pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre particules, les forces de répulsion électrostatiques sont utilisées en chargeant la surface des particules à travers l'ajustement du pH.[13,14]

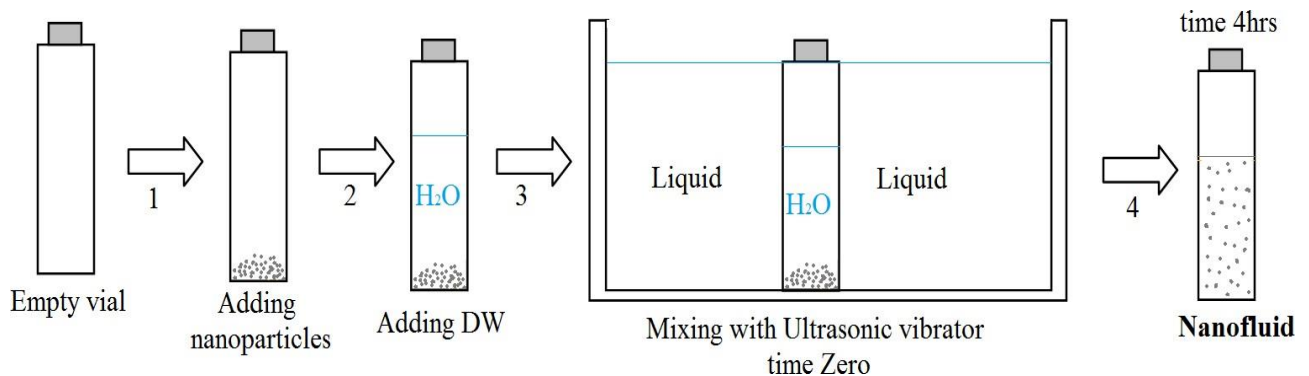


Figure I-4 : Procédure schématique de la préparation de nano-fluides en deux étapes.

I.6 Propriétés thermo-physiques des nanofluides

L'incorporation de nanoparticules dans le fluide de base entraîne des changements dans les propriétés thermo-physiques telles que la conductivité thermique, la viscosité, la densité et la chaleur spécifique affectant le transfert de chaleur par convection, qui peut être profondément modifiée par l'ajout de nanoparticules, et un grand nombre de paramètres peuvent avoir des tolérances pour de telles Les influences non négligeables (matériau, taille, rapport d'aspect, concentration de particules en suspension, conductivité du fluide de base, température du milieu) sont quelques-uns des principaux facteurs qui modifient significativement l'écart Les propriétés thermo-physiques des différents fluides de base et des nanoparticules et la facteur d'influence de la conductivité thermique.[15,16]

I.6.1 Masse volumique

En déterminant la densité volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (une bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) à partir de la fraction volumique ϕ à une température T donnée, on revient à la définition de la masse volumique de ce mélange. Dans le cas des mélanges, la densité volumique est donnée par la relation :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_s}{v_f + v_s} = \frac{\rho_f v_f + \rho_s v_s}{v_f + v_s} \quad (I.1)$$

La concentration volumique (fraction volumique) des nanoparticules, notée \emptyset désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide) :

$$\emptyset = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume totale du nanofluide}} = \frac{v_s}{v_f + v_s} \quad (I.2)$$

On en déduit alors la densité du nanofluide

$$\rho_{nf} = (1 - \emptyset)\rho_f + \emptyset\rho_s \quad (I.3)$$

tel que :

ρ_{nf} : la densité volumique du nanofluide

ρ_f : la masse volumique du fluide de base

ρ_s : la masse volumique des nano particules solides

I.6.2 La viscosité dynamique

Il existe différents modèles de viscosité dynamique des nanofluides, tels que :

- **Modèle d'Einstein** [17] :

Pour les mélanges de suspensions diluées contenant de fines particules sphériques et rigides :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\emptyset) \quad (I.4)$$

- **Modèle de Brinkman** [18] :

Étendre la formule d'Einstein pour couvrir une large gamme de concentrations volume.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \emptyset)^{2.5}} \quad (I.5)$$

- **Modèle de Batchelor** [19] :

montre que la viscosité n'est pas seulement une fonction linéaire de \emptyset , comme le montre la relation d'Einstein, mais une fonction non linéaire de \emptyset

$$\mu_{nf} = \mu_f(2.6\emptyset^2 + 2.5\emptyset + 1) \quad (I.6)$$

D'autres relations ont été proposées dans la littérature, limitées à des applications spécifiques, par exemple Maiga et al. [20], à partir du résultat Les mesures suggèrent les corrélations suivantes :

$$\mu_{nf} = \mu_f(123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (I.7)$$

Pack and Cho [21] ont proposé, quant à eux une corrélation pour les nanoparticules Al_2O_3 dispersés dans l'eau donnée par :

$$\mu_{nf} = \mu_f(533.9\phi^2 + 39.11\phi + 1) \quad (I.8)$$

I.6.3 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène. La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de matière de 1 K au cours du processus de transformation considéré. La chaleur spécifique d'un nanofluide peut être déterminée à l'aide de l'un des deux modèles suivants :

- Modèle utilisé par Park et Cho [21] et al :

$$(C_p)_{nf} = (1 - \phi)(C_p)_f + \phi(C_p)_s \quad (I.9)$$

- Modèle utilisé par Xuan et Roetzel [22] et al :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (I.10)$$

I.6.4 La conductivité thermique

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, principalement dans notre étude parce qu'elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur. En plus de changer avec la température, la conductivité thermique des nanofluides varie également avec la fraction volumique .La conductivité thermique des nanofluides est calculée selon les modèles suivants :

- **Modèle de Maxwell (1873) :**

Maxwell a proposé son modèle pour calculer la conductivité thermique des nanofluides à partir de la fraction volumique des nanofluides, mais ce modèle n'est valable que dans le cas des nano fluides contenant des nanoparticules sphériques, et ce cas peut être considéré comme un point négative

pour le modèle, donc pour l'utilisation de ce modèle, nous ne doivent considérer que les nanoparticules sphériques.

Le modèle de Maxwell est donné par [23] :

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_{fb} - 2\phi(\lambda_{fb} - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_{fb} + \phi(\lambda_{fb} - \lambda_p)} \lambda_{fb} \quad (\text{I.11})$$

- **Modèle de Hamilton et Crosser (1962) :**

Le modèle de Hamilton et Crosser est établi pour résoudre la limite du modèle de Maxwell. Comme ce dernier n'est valable que dans le cas de particules sphériques, le modèle est une description inefficace des phénomènes étudiés, raison pour laquelle le modèle de Hamilton et Crosser a été développé pour rendre le calcul de la conductivité thermique plus efficace.

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante [23] :

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_p + (n-1)\lambda_{fb} - (n-1)(\lambda_{fb} - \lambda_p)\phi}{\lambda_p + (n-1)\lambda_{fb} + (\lambda_{fb} - \lambda_p)\phi} \lambda_{fb} \quad (\text{I.12})$$

Où (n) est un facteur de forme donnée par : $n = \frac{3}{\psi}$

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

Pour ($\psi = 1$) (particules sphériques) le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell.

$$\lambda_{nf} = (4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1)\lambda_{fb} \quad (\text{I.13})$$

$$\lambda_{nf} = (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1)\lambda_{fb} \quad (\text{I.14})$$

Les équations (I.13) et (I.14) ont été obtenus en utilisant le modèle bien connu proposé par Hamilton et Crosser [24].

I.7 Domaines d'application des nanofluides

Les nanofluides préparés à partir de différentes combinaisons de nanoparticules et de fluide de base présentent diverses propriétés telles que conductivité thermique extraordinaire, transfert de masse dense, Absorption efficace de la chaleur, excellente performance de lubrification propriétés

magnétiques, activités antibactériennes et de délivrance de médicaments, propriétés optiques accordables, les nanofluides sont utilisés dans plusieurs industries telles que [25,26] :

- Energie solaire et de dessalement
- Refroidissement
- Puces électroniques et le refroidissement des serveurs
- Refroidissement automobile
- L'aérospatiale et le refroidissement de la défense
- Echangeurs de chaleur
- Biomédicales
- L'industrie de l'énergie des procédés mécaniques
- Scellage magnétique
- L'extraction d'énergie géothermique.

I.8 Avantages et inconvénients des nanofluides [27]

I.8.1 Avantages des nanofluides

- Grande surface de transfert de chaleur entre les particules et le fluide.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominance du mouvement Brownien des particules.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux boues conventionnelles, favorisant ainsi la minimisation du système.

I.8.2 Inconvénients des nanofluides

- Augmenter la perte de charge et la puissance de pompage.
- Plus la viscosité est élevée, plus la chaleur spécifique est faible.
- Coût élevé des nano fluides.
- Difficulté dans le processus de fabrication.

I.9 Synthèse bibliographique

L'étude du transfert de chaleur par convection est un domaine de recherche depuis des décennies. Il existe un grand nombre de publications scientifiques consacrées à la convection forcée dans les tubes. Mais peu d'entre eux ont travaillé sur les nano fluides. La plupart des études sont généralement menées avec de l'eau, de l'huile ou de l'air comme fluide de base. Il est bien connu que le transport convectif peut être augmenté de manière significative en modifiant la configuration de l'écoulement ou en augmentant la surface d'échange entre la paroi et le fluide.

V. Bianco et al [28] ont utilisé un nanofluide (Eau + Al_2O_3) pour mesurer le coefficient d'échange de la convection laminaire forcée dans un tube circulaire soumis à un flux de convection constant et uniforme au niveau du plan de paroi, étudié numériquement. Ils ont utilisé un monophasique et un biphasique (modèle de particules discrètes) avec des propriétés constantes ou dépendantes de la température. L'étude a été menée pour des particules d'une taille de 100 nanomètres. Ils ont constaté que la différence maximale du coefficient moyen de transfert de chaleur entre les résultats du modèle monophasé et du modèle biphasique est d'environ 11 %. Le coefficient de transfert thermique des nano fluides est supérieur à celui du fluide de base. L'amélioration du transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la concentration granulométrique, mais s'accompagne d'une augmentation des valeurs de contrainte de cisaillement de la paroi. Des coefficients de transfert de chaleur plus élevés et des contraintes de cisaillement plus faibles ont été détectés dans le cas des modèles dépendant de la température. Le transfert de chaleur s'améliore toujours, avec une augmentation du nombre de Reynolds, mais il s'accompagne également d'une augmentation de la contrainte de cisaillement.

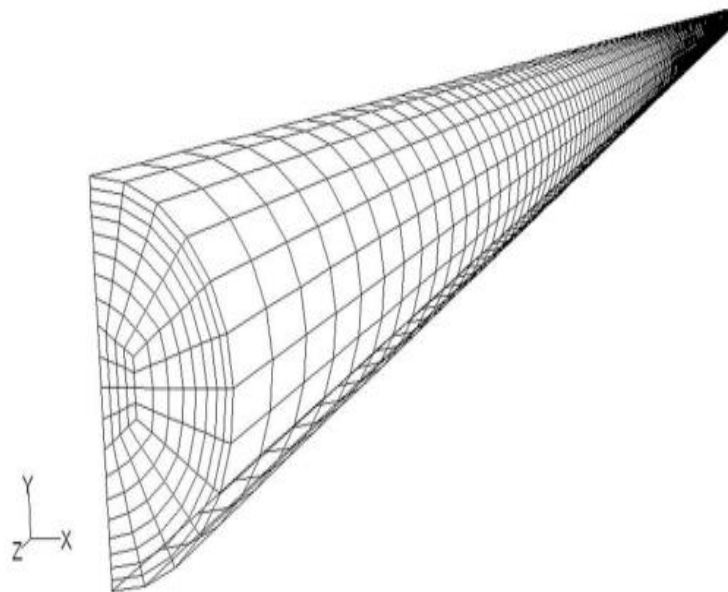


Figure I-5 : Configuration géométrique à l'étude

L. Syam Sundar et K.V. Sharma [29] , ont étudié expérimentalement les propriétés de transfert de chaleur laminaire thermique entièrement développées et le facteur de frottement pour différentes concentrations de nanofluide Al_2O_3 dans un tube simple et équipé de différents rapports d'emballage d'inserts en bande torsadée. Ils ont réalisé les expériences en utilisant de l'eau et des nanofluides dans la plage de $700 < \text{Re} < 2200$, une concentration de taille de particules de $0 < \phi < 0.5\%$, et des rapports d'enroulement de ruban torsadé de $0 < H / D < 15$. Ils ont remarqué

un coefficient de transfert de chaleur plus élevé des nano fluides par rapport à l'eau et ont observé une amélioration supplémentaire du transfert de chaleur avec l'inclusion de la bande torsadée. La perte de charge augmente légèrement avec les ajouts, mais est relativement négligeable. Ils ont développé une équation de régression généralisée basée sur des données expérimentales pour estimer le nombre de Nusselt et le facteur de friction de l'eau et des nano fluides dans un tube régulier et une bande torsadée.

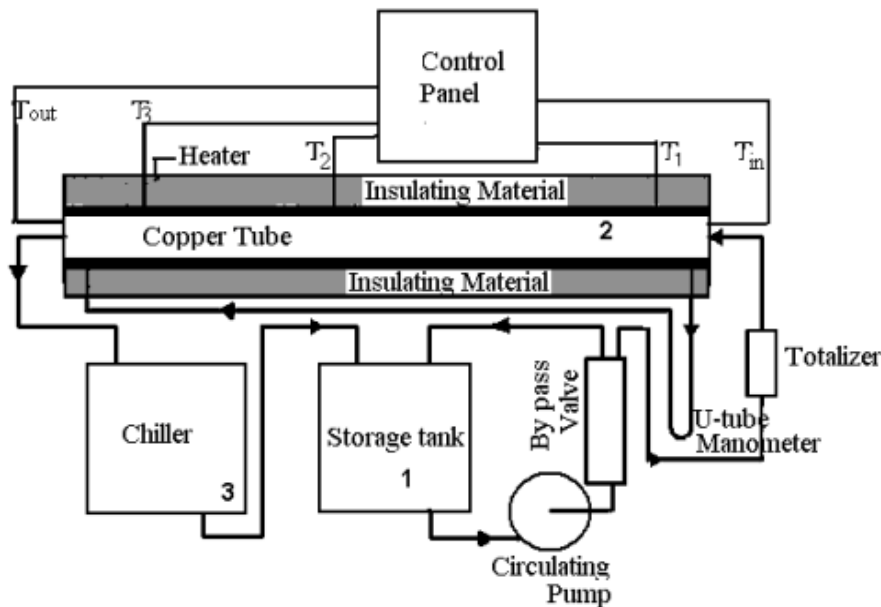


Figure I-6 : Diagramme schématique de l'installation expérimentale

Dans l'étude réalisée par **H. Al-Mohammadi et al** [30], dans lequel ils ont examiné expérimentalement le coefficient de transfert de chaleur par convection et la chute de pression d' $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Eau}$ nanofluide dans un système à flux laminaire dans des conditions d'écoulement de convection constantes à l'intérieur d'un tube circulaire, où ils ont utilisé Al_2O_3 / l'eau nano fluide à des concentrations volumétriques de 0,5 % et 1 % avec de la matière particulaire. Des nanoparticules de 15 nm de diamètre comme fluide de travail. Ils ont étudié l'effet de différentes concentrations granulométriques sur le coefficient de transfert thermique et le coefficient de frottement, et ont confirmé avec les résultats obtenus que l'augmentation de la concentration granulométrique conduit à une amélioration du coefficient de transfert thermique convectif. Leurs mesures ont également montré que le coefficient de transfert de chaleur moyen s'améliorait d'environ 11 à 20 % à une concentration volumétrique de 0,5 % et augmentait d'environ 16 à 27 % à une concentration volumétrique de 1 % par rapport à l'eau distillée. D'après les résultats, le rapport moyen (f_{nf}/f_{fb}) était d'environ 1,10 pour une concentration volumique de 0,5 %. Par conséquent, il n'y a pas d'augmentation significative du facteur de friction des nanofluides.

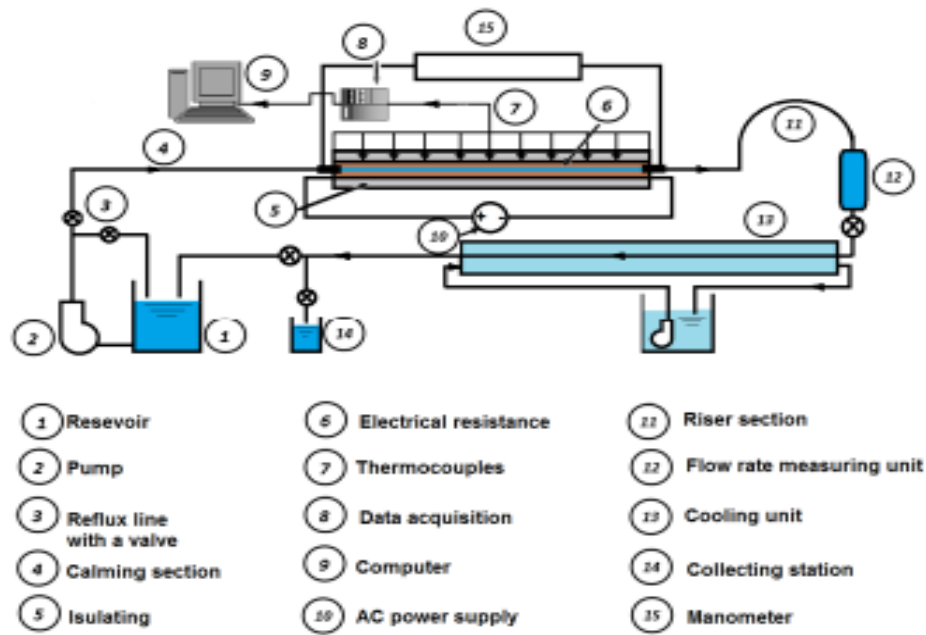


Figure I-7 : Vue schématique du montage expérimental

Leyuan Yu et Dong Liu [31] ont préparé une étude expérimentale sur la convection laminaire forcée de nanofluides ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Eau}$) et ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{polyalphaoléfine}$) à travers un micro canal circulaire est rapportée. À l'aide de données expérimentales, l'efficacité thermique des nanofluides est évaluée à l'aide de différentes formes de mérite sous trois pressions d'écoulement typiques, telles que : 1) débit constant ; 2) un nombre de Reynolds constant ; et 3) puissance de pompe continue. Bien que les nanofluides améliorent le transfert de chaleur par convection, leurs résultats montrent que leur efficacité thermique est négativement compensée par les effets combinés d'une augmentation de la viscosité et d'une diminution de la chaleur spécifique. En particulier, si un système de refroidissement liquide convectif est contraint à la condition de puissance de pompe constante, il n'y a presque aucune différence dans l'efficacité globale entre les nanofluides et le fluide central lorsque les performances thermiques et hydrodynamiques sont prises en compte.

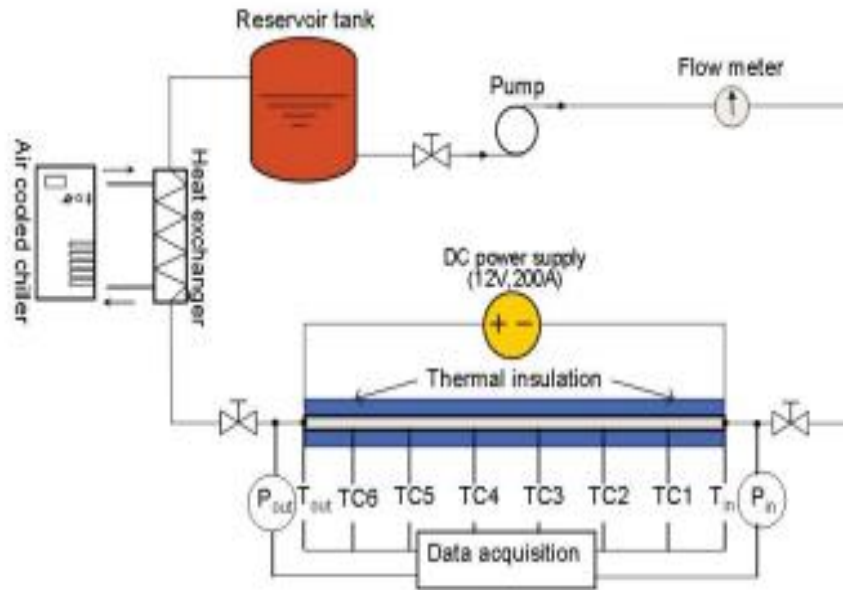


Figure I-8 : Vue schématique de l'appareil expérimental.

Cette étude est menée par **I. Behroyan et al** [32], présente une comparaison complète entre divers modèles d'approches numériques/CFD pour étudier une étude de cas du flux de convection forcée laminaire de nanofluide $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ avec 1,6 % de fraction volumique et $\text{Re} = 1600$ dans un tube chauffé. L'écart quantitatif du nombre de Nusselt pour l'étude de cas est rapporté à l'aide de quatre types de modèles monophasés, y compris des modèles monophasés newtoniens et non newtoniens, évaluant l'effet de deux modèles de dispersion thermique différents basés sur la vitesse et gradient de température quatre types de modèles à deux phases, dont des modèles eulériens, mixtes (types 1 et 2) et à phases discrètes. Selon les résultats, le modèle monophasé non newtonien prédit un nombre de Nusselt plus précis que le modèle monophasé newtonien, avec des erreurs moyennes de 5,98 % et 4,84 % respectivement. En intégrant les modèles de dispersion en approche monophasée non newtonienne, l'erreur moyenne diminue à 2,07 % pour les modèles de dispersion de type 1 et 3,33 %, pour les modèles de dispersion de type 2. Concernant les modèles biphasés, eulériens, mélange type 1, mélange type 2 et le modèle à phase discrète montrent une erreur moyenne de 2,79 %, 17,57 %, 5,87 % et 2,73 % respectivement. La répétabilité et la cohérence des résultats de certains des modèles les plus précis ont été vérifiées pour une fraction volumique de nanoparticules de 0 à 2 % et également pour Re allant de 745 à 1600. Cette étude présente des avantages lorsqu'il s'agit de sélectionner un modèle pour une étude de cas de type similaire.

N. Purohit et al [33] ont précédemment réalisé une étude numérique du transfert de chaleur par convection forcée dans un tube circulaire est présentée, incorporant la génération d'entropie et l'analyse des contraintes de cisaillement des parois. Ils ont utilisé trois nanofluides différents, ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Eau}$), ($\text{ZrO}_2 + \text{Eau}$) et ($\text{TiO}_2 + \text{Eau}$), dans des conditions de limite de flux de chaleur constantes en utilisant une approche monophasique. Ils ont comparé les performances des nanofluides avec le fluide de base en maintenant constants le nombre de Reynolds, le débit massique et les paramètres de décharge pour différentes fractions de taille des nanoparticules. Ils ont pris en compte la dépendance non linéaire des propriétés thermophysiques du fluide de base avec la température dans cette étude. Pour les mêmes critères de comparaison du nombre de Reynolds, ils ont constaté que le coefficient de transfert thermique des nano fluides est beaucoup plus élevé par rapport au fluide de base. Cependant, pour le débit massique et les mêmes paramètres de comparaison de charge, ils ont trouvé que l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur était insignifiante. Ils ont également constaté que le facteur de performance était médiocre pour les nano fluides, car il diminue avec l'augmentation de la charge isotrope. Cependant, c'est presque le même pour toutes sortes de comparaisons. La génération d'entropie des nano fluides diminue sous la même comparaison du nombre de Reynolds, mais la diminution s'avère négligeable pour les deux autres règles de comparaison. La contrainte de cisaillement de la paroi augmente avec l'augmentation de la charge de particules pour les trois comparaisons.

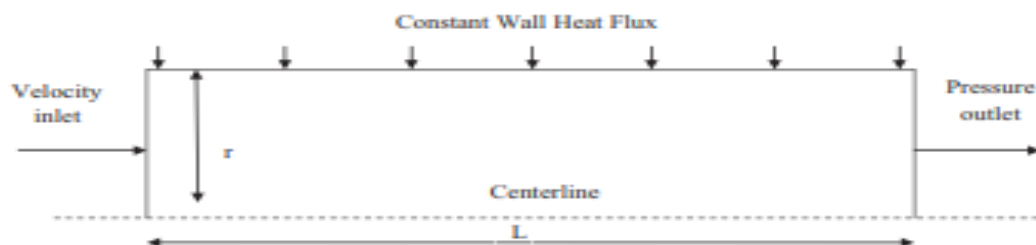


Figure I-9 : Schéma de la configuration géométrique à l'étude.

Dans cet article réalisé par **C.J. Ho et al** [34], ils y ont étudié les effets des propriétés thermophysiques dépendant de la température sur l'efficacité de la convection forcée laminaire de nanofluides Al_2O_3 -eau dans un tube circulaire soumis à un flux de chaleur constant sont étudiés numériquement. L'étude numérique est complétée par une analyse d'échelle basée sur l'équation de l'énergie intégrale. L'analyse est effectuée pour différentes températures d'entrée et en considérant deux cas de propriétés, notamment (i) les propriétés constantes et (ii) les propriétés dépendant de la température. Les résultats simulés sont présentés pour trois concentrations différentes de nanofluides, à savoir 0 %, 5 % et 9 %, des débits volumiques compris entre 24 et 180 cm^3/min qui correspondent à des nombres de Reynolds compris entre 120 et 2 000, des flux

de chaleur compris entre $5,51 \cdot 10^2$ et $1,23 \cdot 10^4$ (W/m^2), et diverses températures d'entrée dans la plage de 25 à 50 °C. Les effets de diverses températures d'entrée de nanofluides et de différents modèles thermophysiques sur les nombres de Nusselt locaux et moyens dans le tube ont été étudiés en détail. On constate qu'avec une augmentation à la fois de la concentration en nanofluide et de l'augmentation de la température dans la section chauffée, les effets de la température d'entrée et des propriétés thermophysiques sur le nombre de Nusselt sont plus prononcés.

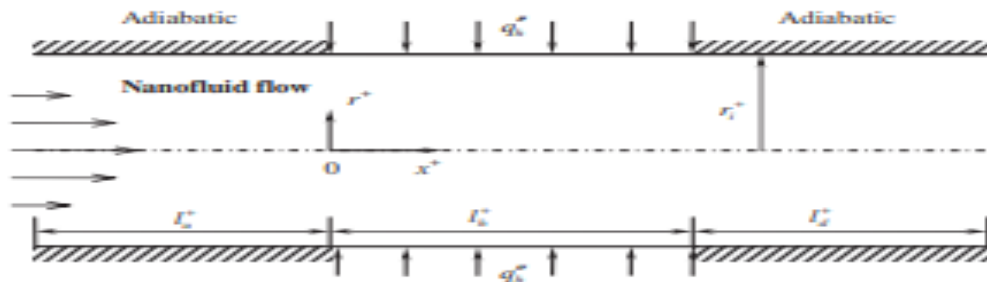


Figure I-10 : Diagramme schématisé de la configuration physique et du système de coordonnées

B. Ilhan, H. Ertürk [35], les nanofluides contenant du nitrure de bore hexagonal (hBN) récemment développés sont une classe de matériaux relativement nouvelle, et l'augmentation de leur conductivité thermique par rapport au fluide de base est relativement supérieure à celle de la viscosité. Cette étude se concentre sur les caractéristiques de transfert de chaleur par convection des nanofluides hBN-eau, et la convection forcée laminaire à développement thermique des nanofluides hBN dans un tuyau de cuivre horizontal, soumis à une condition aux limites de flux de chaleur constant, est étudiée expérimentalement. Les nanofluides hBN-eau, avec une plage de concentration en volume de particules de 0,1 à 1%, sont considérés pour une plage de nombres de Reynolds de 800 à 1700. Les propriétés thermophysiques mesurées des nanofluides à base d'eau hBN sont utilisées pour prédire le comportement de transfert de chaleur sur la base de mesures. On observe que l'amélioration du coefficient de transfert de chaleur par convection des nanofluides hBN-eau est proportionnelle à l'amélioration de la conductivité thermique observée. Par conséquent, il n'y a pas d'augmentation anormale du nombre de Nusselt mesuré, et les valeurs mesurées sont en bon accord avec les prédictions des corrélations d'écoulement à développement thermique laminaire standard.

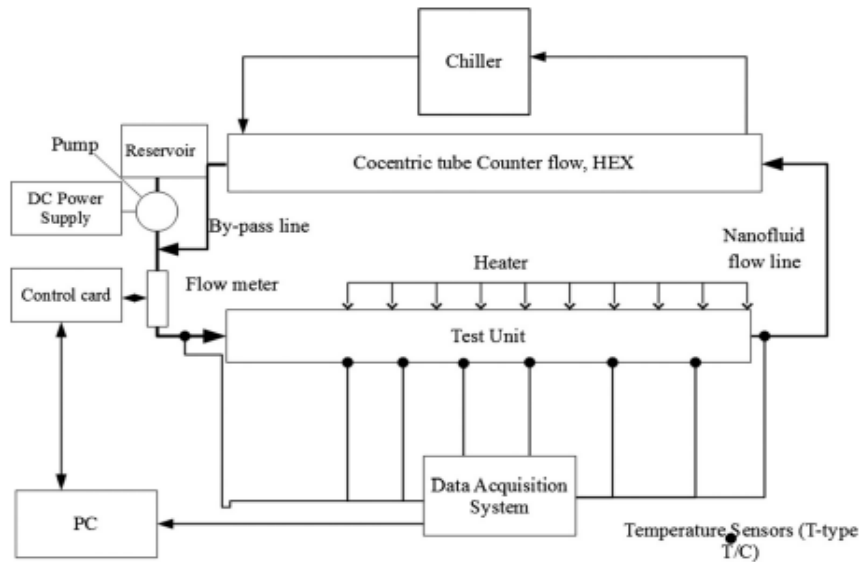


Figure I-11 : Schéma du système expérimental.

L'hydrodynamique et le transfert de chaleur à travers la région d'entrée du tube isotherme ont été étudiés numériquement en présence de nanoparticules par **Ahmed M. Teamah et al** [36]. L'étude a été réalisée par un ordinateur home-code. Ce code est basé sur la méthode des volumes finis. Les effets du nombre de Reynolds et de la concentration de nanoparticules sur l'épaisseur de la couche limite visqueuse, la contrainte de cisaillement, le coefficient de frottement, l'épaisseur de la couche limite thermique et le nombre de Nusselt ont été présentés. Au cours de l'étude, le nombre de Reynolds varie de 500 à 2000 et la concentration de nanoparticules varie de 0 à 10 %. Trois nanoparticules différentes Al_2O_3 , TiO_2 et Cu ont été étudiées. Alors que le nombre de Prandtl pour le fluide de base a été maintenu constant à 7 se référant à l'eau. En général, les résultats ont montré une amélioration du nombre de Nusselt en ajoutant des nanoparticules, en particulier en utilisant des nanoparticules de Cu. L'augmentation maximale du nombre de Nusselt a atteint 20,5 % à $Re = 1000$, concentration en nanoparticules = 10 % pour les nanoparticules de cuivre. Le coefficient de frottement moyen et le nombre de Nusselt moyen étaient corrélés en termes de nombre de Reynolds, de concentration de nanoparticules, de longueur d'entrée sans dimension et de type de nanoparticules. Certains des résultats ont été comparés aux données publiées, un bon accord a été trouvé.

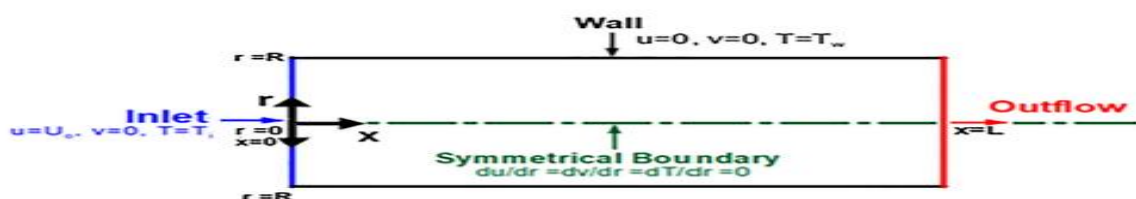


Figure I-12 : Configuration générale du problème actuel sous forme dimensionnelle.

M. Sajjad et al [37] , dans leur étude ils ont présenté une analyse numérique du transfert de chaleur par convection forcée de nanofeuilles d'oxyde de graphène en suspension dans un mélange d'eau et d'éthylène glycol dans un système à flux laminaire utilisant une approche monophasique dans un tube horizontal circulaire dans des conditions de flux de convection constante. La longueur et le diamètre du champ de simulation pour l'investigation numérique sont respectivement de 2 μm et 4,5 mm. Ils ont étudié l'effet de différentes conditions d'écoulement et concentrations de poids sur le coefficient de transfert de chaleur localisé, le coefficient de transfert de chaleur moyen, le facteur de frottement, la chute de pression et le facteur de performance thermique des nanofluides. La plage de concentration pondérale et de nombre de Reynolds utilisée dans cette étude variait de 0,01 à 0,1 % en poids et de 400 à 2 000, respectivement, et le pourcentage maximal d'amélioration du coefficient de transfert de chaleur moyen était de 13,04 % pour la concentration pondérale et le nombre de Reynolds de 0,1. % en poids et 2000, respectivement. Le taux maximal de chute de pression était de 2,12 au nombre de Reynolds et à une concentration de 400, 0,10 % en poids. Ils ont constaté que l'amélioration du coefficient de transfert de chaleur était inférieure à la chute de pression accrue correspondante pour toutes les concentrations pondérales. Le facteur de performance thermique des nanofluides est inférieur à un pour toutes les concentrations pondérales et les nanofluides n'ont montré aucun avantage par rapport au fluide de base en tant que fluide caloporteur dans un régime d'écoulement laminaire.

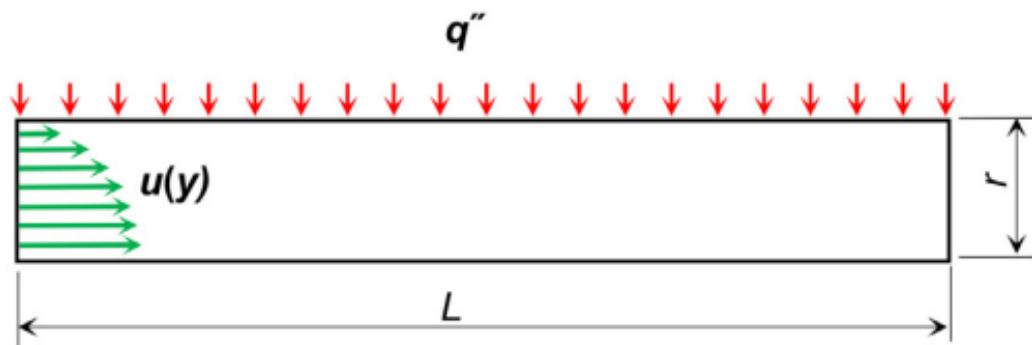


Figure I-13 : Domaine de calcul utilisé pour les investigations numériques.

W. Ajeeb et al [38] ,le processus de transfert de chaleur dans les micro/mini-échelles devient un besoin urgent pour de nombreuses applications où la taille et le poids sont des contraintes sévères telles que l'électronique. Cependant, cette dernière a conduit à développer de nouveaux fluides thermiques, dits nanofluides, aux propriétés thermophysiques renforcées pour couvrir les besoins élevés de dissipation thermique dus à la miniaturisation des dispositifs. Dans ce travail, un modèle de calcul validé est utilisé pour établir des lignes directrices pour l'échangeur de chaleur compact à microcanaux, ainsi que pour aider à l'adaptation des propriétés des nanofluides. Une

approche de la méthode des volumes finis (FVM) est construite en considérant les conditions d'écoulement de fluide laminaire dans un microcanal circulaire. Ce dernier est utilisé et validé par rapport aux données expérimentales disponibles, et l'influence des propriétés thermophysiques dépendant de la température et du comportement non newtonien des nanofluides MWCNTs (Multi-walled carbon nanotubes) est considérée. Les résultats montrent que les nanofluides MWCNT améliorent les performances de transfert de chaleur du micro-échangeur de chaleur jusqu'à 33 %. De plus, des conditions de fonctionnement particulières améliorent l'efficacité énergétique du système, principalement à proximité d'un nombre de Reynolds (Re) égal à 1000, en tenant compte à la fois des performances de transfert de chaleur et de la perte de charge. De plus, une corrélation du nombre de Nusselt moyen est proposée pour estimer les performances de transfert de chaleur des nanofluides dans les microcanaux.

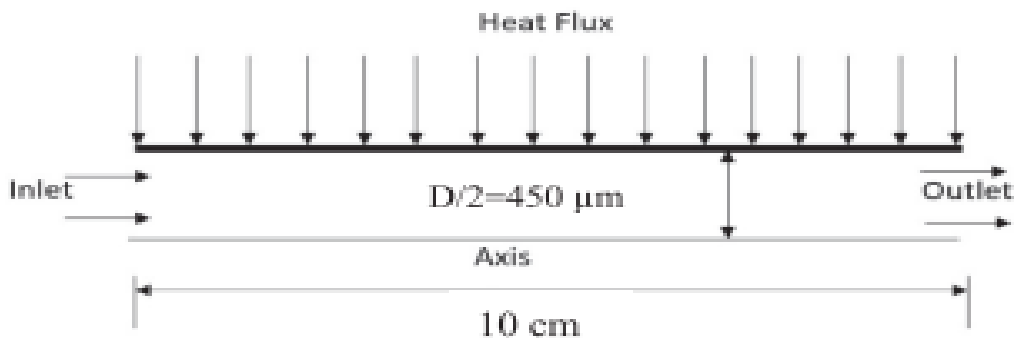


Figure I-14 : Schéma de principe de la région numérique (partie test).

Chapitre 1

Géométrie et modélisation mathématique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la géométrie et la modélisation de système d'équations qui régit l'écoulement et le transfert de chaleur par convection forcé laminaire dans un canal horizontal à section circulaire. On commence par la présentation des équations sous leurs formes générales, puis on passe à différents traitements de ces équations basés sur les hypothèses simplificatrices, ainsi que les conditions aux limites associées. Ensuite nous exprimons les équations de conservation et les conditions aux limites sous forme adimensionnelles. Enfin, nous avons fait une loi de performance thermique.

II.2 Géométrie du problème étudié

Considérons un nanofluide newtonien et incompressible à des propriétés physiques et thermiques constantes en écoulement laminaire, dans une conduite horizontale à section circulaire de longueur (L). Il entre dans la conduite avec une vitesse (U_0) et température (T_0). La surface latérale du tube est soumise à une densité de flux de chaleur uniforme et constante (\dot{q}_p), comme le montre la figure II-1.

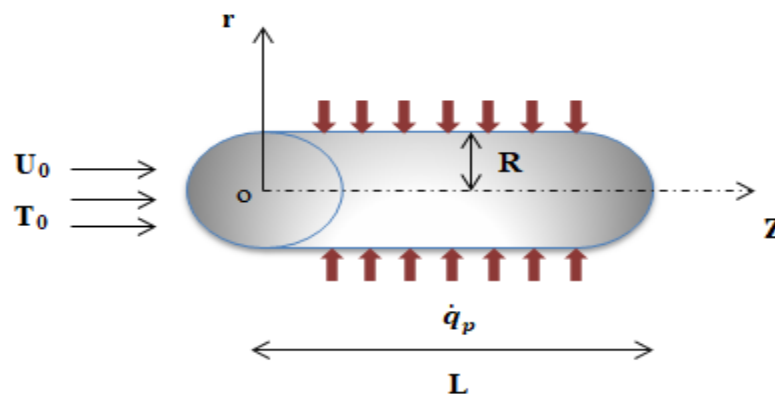


Figure II-1 : schéma descriptif du problème à étudier

II.3 Equations gouvernantes

La formulation mathématique du phénomène de convection est basée sur équations reliant différents paramètres, à savoir : vitesse, pression et température. Ces équations sont obtenues à partir des lois de conservation de masse, de conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes), et de conservation d'énergie.

II.3.1 Equation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle de matériau. Il s'exprime mathématiquement comme suit [14]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{II.1})$$

II.3.2 Equations de la quantité de mouvement

D'après la seconde loi de Newton appliquée à une particule de fluide, on a :

$$\rho d\tau \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P d\tau + \vec{f}_{v,ext} d\tau + d\vec{F}_\mu \quad \text{avec : } d\vec{F}_\mu = \mu \Delta \vec{V} d\tau \quad (\text{II.2})$$

En divisant par $d\tau$, on obtient l'équation de Navier-Stokes pour un fluide incompressible newtonien [39] :

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right] = -\vec{\nabla}P + \vec{f}_{v,ext} + \mu \Delta \vec{V} \quad (\text{II.3})$$

Où :

\vec{V} : vecteur de vitesse .

$\vec{\nabla}P$: force de pression.

$\vec{f}_{v,ext}$: force volumique extérieure .

$d\vec{F}_\mu$: forces visqueuses .

II.3.3 Equation d'énergie

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le premier principe de la thermodynamique pour un fluide Newtonien incompressible.

L'équation d'énergie est la suivante [28] :

$$\text{div}(\rho \vec{V} C_p T) = \text{div}(\lambda \overline{\text{grad}T}) + S_e \quad (\text{II.4})$$

Avec :

Le travail de compression et la dissipation visqueuse sont supposés négligeable dans l'équation de l'énergie.

S_e : représente les effets intégrés de la quantité de mouvement et de l'échange d'énergie avec le fluide de base, et il égale à zéro dans le cas du mode monophasé .

II.4 Hypothèses simplificatrices

La résolution des équations gouvernantes nécessite quelques hypothèses simplificatrices, nous avons adopté les hypothèses suivantes :

- ✓ Fluide newtonien et incompressible ($\rho = \text{cte}$).
- ✓ Ecoulement bidimensionnel.
- ✓ Ecoulement axisymétrique ($\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$).
- ✓ Régime d'écoulement laminaire ($\text{Re} < 2300$).
- ✓ Régime d'écoulement permanent ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$).
- ✓ Absence de source interne de chaleur, de source de masse ou de réaction chimique.
- ✓ Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- ✓ L'énergie induit par les forces visqueuses est négligeable.
- ✓ Les forces volumiques négligeables.

Après avoir considéré les hypothèses simplificatrices ci-dessus, les équations dimensionnelles régissant l'écoulement d'un nanofluide dans le canal représenté par la figure II. 1 peut s'écrire comme suit :

- Equation de continuité :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rV)}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial Z} = 0 \quad (\text{II.5})$$

- Equation du quantité de mouvement :

Suivant l'axe (or) :

$$\rho_{nf} \left(V \frac{\partial V}{\partial r} + U \frac{\partial V}{\partial Z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu_{nf} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) - \frac{V}{r^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right] \quad (\text{II.6})$$

Suivant l'axe (oz) :

$$\rho_{nf} \left(V \frac{\partial U}{\partial r} + U \frac{\partial U}{\partial Z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \mu_{nf} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right] \quad (\text{II.7})$$

- Equation de l'énergie :

$$\rho_{nf} \left(V \frac{\partial T}{\partial r} + U \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \frac{\lambda_{nf}}{C_{p,nf}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right] \quad (\text{II.8})$$

Les équations présentées précédemment peuvent être écrites en forme conservative comme suit :

- Equation continuité :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{nf} r V)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_{nf} U)}{\partial Z} = 0 \quad (\text{II.9})$$

- Equation du quantité de mouvement :

Suivant l'axe (or) :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{nf} r V V)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_{nf} U V)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{nf} r \frac{\partial V}{\partial r} \right) - \mu_{nf} \frac{V}{r^2} + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial Z} \right) \quad (\text{II.10})$$

Suivant l'axe (oz) :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{nf} r V U)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_{nf} U U)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_{nf} r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Z} \right) \quad (\text{II.11})$$

- Equation de l'énergie :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{nf} r V T)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_{nf} U T)}{\partial Z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\lambda_{nf}}{C_{p_{nf}}} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\lambda_{nf}}{C_{p_{nf}}} \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad (\text{II.12})$$

II.5 Conditions aux limites dimensionnelles

Les conditions aux limites utilisées pour la configuration étudiée dans cette application (figure II-1) sont les suivants :

Tableau II-1 : Conditions aux limites dimensionnelle

Limites	Conditions hydrodynamiques	Conditions thermiques
Entrée du tube (z = 0)	$U = U_0$ $V = 0$	$T = T_0$
Sortie du tube (z=L) (régime établie)	$\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{\partial V}{\partial Z} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial Z} = 0$
Axe de symétrie (r = 0)	$\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\partial V}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$
La paroi du tube (r = R)	$U = V = 0$	$\lambda_{nf} \left[\frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=R} = \dot{q}_p$

II.6 Choix du modèle de la viscosité :

Nous avons citer dans le chapitre précédent cinq (05) modèles de viscosité dynamique :

- Modèle 1 (modèle d'Einstein) : $\mu_{nf} = \mu_f (1 - 2.5\phi)$
- Modèle 2 (modèle de Brinkman) : $\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}$
- Modèle 3 (modèle de Batchelor) : $\mu_{nf} = \mu_f (2.6\phi^2 + 2.5\phi + 1)$
- Modèle 4 (proposée par Maiga et al) : $\mu_{nf} = \mu_f (123\phi^2 + 7.3\phi + 1)$
- Modèle 5 (proposée par Pack et Cho) : $\mu_{nf} = \mu_f (533.9\phi^2 + 39.11\phi + 1)$

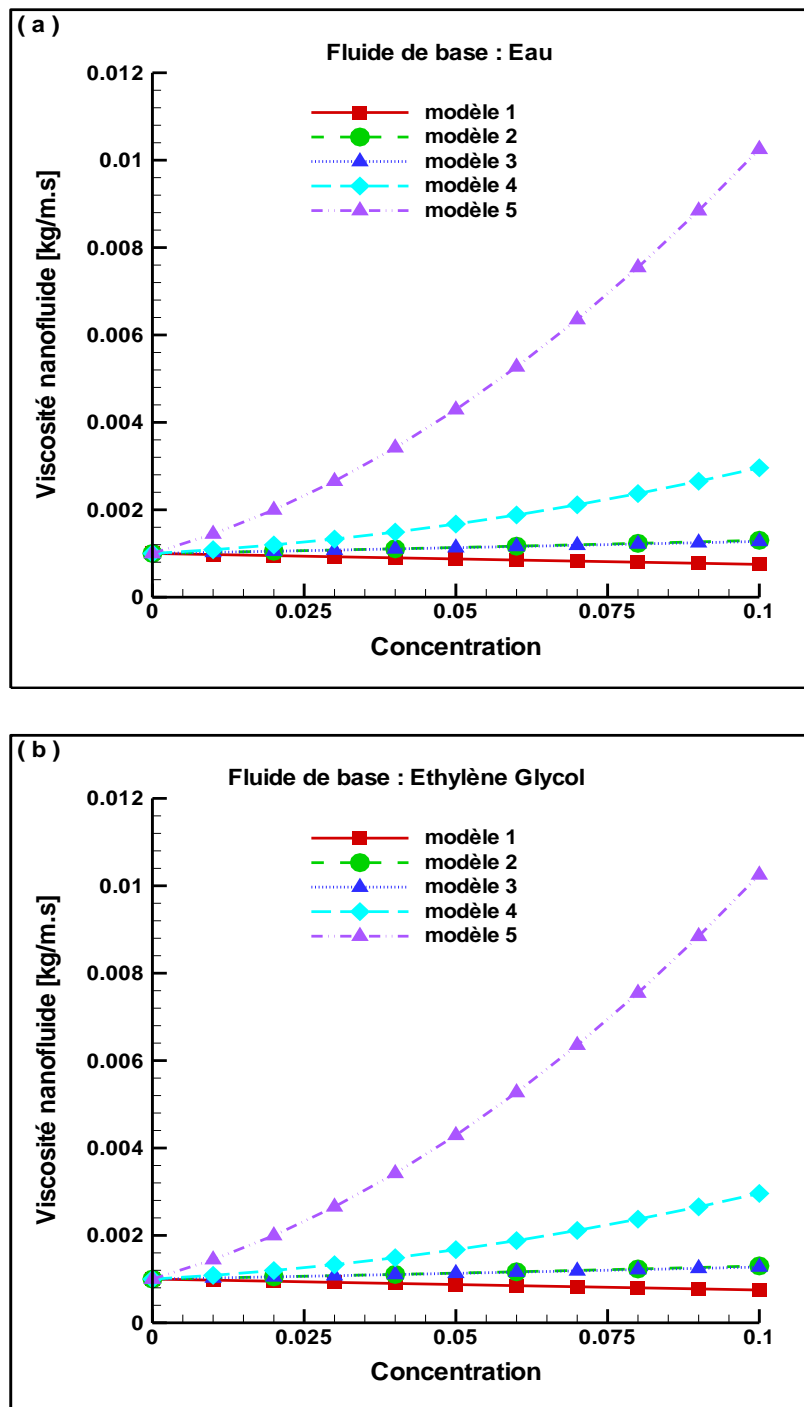


Figure II-2 : variation de la viscosité du nanofluide en fonction de la concentration pour (a) fluide de base : Eau et (b) fluide de base : EG.

Selon la figure II-2 on remarque que les modèles 2 et 3 sont identiques. Dans notre étude on peut choisir comme modèle de viscosité le modèle 2 (modèle Brinkman) .

II.7 Choix du modèle de la conductivité thermique :

Nous avons cité dans le chapitre précédent 3 modèles de la conductivité thermique :

- Modèle 1 (modèle de Maxwell) :
$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_{fb} - 2\phi(\lambda_{fb} - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_{fb} + \phi(\lambda_{fb} - \lambda_p)} \lambda_{fb}$$
- Modèle 2 (modèle Hamilton et Crosser) :
$$\lambda_{nf} = (4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1)\lambda_{fb}$$
- Modèle 3 (modèle Hamilton et Crosser) :
$$\lambda_{nf} = (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1)\lambda_{fb}$$

II.7.1 Choix du modèle de la conductivité du Al_2O_3 – Eau

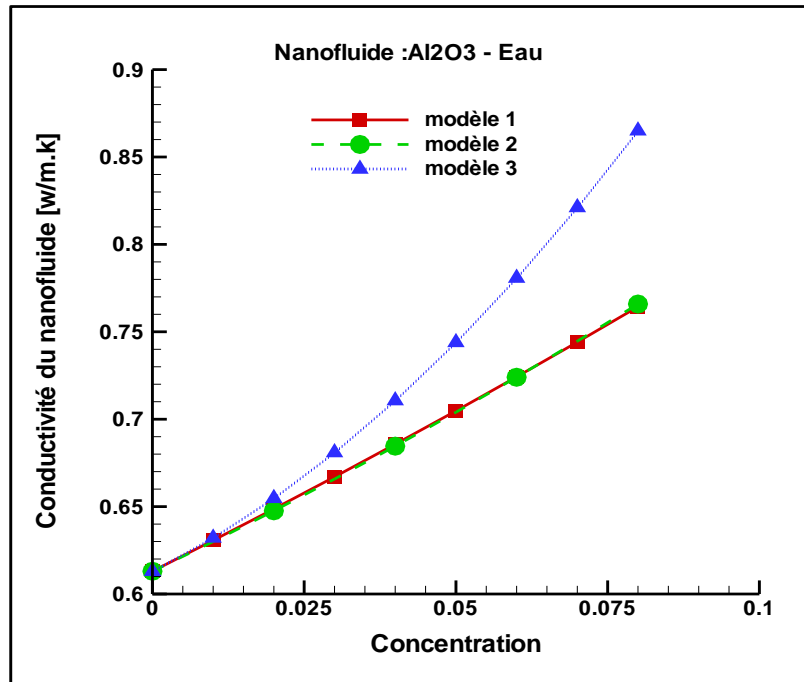


Figure II-3: variation de la conductivité thermique du Al_2O_3 -Eau en fonction de la concentration.

Selon la figure II-3 on peut choisir comme modèle de conductivité le modèle 1 pour Al_2O_3 -Eau .

II.7.2 Choix du modèle de la conductivité du Al_2O_3 – EG

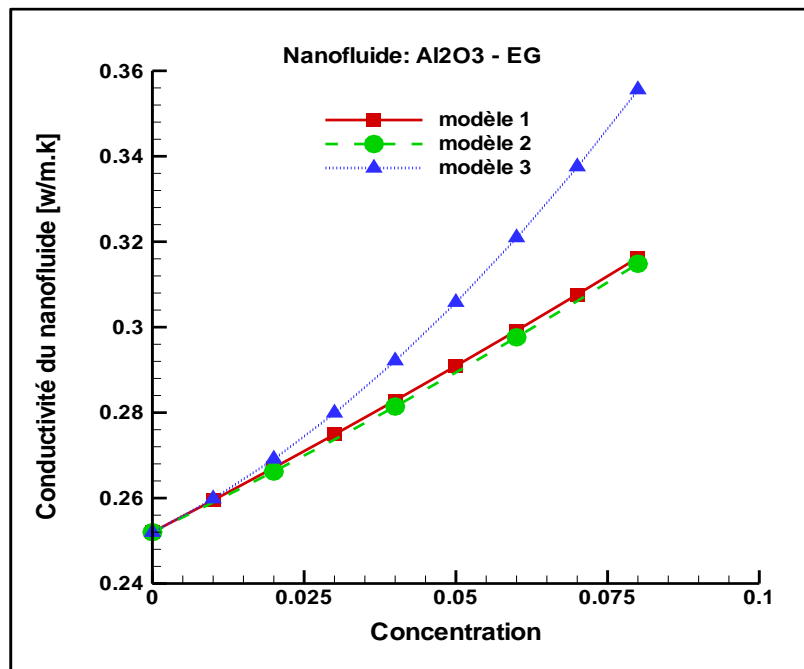


Figure II-4: variation de la conductivité thermique du Al_2O_3 -EG en fonction de la concentration.

Selon la figure II-4 on peut choisir comme modèle de conductivité le modèle 1 pour Al_2O_3 -EG

II.7.3 Choix du modèle de la conductivité du CuO – Eau

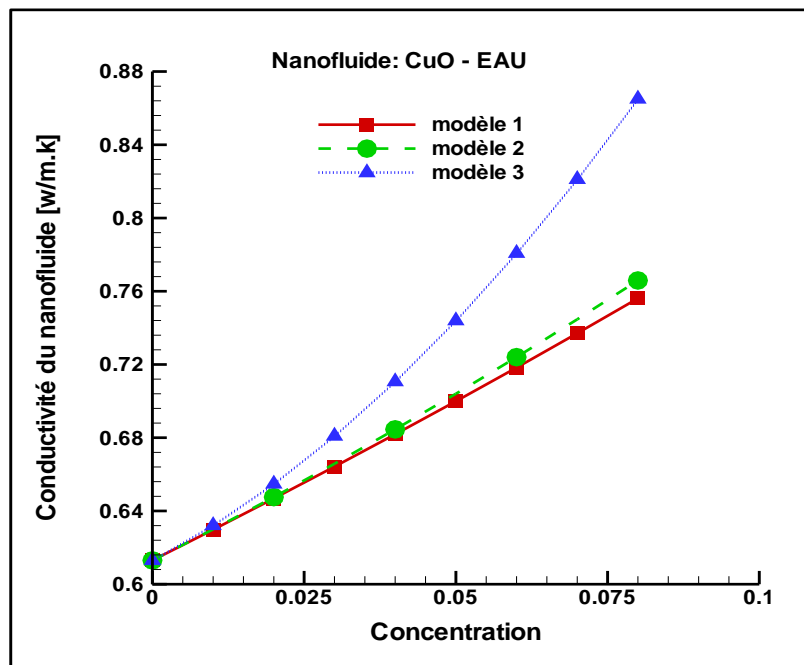


Figure II-5: variation de la conductivité thermique du CuO -Eau en fonction de la concentration.

Selon la figure II-4 on peut choisir comme modèle de conductivité le modèle 1 pour CuO -Eau .

II.7.4 Choix du modèle de la conductivité du CuO – EG

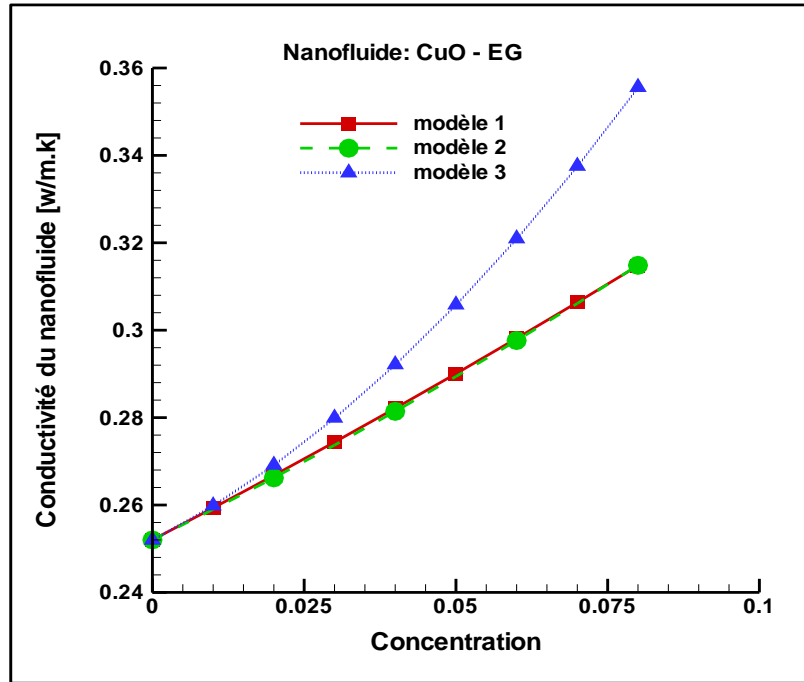


Figure II-6: variation de la conductivité thermique du CuO-EG en fonction de la concentration.

Selon la figure II-6 on peut choisir comme modèle de conductivité le modèle 1 pour CuO-EG.

II.7.5 Choix du modèle de la conductivité du SiO₂ – Eau

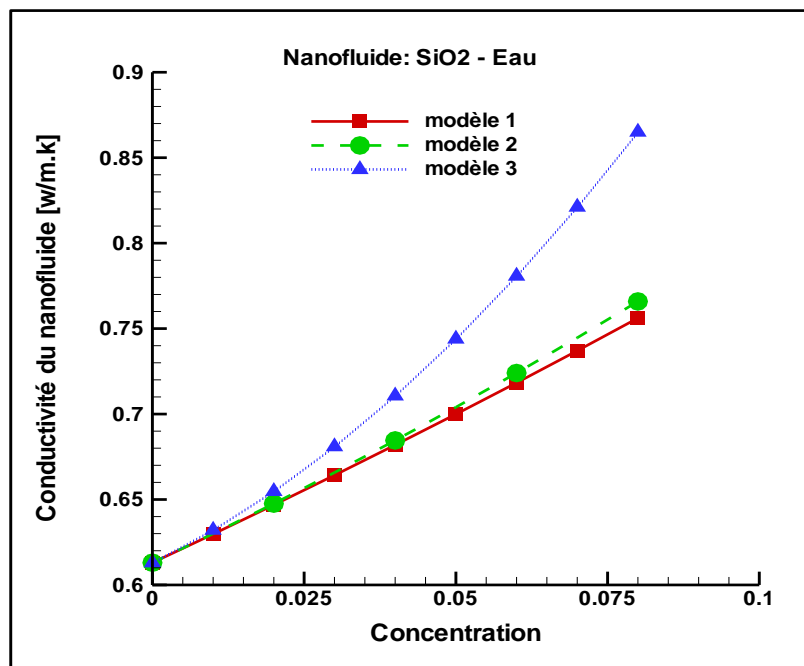


Figure II-7 : variation de la conductivité thermique du SiO₂-Eau en fonction de la concentration.

Selon la figure II-7 on peut choisir comme modèle de conductivité le modèle 2 pour SiO₂-Eau .

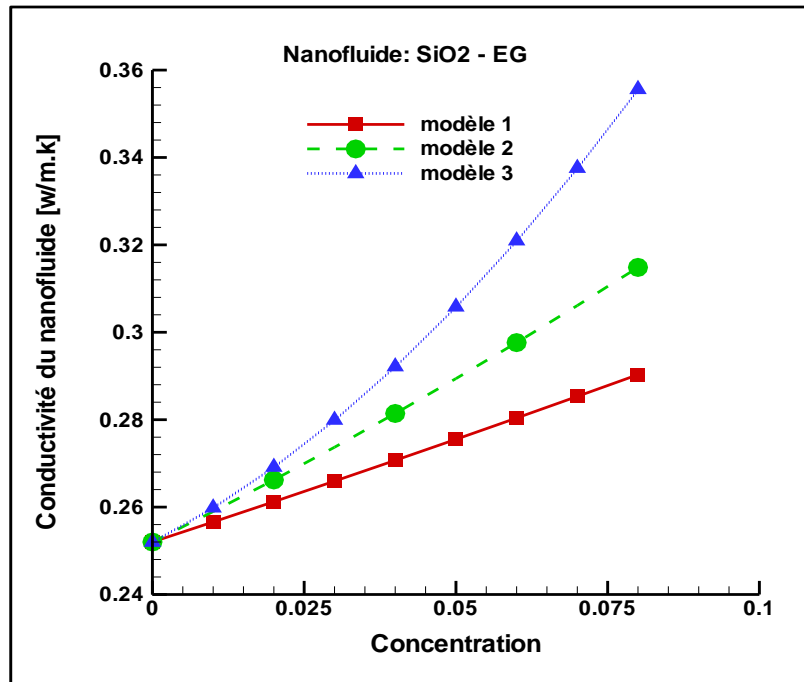
II.7.6 Choix du modèle de la conductivité du SiO_2 - EG

Figure II-8: variation de la conductivité thermique du SiO_2 -EG en fonction de la concentration.

Selon la figure II-8 on peut choisir comme modèle de conductivité le modèle 2 pour SiO_2 -EG

II.8 Modèle mathématique en forme adimensionnelle:

Pour simplifier l'étude, des variables sous forme adimensionnelle peuvent être utilisées. Cela a pour effet de réduire le nombre de paramètres pouvant être modifiés, facilitant ainsi la manipulation des équations et l'analyse des résultats. Dans ce cas, nous introduisons des variables sans dimension dans les équations : (II.9), (II.10), (II.11) et (II.12). Les variables sont:

$$Z^* = \frac{Z}{D} \quad , \quad r^* = \frac{r}{D} \quad , \quad U^* = \frac{U}{U_0} \quad , \quad V^* = \frac{V}{U_0}$$

$$\rho^* = \frac{\rho_{nf}}{\rho_{nf}} = 1 \quad (\text{fluide incompressible}) \quad , \quad P^* = \frac{P}{\rho_{nf} U_0^2} \quad , \quad \theta = \frac{T - T_0}{\frac{\dot{q}_p D}{\lambda_{nf}}}$$

- Equation de continuité :

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial(\rho^* r^* V^*)}{\partial r^*} + \frac{\partial(\rho^* U^*)}{\partial Z^*} = 0 \quad (\text{II.13})$$

- Equation du quantité de mouvement :

Suivant l'axe (or) :

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial(\rho^* r^* V^* V^*)}{\partial r^*} + \frac{\partial(\rho^* U^* V^*)}{\partial Z^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial r^*} + \frac{1}{Re_{nf}} \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial V^*}{\partial r^*} \right) - \frac{V^*}{r^{*2}} + \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(\frac{\partial V^*}{\partial Z^*} \right) \right] \quad (\text{II.14})$$

Suivant l'axe (oz) :

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial(\rho^* r^* V^* U^*)}{\partial r^*} + \frac{\partial(\rho^* U^* U^*)}{\partial Z^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial Z^*} + \frac{1}{Re_{nf}} \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial U^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(\frac{\partial U^*}{\partial Z^*} \right) \right] \quad (\text{II.15})$$

- Equation de l'énergie:

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial(\rho^* r^* V^* \theta)}{\partial r^*} + \frac{\partial(\rho^* U^* \theta)}{\partial Z^*} = \frac{1}{Re_{nf} \cdot Pr_{nf}} \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial \theta}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z^*} \right) \right] \quad (\text{II.16})$$

La mise sous forme adimensionné des équations de conservation fait apparaître des nombres sans dimensions qui gouvernent le problème. Les nombre adimensionnels sont :

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} U_0 D}{\mu_{nf}} \quad \text{et} \quad Pr_{nf} = \frac{\mu_{nf} C_{p_{nf}}}{\lambda_{nf}}$$

Remarque :

Pour $\phi = 0$ ($\rho_{nf} = \rho_{fb}$, $C_{p_{nf}} = C_{p_{fb}}$, $\lambda_{nf} = \lambda_{fb}$), on trouve la formule adimensionnelle pour un écoulement d'un fluide de base (fluide pure).

$$\checkmark Re_{fb} = Re_{nf}(\phi = 0) = \frac{\rho_{fb} U_0 D}{\mu_{fb}}$$

$$\checkmark Pr_{fb} = Pr_{nf}(\phi = 0) = \frac{\mu_{fb} c_{pfb}}{\lambda_{fb}}$$

II.9 Conditions aux limites adimensionnelles

Les conditions aux limites du problème considéré sous forme adimensionnelle sont comme suit:

Tableau II-2 : Conditions aux limites sous forme adimensionnelle.

Limites	Conditions hydrodynamiques	Conditions thermiques
Entrée du tube ($Z^* = 0$)	$U^* = 1$ $V^* = 0$	$\theta = 0$
Sortie du tube ($Z^* = \frac{L}{D}$) (régime établie)	$\frac{\partial U^*}{\partial Z^*} = \frac{\partial V^*}{\partial Z^*} = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial Z^*} = 0$
Axe de symétrie ($r^* = 0$)	$\frac{\partial U^*}{\partial r^*} = \frac{\partial V^*}{\partial r^*} = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial r^*} = 0$
Paroi du tube ($r^* = \frac{R}{D}$)	$U^* = V^* = 0$	$\left[\frac{\partial \theta}{\partial r^*} \right]_{r^* = \frac{R}{D} = 0.5} = 1$

II.10 Nombre de Nusselt local et moyen

• Nombre de Nusselt local

Le nombre de Nusselt est le coefficient de transfert de chaleur, mais sous une forme sans dimension. Il fournit une mesure du rapport entre la chaleur transportée par convection et la chaleur transportée par conduction.

$$\dot{q}_P = h(z) [T_p(z) - T_m(z)] \quad (\text{II.17})$$

Avec : h : Coefficient de convection local .

$T_p(z)$: Température de la paroi à la section transversale z .

$T_m(z)$: Température moyenne du fluide à la section transversale z .

$$T_m(z) = \frac{\int_0^R \rho c_p U T dA}{\int_0^R \rho c_p U dA} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$dA = 2\pi r dr$$

En remplaçant dans l'équation (II.18) , on trouve :

$$T_m(Z) = \frac{\int_0^R UTrdr}{\int_0^R Urd r} \quad (\text{II.19})$$

L'équation (II.19) s'écrit sous forme adimensionnelle comme suit :

$$\theta_m(Z) = \frac{\int_0^{0.5} U^* \theta r^* dr^*}{\int_0^{0.5} U^* r^* dr^*} \quad (\text{II.20})$$

D'autre part nous avons :

$$\theta(r, z) = \frac{T(r, z) - T_0}{\frac{\dot{q}_p D}{\lambda_{nf}}}$$

$$\Rightarrow T(r, z) = \frac{\dot{q}_p D}{\lambda_{nf}} \theta(z) + T_0$$

Donc :

$$T_m(z) = \frac{\dot{q}_p D}{\lambda_{nf}} \theta_m(z) + T_0$$

$$T_p(z) = \frac{\dot{q}_p D}{\lambda_{nf}} \theta_p(z) + T_0$$

En remplaçant dans l'équation (II.17), on obtient :

$$\frac{h(z)D}{\lambda_{nf}} = \frac{1}{\theta_p(z) - \theta_m(z)}$$

$$\frac{h(z)D}{\lambda_f} = \frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} \left[\frac{1}{\theta_p(z) - \theta_m(z)} \right]$$

Donc :

$$Nu(Z) = \frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} \left[\frac{1}{\theta_p(z) - \theta_m(z)} \right] \quad (\text{II.21})$$

- **Nombre de Nusselt moyen**

Le nombre de Nusselt moyen est déterminé en intégrant le nombre de Nusselt local le long de la paroi verticale :

$$\overline{Nu(Z)} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu(Z) dZ \quad (\text{II.22})$$

II.11 Coefficient des pertes de charge local et moyen

- Coefficient des pertes de charge local

Est une valeur sans unité qui permet de calculer la perte de charge en fonction de la pression dynamique du fluide, ce qu'il faut retenir : la perte de charge évolue proportionnellement au carré de la vitesse.

$$\frac{dP}{dZ} = -f(z) \frac{\rho_{nf} U_0^2}{2D_h} \quad (\text{II.23})$$

Après l'adimensionalisation, on trouve :

$$\frac{dP^*}{dZ^*} = -\frac{f(z)}{2} \quad (\text{II.24})$$

$$f(Z) = -2 \frac{dP^*}{dZ^*} \quad (\text{II.25})$$

- Coefficient de perte de charge moyen

Le coefficient de perte de charge moyen est déterminé en intégrant le coefficient de perte de charge local le long du canal.

$$\overline{f(Z)} = \frac{1}{L} \int_0^L f(Z) dZ \quad (\text{II.26})$$

II.12 La performance thermique

Le facteur d'amélioration du transfert de chaleur est également appelé critère d'évaluation des performances (PTH) ou performance thermohydraulique. Pour un choix judicieux des conditions de fonctionnement qui assure une amélioration considérable du transfert de chaleur sans une forte augmentation de la puissance de pompage, il est nécessaire de calculer le paramètre PTH qui constitue un facteur important dans la construction des échangeurs de chaleur. La technologie d'amélioration du transfert de chaleur ne peut être considérée comme utile et efficace que si : $PTH > 1$. [24]

$$PTH = \frac{R_{\overline{Nu}_{nf}}}{(R_{\overline{f}})^{\frac{1}{3}}} = \frac{R_{\overline{h}}}{(R_{\overline{f}})^{\frac{1}{3}}} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$R_{\overline{Nu}_{nf}}$: rapport de nombre de Nusselt moyen

$$R_{\overline{Nu}_{nf}} = \frac{\overline{Nu}_{nf}(\varnothing)}{\overline{Nu}_{nf}(\varnothing = 0)} = \frac{\overline{Nu}_{nf}(\varnothing)}{\overline{Nu}_{fb}}$$

$R_{\overline{h}}$: rapport de coefficient d'échange convectif

$$R_{\overline{h}_{nf}} = \frac{\overline{h}_{nf}(\varnothing)}{\overline{h}_{nf}(\varnothing = 0)} = \frac{\overline{h}_{nf}(\varnothing)}{\overline{h}_{fb}}$$

$R_{\overline{f}}$: rapport de coefficient des pertes des charges

$$R_{\overline{f}} = \frac{\overline{f}_{nf}(\varnothing)}{\overline{f}_{nf}(\varnothing = 0)} = \frac{\overline{f}_{nf}(\varnothing)}{\overline{f}_{fb}}$$

Remarque

Nous supprimerons le symbole (*) de toutes les équations du chapitre trois pour en faciliter l'écriture.

Chapitre III

Discrétisation et résolutions numérique

III.1 Introduction

La résolution des équations d'un phénomène physique de convection thermique se fait par l'utilisation d'une méthode numérique. Ces types des phénomènes sont généralement modélisés par des équations aux dérivées partielles (E.D.P) non-linéaires. Cette dernière consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations. A cette étape, intervient le concept de la discrétisation. Pour obtenir une solution numérique, le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) ou par un système d'EDP est transformé, à l'aide d'une méthode de discrétisation en système d'équations algébriques. Il existe plusieurs méthodes numériques de discrétisations des équations aux dérivées partielles (E.D.P) :

- ✓ La méthode des éléments finis.
- ✓ La méthode des différences finies.
- ✓ La méthode des volumes finis.

Dans ce chapitre nous avons introduit la méthode numérique utilisée dans la résolution (méthode des volumes finis), puis nous avons converti le système d'équations différentielles régissant l'écoulement obtenu dans le chapitre précédent de la formule différentielle à la formule algébrique en utilisant cette méthode, cette dernière nous conduit en une matrice pentagonale qui la convertit en une matrice à trois diagonales en balayant ligne par ligne, puis en la résolvant par la méthode TDMA.

III.2 Présentation de la méthode des volumes finis (M.V.F)

III.2.1 Descriptif

La méthode a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar (Numerical Heat Transfer and Fluid Flow) .

III.2.2 Principe de la méthode

Le principe de discrétisation peut être illustré en considérant l'équation de transport pour une grandeur scalaire ϕ , valable pour toutes les équations d'écoulement, en régime stationnaire:

$$\oint (\rho \phi \vec{V}) d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \overrightarrow{grad}(\phi) d\vec{A} + \int S_{\phi} dV \quad (\text{III.1})$$

Où :

\vec{V} : le vecteur vitesse.

Γ_{ϕ} : le coefficient de diffusion de la grandeur ϕ .

\vec{A} : le vecteur l'aire de la surface

S_{ϕ} : le terme source

L'équation (III.1) est appliquée sur chaque volume de contrôle du domaine de calcul (domaine d'étude ou d'analyse). La discrétisation de cette équation donne [40] :

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f v_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\vec{\nabla}\phi)_n A_f + S_\phi V \quad (\text{III.2})$$

Où :

N_{faces} : le nombre de faces (interfaces) du volume de contrôle.

ϕ_f : la valeur de ϕ transférée par convection à travers l'interface f .

v_f : le flux de masse à travers l'interface f .

A_f : l'aire de l'interface .

$(\vec{\nabla}\phi)_n$: la valeur de $\vec{\nabla}\phi$ normal (perpendiculaire) à l'interface f .

V : le volume de contrôle .

III.3 Etapes de la méthode des volumes finis

la méthode des volumes finis passe par les étapes suivantes :

- ✓ Distribution des volumes de contrôle (Maillage).
- ✓ Discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle.
- ✓ Choix du schéma d'interpolation approprié.
- ✓ Choix d'algorithme de résolution du système d'équations obtenu après discrétisation.

III.4 Distribution des volumes de contrôle

De manière générale, les méthodes de volumes finis consistent à subdiviser le domaine de calcul en un nombre fini de volumes élémentaires, appelés volumes de contrôle. L'un des principaux avantages de cette approche est qu'elle assure une préservation globale précise des entités physiques quelle que soit la taille du maillage. Les indices en lettres majuscules désignent les nœuds centraux de chaque volume de contrôle où sont stockées les variables scalaires (température et pression) tandis que ceux en lettres minuscules désignent les nœuds aux centres des faces latérales où sont stockées les entités vectorielles (les composantes de la vitesse u et v). L'une des particularités associées à cette méthode est l'utilisation d'un maillage décalé (staggered grid) en fonction de l'entité considérée (figure III.1).

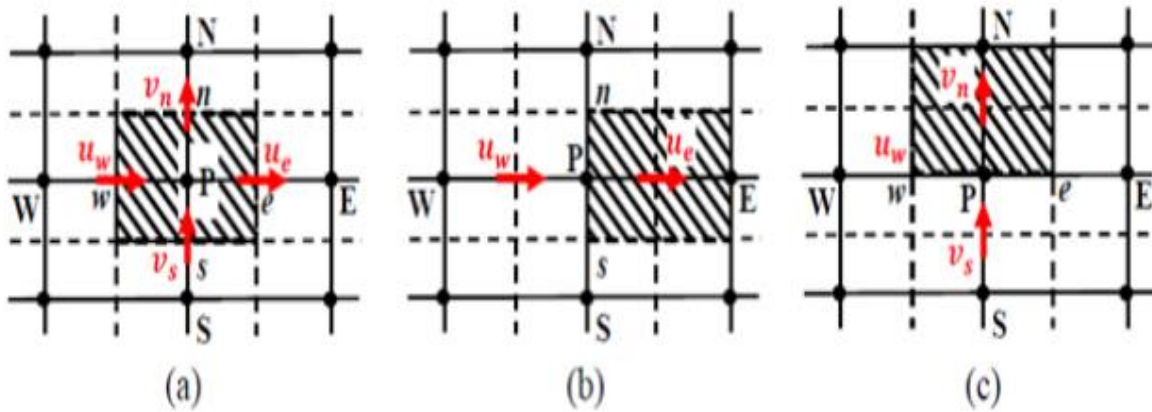


Figure III-1 : (a) Maillage typique, (b) Maillage décalé pour U_e , (c) Maillage décalé pour V_n .

Les index en majuscules désignent le nœud central de chaque volume de contrôle stockant les variables scalaires (température et pression), tandis que les index en minuscules désignent les nœuds au centre des côtés, où se trouvent les entités vectorielles (composantes de la vitesse v et u). une des particularités est l'utilisation d'une grille échelonnée selon l'entité considérée.[41]

III.5 Discrétisation des équations de conservation

Les équations à résoudre peuvent être écrites sous la forme de l'équation générale du transport en coordonnées cylindriques pour un écoulement incompressible bidimensionnel [42]:

$$\underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{nf} r V \phi)}{\partial r}}_{(a)} + \underbrace{\frac{\partial(\rho_{nf} U \phi)}{\partial Z}}_{(b)} = \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_\phi r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)}_{(b)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial Z} \right)}_{(c)} + S_\phi \quad (III.3)$$

Où :

ϕ : La propriété transportée.

Γ_ϕ : Le coefficient de diffusion.

S_ϕ : Le terme source qui inclut également le gradient de pression.

Les trois termes de l'équation (III.1) sont respectivement :

(a) : le taux de transport de ϕ par convection.

(b) : le taux de transport de ϕ par diffusion.

(c) : le terme source.

Les termes de l'équation généralisée (III.1) sont groupés dans le tableau III.1 pour les différentes équations :

Tableau III-1 : les différents termes de l'équation de transport adimensionnelle.

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
conservation de la masse	1	0	0
quantité de mouvement suivant (or)	V	$\frac{1}{Re_{nf}}$	$-\frac{\partial P}{\partial r} - \frac{1}{Re_{nf}} \frac{V}{r^2}$
quantité de mouvement suivant (oz)	U	$\frac{1}{Re_{nf}}$	$-\frac{\partial P}{\partial Z}$
d'énergie	θ	$\frac{1}{Re_{nf} Pr_{nf}}$	0

III.5.1 Discretisation de l'équation de continuité

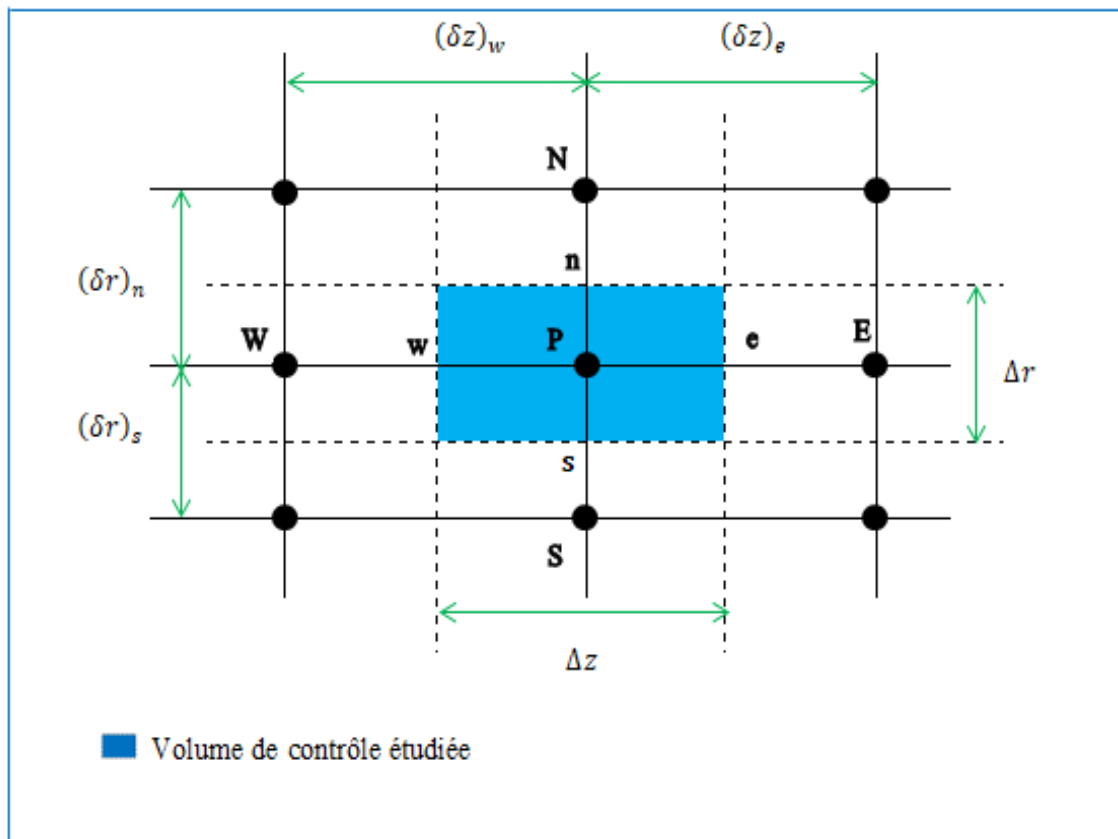


Figure III-2 : Volume de contrôle typique bidimensionnel.

Nous rappelons l'équation de continuité écrit dans le chapitre II, tel que :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial Z} = 0 \quad (\text{III.4})$$

En intégrant l'équation (III.4) sur le volume de contrôle dv , on obtient :

$$\int \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial Z} = 0 \right] dV = 0 \quad (\text{III.5})$$

Avec : $dV = 2\pi r dr dz$

$$\int_w^e \left[\int_s^n \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V)}{\partial r} 2\pi r dr \right] dz + \int_s^n \left[\int_w^e \frac{\partial(\rho r U)}{\partial Z} dz \right] 2\pi dr = 0 \quad (\text{III.6})$$

$$\int_w^e 2\pi [(\rho r V)_n - (\rho r V)_s] dz + \int_s^n 2\pi [(\rho r U)_e - (\rho r U)_w] dr = 0 \quad (\text{III.7})$$

De l'hypothèse de l'uniformité de la vitesse sur les faces du volume de contrôle, l'équation (III.5) devient :

$$(\rho U)_e \int_s^n 2\pi(r)_e dr - (\rho U)_w \int_s^n 2\pi(r)_w dr + (\rho V)_n \int_w^e 2\pi(r)_n dz - (\rho V)_s \int_w^e 2\pi(r)_s dz = 0 \quad (\text{III.8})$$

Posant :

$$a_e = \int_s^n 2\pi(r)_e dr \quad (\text{Surface de face este du volume étudié.})$$

$$a_w = \int_s^n 2\pi(r)_w dr \quad (\text{Surface de face ouest du volume étudié.})$$

$$a_n = \int_w^e 2\pi(r)_n dz \quad (\text{Surface de face nord du volume étudié.})$$

$$a_s = \int_w^e 2\pi(r)_s dz \quad (\text{Surface de face sud du volume étudié.})$$

Par conséquent, l'équation (III.8) devient :

$$(\rho U)_e a_e - (\rho U)_w a_w + (\rho V)_n a_n - (\rho V)_s a_s = 0 \quad (\text{III.9})$$

Utilisant la relation du flux de masse comme suit :

$$F_i = (\rho U)_i a_i$$

L'équation (III.9) devient :

$$F_e - F_w + F_n - F_s = 0 \tag{ III.10}$$

Tel que :

F_e, F_w, F_n et F_s sont les débit massique traversant les interfaces.

III.5.2 Discretisation de l'équation de quantité de mouvement

Selon l'axe (or) :

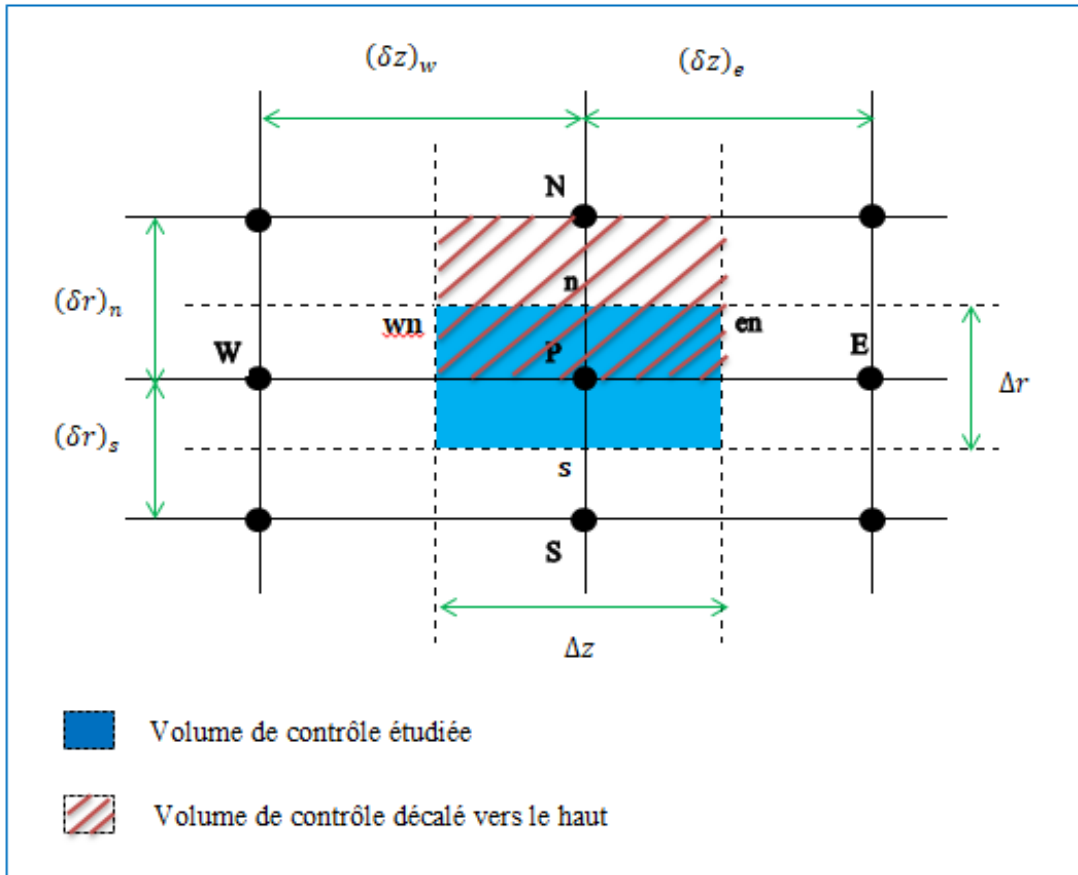


Figure III-3 : volume de contrôle décalé vers le haut.

L'équation de quantité de mouvement selon l'axe (or) est comme suit :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V V)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho U V)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{Re_{nf}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) - \frac{V}{r^2} + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\partial V}{\partial Z} \right) \right] \tag{ III.11}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V V)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho U V)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_v \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_v \frac{\partial V}{\partial Z} \right) + S_v \tag{ III.12}$$

Où :

$$\Gamma_v = \frac{1}{Re_{nf}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_v = -\frac{1}{Re_{nf} r^2} V \\ S_v = S_C + S_P V \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} S_C = 0 \\ S_P = -\frac{1}{Re_{nf} r^2} \end{array} \right.$$

Nous intégrons l'équation (III.12) dans un volume de contrôle décalé vers le haut illustré à la figure (III.3) :

$$\int \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V V)}{\partial r} dV + \int \frac{\partial(\rho U V)}{\partial Z} dV \quad (III.13)$$

$$= \int -\frac{\partial P}{\partial r} dV + \int \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_v \frac{\partial V}{\partial r} \right) dV + \int \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_v \frac{\partial V}{\partial Z} \right) dV + \int S_v dV$$

$$\int_{wn}^{en} \left[\int_P^N \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V V)}{\partial r} r dr \right] 2\pi dz + \int_P^N \left[\int_{wn}^{en} \frac{\partial(\rho U V)}{\partial Z} dz \right] 2\pi r dr$$

$$= \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N -\frac{\partial P}{\partial r} r dr \right] 2\pi dz + \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_v \frac{\partial V}{\partial r} \right) r dr \right] 2\pi dz \quad (III.14)$$

$$+ \int_P^N \left[\int_{wn}^{en} \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_v \frac{\partial V}{\partial Z} \right) dz \right] 2\pi r dr + \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N S_v r dr \right] 2\pi dz$$

On somme les parties similaires et on simplifié, l'équation (III.14) devient :

$$\int_{wn}^{en} \left[\int_P^N \frac{\partial \left[(\rho r V V) - \left(r \Gamma_v \frac{\partial V}{\partial r} \right) \right]}{\partial r} dr \right] 2\pi dz + \int_P^N \left[\int_{wn}^{en} \frac{\partial \left[(\rho U V) - \left(\Gamma_v \frac{\partial V}{\partial Z} \right) \right]}{\partial Z} dz \right] 2\pi r dr \quad (III.15)$$

$$= \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N -\frac{\partial P}{\partial r} r dr \right] 2\pi dz + \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N S_v r dr \right] 2\pi dz$$

On pose :

$$J'_r = (\rho r V V) - \left(r \Gamma_v \frac{\partial V}{\partial r} \right)$$

$$J'_z = (\rho U V) - \left(\Gamma_v \frac{\partial V}{\partial Z} \right)$$

L'équation (III.15) devient :

$$\begin{aligned} \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N \frac{\partial(rJ'_r)}{\partial r} dr \right] 2\pi dz + \int_P^N \left[\int_{wn}^{en} \frac{\partial(J'_z)}{\partial z} dz \right] 2\pi r dr \\ = \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N -\frac{\partial P}{\partial r} r dr \right] 2\pi dz + \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N S_v r dr \right] 2\pi dz \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

En intégrant le côté gauche de l'équation (III.16), on obtient :

$$G = \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N \frac{\partial(rJ'_r)}{\partial r} dr \right] 2\pi dz + \int_P^N \left[\int_{wn}^{en} \frac{\partial(rJ'_z)}{\partial z} dz \right] 2\pi r dr \quad (\text{III.17})$$

$$G = \int_w^e 2\pi [(rJ'_r)_n - (rJ'_r)_s] dz + \int_s^n 2\pi [(rJ'_z)_e - (rJ'_z)_w] dr \quad (\text{III.18})$$

De l'hypothèse de l'uniformité de la vitesse sur les faces du volume étudié, l'équation (III.18) devient :

$$\begin{aligned} G = (J'_r)_n 2\pi \int_w^e (r)_n dz - (J'_r)_s 2\pi \int_w^e (r)_s dz + (J'_z)_e 2\pi \int_s^n (r)_e dr \\ - (J'_z)_w 2\pi \int_s^n (r)_w dr \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

On pose :

$$a_n = 2\pi \int_w^e (r)_n dz$$

$$a_s = 2\pi \int_w^e (r)_s dz$$

$$a_e = 2\pi \int_s^n (r)_e dr$$

$$a_w = 2\pi \int_s^n (r)_w dr$$

$$G = (J'_r)_n a_n - (J'_r)_s a_s + (J'_z)_e a_e - (J'_z)_w a_w \quad (\text{III.20})$$

Utilisant la relation du flux de masse comme suit :

$$J_i = J'_i a_i$$

L'équation (III.20) devient :

$$G = J_n - J_w + J_e - J_s \quad (\text{III.21})$$

En intégrant le côté droit de l'équation (III.16) , on obtient :

$$D = \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N -\frac{\partial P}{\partial r} r dr \right] 2\pi dz + \int_{wn}^{en} \left[\int_P^N S_v r dr \right] 2\pi dz \quad (\text{III.22})$$

$$D = (P_P - P_N)2\pi \int_w^e (r)_n dz + \int_w^e \left[\int_s^n S_v r dr \right] 2\pi dz \quad (\text{III.23})$$

L'équation (III.23) devient :

$$D = (P_P - P_N)2\pi \int_w^e (r)_n dz + \bar{S}_v \Delta V_v \quad (\text{III.24})$$

Donc , l'équation (III.16) devient :

$$J_n - J_w + J_e - J_s = (P_P - P_N)a_n + \bar{S}_v \Delta V_v \quad (\text{III.25})$$

Pour : $i = w, e$

$$G_i = \left[(\rho U)_i \phi_i - \Gamma_i \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_i \right] a_i$$

Pour : $i = s, n$

$$G_i = \left[(\rho V)_i \phi_i - \Gamma_i \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right)_i \right] a_i$$

En multipliant l'équation (III.10) par (V_p) et en la soustrayant de l'équation (III.25) on trouve :

$$\begin{aligned} (J_e - F_e V_p) - (J_w - F_w V_p) + (J_n - F_n V_p) - (J_s - F_s V_p) \\ = (P_P - P_N)a_n + (S_c + S_p V)\Delta V_v \end{aligned} \quad (\text{III.26})$$

Selon Patankar, les termes de la partie gauche de l'équation (III.26) peuvent s'exprimer par:

$$J_e - F_e V_p = A_E (V_p - V_E) \quad (\text{III.27})$$

$$J_w - F_w V_p = A_W (V_W - V_p) \quad (\text{III.28})$$

$$J_n - F_n V_p = A_N (V_P - V_N) \quad (\text{III.29})$$

$$J_s - F_s V_p = A_S (V_S - V_P) \quad (\text{III.30})$$

Après la substitution des équations (III.27), (III.28), (III.29) et (III.30) dans l'équation discrétisée (III.26) on obtient :

$$A_n V_n = A_{wn} V_{wn} + A_{en} V_{en} + A_s V_s + A_{nn} V_{nn} + (P_P - P_N) a_n + b_v \quad (\text{III.31})$$

On peut écrire l'équation (III.31) sous la forme suivante :

$$A_n V_n = \sum A_{vs} V_{vs} + b_v + (P_P - P_N) a_n \quad (\text{III.32})$$

Avec :

$$A_n = A_{wn} + A_{en} + A_s + A_{nn} - S_p \Delta V_v$$

$$b_v = S_c \Delta V_v = 0$$

ΔV_v : volume de contrôle étudiée

V_s : vitesses dans les faces adjacentes.

Selon l'axe (oz) :

L'équation du mouvement sur l'axe (oz) est discrétisée dans le volume de contrôle décalé à droite comme le montre la figure ci-dessous :

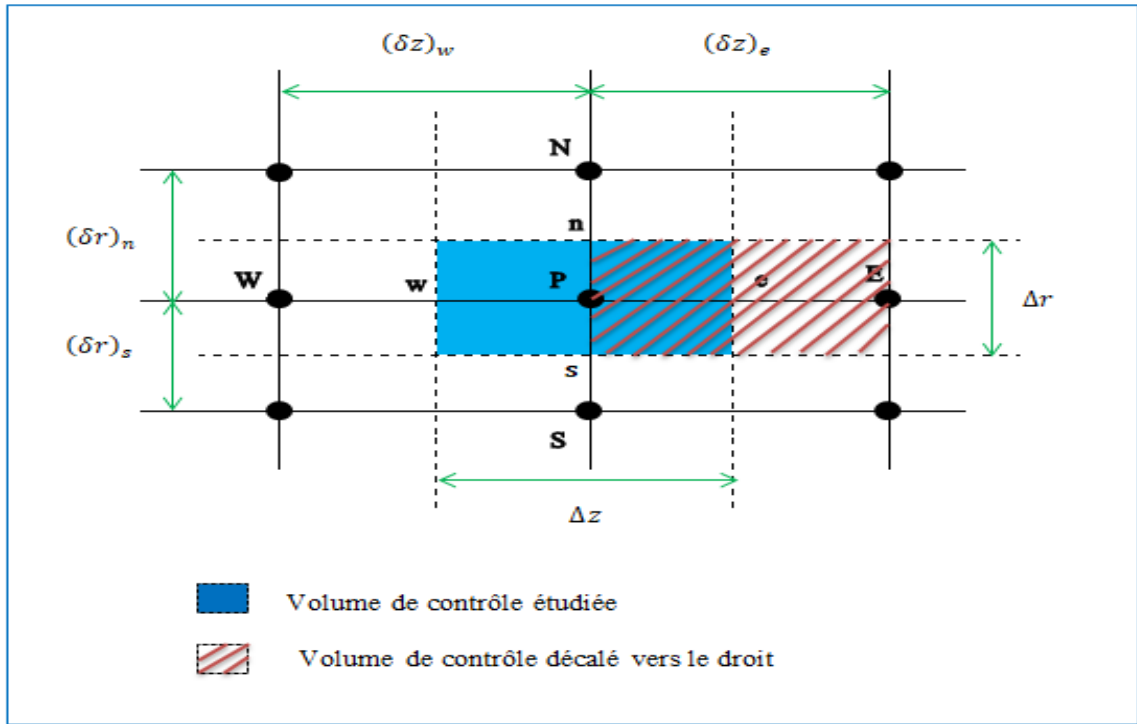


Figure III-4 : Volume de contrôle décalé vers le droit.

L'équation de quantité de mouvement selon l'axe (oz) est comme suit :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V U)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho U U)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{Re_{nf}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right) \right] \quad (\text{III.33})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V U)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho U U)}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_u r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_u \frac{\partial U}{\partial Z} \right) + S_u \quad (\text{III.34})$$

Avec :

$$\Gamma_u = \frac{1}{Re_{nf}}$$

$$S_u = 0$$

Nous intégrons l'équation (III.34) dans un volume de contrôle décalé vers le droit illustré à la figure (III.4) :

$$\int \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V U)}{\partial r} \right] dV + \int \frac{\partial(\rho U U)}{\partial Z} dV = \int -\frac{\partial P}{\partial Z} dV + \int \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_u r \frac{\partial U}{\partial r} \right) dV + \int \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_u \frac{\partial U}{\partial Z} \right) dV + \int S_u dV \quad (\text{III.35})$$

$$\begin{aligned}
& \int_P^E \left[\int_{se}^{ne} \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V U)}{\partial r} r dr \right] + \int_{se}^{ne} \left[\int_P^E \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_u \frac{\partial U}{\partial Z} \right) dz \right] 2\pi r dr \\
& = \int_{se}^{ne} \left[\int_P^E -\frac{\partial P}{\partial Z} dz \right] 2\pi r dr + \int_P^E \left[\int_{se}^{ne} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_u r \frac{\partial U}{\partial r} \right) r dr \right] 2\pi dz \\
& + \int_{se}^{ne} \int_P^E S_u 2\pi r dr dz
\end{aligned} \quad (III.36)$$

On somme les parties similaires et on simplifié, l'équation (III.33) devient :

$$\begin{aligned}
& \int_P^E \left[\int_{se}^{ne} \frac{\partial \left[(\rho r V U) - \left(r \Gamma_u \frac{\partial U}{\partial r} \right) \right]}{\partial r} dr \right] 2\pi dz \\
& + \int_{se}^{ne} \left[\int_P^E \frac{\partial \left[(\rho U U) - \left(\Gamma_u \frac{\partial U}{\partial Z} \right) \right]}{\partial Z} dz \right] 2\pi r dr \\
& = \int_{se}^{ne} \left[\int_P^E -\frac{\partial P}{\partial Z} dz \right] 2\pi r dr + \int_{se}^{ne} \int_P^E S_u 2\pi r dr dz
\end{aligned} \quad (III.37)$$

De la même manière, on obtient une équation discrétisée pour V, sous la forme suivante :

$$A_e U_e = A_w U_w + A_{ee} U_{ee} + A_{se} U_{se} + A_{ne} U_{ne} + (P_P - P_E) a_e + b_u \quad (III.38)$$

L'équation (III.38) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$A_e U_e = \sum A_{vs} U_{vs} + b_u + (P_P - P_E) a_e \quad (III.39)$$

Où :

$$A_e = A_w + A_{ee} + A_{se} + A_{ne} - S_p \Delta V_u$$

$$b_u = S_c \Delta V_u$$

ΔV_u : volume de contrôle étudiée .

U_s : vitesses dans les faces adjacentes.

III.5.3 Discrétisation de l'équation d'énergie

L'équation d'énergie est:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V \theta)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho U \theta)}{\partial Z} = \frac{1}{Re_{nf} \cdot Pr_{nf}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \right] \quad (III.40)$$

On peut écrire l'équation précédente sous la forme suivante :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V \theta)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho U \theta)}{\partial Z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) + S_{\theta} \quad (\text{III.41})$$

Avec :

$$\Gamma_{\theta} = \frac{1}{Re_{nf} \cdot Pr_{nf}}$$

$$S_{\theta} = 0$$

En intégrant l'équation (III.41) sur le volume de contrôle dv , on obtient :

$$\int \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V \theta)}{\partial r} dV + \int \frac{\partial(\rho U \theta)}{\partial Z} dV = \int \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) dV + \int \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) dV + \int S_{\theta} dV \quad (\text{III.42})$$

$$\begin{aligned} & \int_w^e \left[\int_s^n \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V \theta)}{\partial r} r dr \right] 2\pi dz + \int_s^n \left[\int_w^e \frac{\partial(\rho U \theta)}{\partial Z} dz \right] 2\pi r dr = \\ & \int_w^e \left[\int_s^n \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) r dr \right] 2\pi dz + \int_s^n \left[\int_w^e \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) dz \right] 2\pi r dr + \\ & \int_s^n \int_w^e S_{\theta} 2\pi r dr dz \end{aligned} \quad (\text{III.43})$$

Après la somme des parties similaires de l'équation (III.43), on trouve :

$$\begin{aligned} & \int_w^e \left[\int_s^n \frac{\partial \left[(\rho r V \theta) - \left(r \Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \right]}{\partial r} dr \right] 2\pi dz + \int_s^n \left[\int_w^e \frac{\partial \left[(\rho U \theta) - \left(\Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \right]}{\partial z} dz \right] 2\pi r dr \\ & = \int_s^n \int_w^e S_{\theta} 2\pi r dr dz \end{aligned} \quad (\text{III.44})$$

Posant :

$$J'_r = (\rho r V \theta) - \left(r \Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)$$

$$J'_z = (\rho U \theta) - \left(\Gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)$$

L'équation (III.44) devient :

$$\int_w^e \left[\int_s^n \frac{\partial(r J'_r)}{\partial r} dr \right] 2\pi dz + \int_s^n \left[\int_w^e \frac{\partial(J'_z)}{\partial z} dz \right] 2\pi r dr = \int_s^n \int_w^e S_{\theta} 2\pi r dr dz \quad (\text{III.45})$$

En intégrant le côté gauche de l'équation (III.45) , on obtient :

$$G = \int_w^e \left[\int_s^n \frac{\partial(rJ'_r)}{\partial r} dr \right] 2\pi dz + \int_s^n \left[\int_w^e \frac{\partial(J'_z)}{\partial z} dz \right] 2\pi r dr \quad (\text{III.46})$$

$$G = \int_w^e 2\pi [(rJ'_r)_n - (rJ'_r)_s] dz + \int_s^n 2\pi [(rJ'_z)_e - (rJ'_z)_w] dr \quad (\text{III.47})$$

De l'hypothèse de l'uniformité de la vitesse sur les faces du volume étudié, l'équation (III.47) devient :

$$G = (J'_z)_e 2\pi \int_s^n (r)_e dr - (J'_z)_w 2\pi \int_s^n (r)_w dr + (J'_r)_n 2\pi \int_w^e (r)_n dz - (J'_r)_s 2\pi \int_w^e (r)_s dz \quad (\text{III.48})$$

On pose :

$$a_e = 2\pi \int_s^n (r)_e dr$$

$$a_w = 2\pi \int_s^n (r)_w dr$$

$$a_n = 2\pi \int_w^e (r)_n dz$$

$$a_s = 2\pi \int_w^e (r)_s dz$$

On obtient :

$$G = (J'_z)_e a_e - (J'_z)_w a_w + (J'_r)_n a_n - (J'_r)_s a_s \quad (\text{III.49})$$

Utilisant la relation du flux de masse comme suit :

$$J_i = J'_i a_i$$

$$G = J_e - J_w + J_n - J_s \quad (\text{III.50})$$

En intégrant le côté droit de l'équation (III.45), on obtient:

$$D = \int_s^n \int_w^e S_\theta 2\pi r dr dz = \overline{S_\theta} \Delta V \quad (\text{III.51})$$

Tel que :

ΔV : volume de contrôle étudiée .

$\overline{S_\theta}$: représente la valeur moyenne.

$$\overline{S_\theta} = S_c + S_p \theta_p$$

S_c : représente la partie fixe de l'élément S_θ .

S_p : coefficient de θ_p .

Donc , l'équation (III.45) devient :

$$J_e - J_w + J_n - J_s = (S_c + S_p \theta_p) \Delta V \quad (\text{III.52})$$

En multipliant l'équation (III.10) par (θ_p) et en la soustrayant de l'équation (III.50) on trouve :

$$(J_e - F_e \theta_p) - (J_w - F_w \theta_p) + (J_n - F_n \theta_p) - (J_s - F_s \theta_p) = (S_c + S_p \theta_p) \Delta V \quad (\text{III.53})$$

les termes de la partie gauche de l'équation (III.53) peuvent s'exprimer par:

$$J_e - F_e \theta_p = A_E (\theta_p - \theta_E) \quad (\text{III.54})$$

$$J_w - F_w \theta_p = A_W (\theta_W - \theta_p) \quad (\text{III.55})$$

$$J_n - F_n \theta_p = A_N (\theta_P - \theta_N) \quad (\text{III.56})$$

$$J_s - F_s \theta_p = A_S (\theta_S - \theta_P) \quad (\text{III.57})$$

Après la substitution des équations (III.54), (III.55), (III.56) et (III.57) dans l'équation discrétisée (III.53) on obtient :

$$A_P \theta_P = A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_N \theta_N + A_S \theta_S + b_\theta \quad (\text{III.58})$$

Où :

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S - S_p \Delta V$$

$$A_E = D_e A(|P_e|) + \|-F_e, 0\|$$

$$A_W = D_w A(|P_w|) + \|-F_w, 0\|$$

$$A_N = D_n A(|P_n|) + \|-F_n, 0\|$$

$$A_S = D_s A(|P_s|) + \|-F_s, 0\|$$

$$b_\theta = S_c \Delta V$$

Pour : $i = e, w$

$$P_i = \frac{F_i}{D_i} = \frac{(\rho U)_i a_i}{\frac{\Gamma_i}{\partial z} a_i}$$

Pour : $i = s, n$

$$P_i = \frac{F_i}{D_i} = \frac{(\rho V)_i a_i}{\frac{\Gamma_i}{\partial r} a_i}$$

On peut distinguer plusieurs schémas numériques pour atteindre la solution juste, où on va compter sur la loi de puissance PLDS dans notre solution du phénomène étudié, cette loi donne la meilleure approximation de la solution exacte. Signalons que cette forme se distingue des autres systèmes avec les propriétés de la stabilité et la précision, aussi son utilisation généralisée.

Le tableau suivant résume l'expression de la fonction $A(|P_e|)$ pour les différents schémas.

Tableau III-2 : La fonction $A(|P_e|)$ pour différents schémas numériques.

Schéma	La fonction $A(P_e)$
Centré	$1 - 0.5 P_e $
Upwind	1
Hybride	$\ 0, 1 - 0.5 P_e \ $
Power law	$\ 0, (1 - 0.5 P_e)^5\ $
Exponentielle	$\frac{ P_e }{\exp(P_e) - 1}$

III.6 Algorithme de couplage pression – vitesse : SIMPLE

La présence de pression sous la forme gradient des équations de conservation de la quantité de mouvement rend leur solution plus compliquée, principalement parce que cette dernière est inconnue et constitue une des variables du problème. Pour les écoulements incompressibles, la pression est spécifiée indirectement par l'équation de continuité, et le couplage entre pression et vitesse introduit des contraintes sur la solution du champ d'écoulement : si le bon champ de pression est introduit dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement, le champ de vitesse résultant vérifie la équation de continuité. Pour résoudre ce lien (couplage entre vitesse et pression), il est nécessaire d'utiliser un processus itératif. L'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Link Equations) est essentiellement basé sur une procédure « d'estimation et de correction » pour calculer les décalages des composantes de pression et de vitesse sur une grille. Cet algorithme a été bien décrit dans les ouvrages de Patankar et Spalding (1972) et de Patankar (1980).

Les principales opérations de cet algorithme sont les suivantes :

- a) Initialiser et estimer des valeurs de toutes les variables dépendantes p^* , u^* , v^* et T^* .
- b) Résoudre les équations de conservation de quantité de mouvement avec le champ de pression estimé afin d'obtenir les nouvelles valeurs de vitesse u^* et v^* .
- c) Vérifier l'équation de continuité et corriger les valeurs de la pression et du champ de vitesse de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p^* + p' \\ u = u^* + u' \\ v = v^* + v' \end{array} \right.$$

Où (p', u', v') représentent la correction apportée à la pression d'estimation et au champ de vitesse obtenu.

- d) Résoudre l'équation de conservation de l'énergie avec les champs de pression et des vitesses corrigés afin d'obtenir la nouvelle valeur de T .
- e) . Vérifier le critère de convergence : si satisfait arrêter le calcul sinon actualiser les champs de pression, de vitesse et de température et recommencer la procédure depuis le début jusqu'à la convergence de la solution.[41]

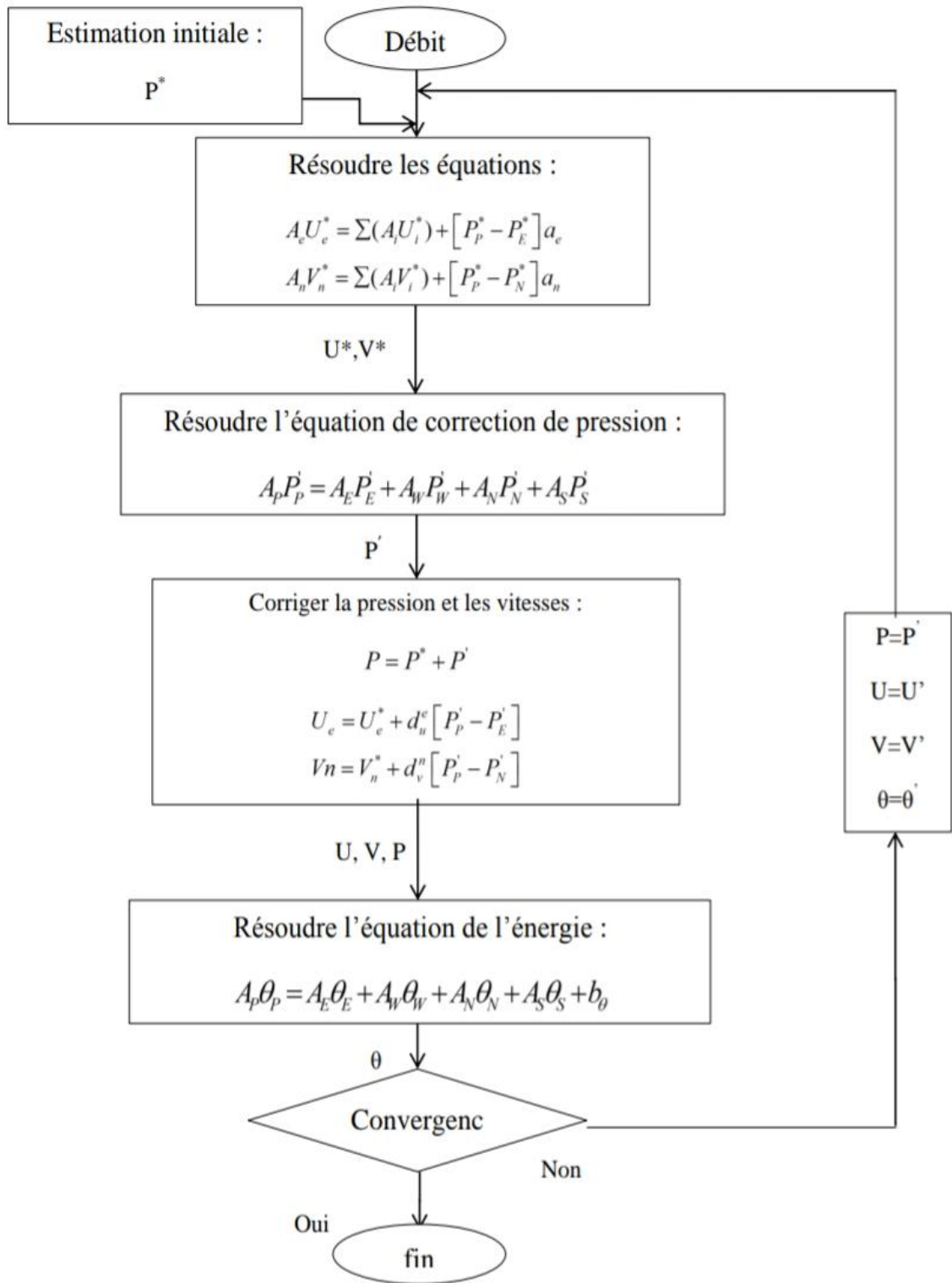


Figure III-5 : Algorithme SIMPLE.

III.7 Résolution du système linéaire des équations discrétisées

III.7.1 Algorithme de THOMAS (TDMA)

C'est un algorithme développé par Thomas [43] en 1949, qui est une méthode directe pour le cas unidimensionnel (1D), mais peut être utilisé de manière itérative ligne par ligne pour résoudre le cas bidimensionnel (2D). La discrétisation par volumes finis donne un système tridiagonal pour le cas 1D, un système penta-diagonal pour le cas 2D et un système septa-diagonal pour le cas 3D. D'autres schémas de discrétisation donnent plusieurs diagonal, par exemple le schéma QUICK donne sept diagonal dans le cas 2D. Dans ce cas on pose deux diagonal dans le terme source.

Le système tridiagonal peut être écrit sous la forme générale :

$$a_i \phi_{i-1} + b_i \phi_i + c_i \phi_{i+1} = d_i \quad (\text{III.59})$$

Sous forme d'une matrice , ce système s'écrit :

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & & & & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & & & & \\ & a_3 & b_3 & c_3 & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ 0 & & & & a_n & b_n & c_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.60})$$

Le calcul se fait de la manière suivante :

- Pour $i=2$, on utilise les équations :

$$P_2 = \frac{b_2}{a_2}, Q_2 = \frac{d_2 + c_2 \phi_1}{a_2} \quad (\text{III.61})$$

- Pour i variant de 3 à $N-1$, on utilise les équations :

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}}, \quad Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (\text{III.62})$$

Avec :

$P_N = 0$ et $Q_N = \phi_N$ (ϕ_N est une condition aux limites) .

- La dernière étape détermine les inconnues, pour i variant de $N-1$ à 1, on utilise l'équation :

$$\phi_i = P_i \phi_{i+1} + Q_i$$

ϕ_1 et ϕ_N sont des valeurs aux limites du domaine .

III.7.2 Application de l'algorithme de THOMAS à des problèmes à 2D (TDMA)

L'algorithme de Thomas (TDMA) peut être appliqué de manière itérative pour résoudre un système d'équations à deux dimensions [44]. Considérons le maillage considéré dans la Figure III.6 et l'équation générale de transport discrétisée comme :

$$\phi_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (\text{III.63})$$

Pour résoudre ce système, l'algorithme de Thomas est appliqué pour une ligne choisie, par exemple la ligne Nord-Sud (N-S). L'équation de transport discrétisée est réarrangée sous la forme :

$$-a_S \phi_S + a_p \phi_p - a_N \phi_N = a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \quad (\text{III.64})$$

Le membre droit de l'équation (III.64) est supposé temporairement connu. L'équation (III.64) est de la même forme que l'équation (III.59), avec :

$$a_i \phi_{i-1} + b_i \phi_i + c_i \phi_{i+1} = d_i$$

$$a_i = -a_S$$

$$b_i = a_p$$

$$c_i = -a_N$$

$$d_i = a_E \phi_E + a_W \phi_W + b$$

On peut maintenant résoudre le système le long de la direction (N-S) de la ligne choisie pour des valeurs $j = 2, 3, 4, \dots, n$ comme indiqué sur la figure III.6.

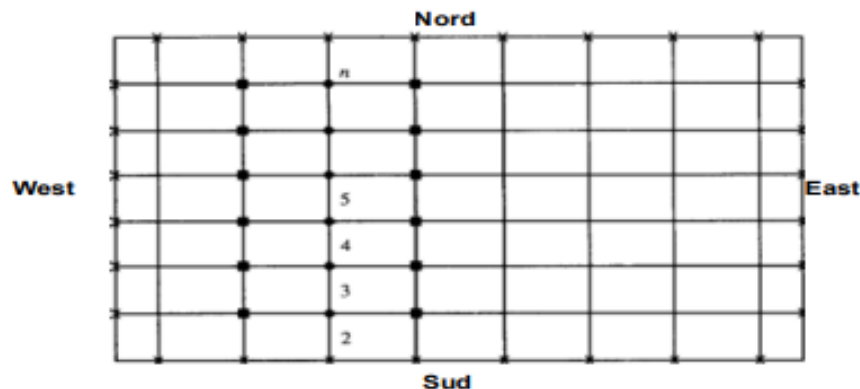


Figure III-6 : Application ligne par ligne de la méthode TDMA

- Points auxquels les valeurs sont calculées
- Points auxquels les valeurs sont considérées être temporairement connues
- ✕ Valeurs connues à la frontière

Du côté gauche de l'équation (III.64), seuls les systèmes tridiagonaux peuvent être efficacement résolus par l'algorithme de Thomas. La solution est d'abord calculée sur la deuxième ligne du volume de contrôle, en supposant que les valeurs de la première ligne sont connues (valeurs connues aux limites) et que les valeurs de la troisième ligne sont considérées comme provisoirement connues. Après avoir calculé le vecteur $[\Phi_2]$ en utilisant l'algorithme de Thomas, nous passons au vecteur $[\Phi_3]$ et supposons que la deuxième ligne a été calculée (dans l'itération précédente) et les valeurs de la quatrième ligne sont supposées être connues provisoirement, puis plus généralement au vecteur $[\Phi_j]$, balayant ainsi toute la zone de résolution. La procédure de calcul ligne par ligne est répétée jusqu'à atteindre la convergence de la solution.

III.8 Critère de convergence

Un critère de convergence ou critère d'arrêt de calcul est un critère qui doit être vérifié lors de l'arrêt d'un calcul. A chaque itération, Fortan peut juger de l'état de convergence en calculant le résidu R_Φ pour chaque variable (pression, composante de vitesse, énergie, etc.). Ce résidu est défini comme :

$$R_{\Phi_{i,j}} = A_{i,j}\Phi_{i,j} - A_{i-1,j}\Phi_{i-1,j} - A_{i+1,j}\Phi_{i+1,j} - A_{i,j-1}\Phi_{i,j-1} - A_{i,j+1}\Phi_{i,j+1} - b_{i,j} \quad (\text{III.65})$$

Où :

R_Φ : la somme absolue des résidus, correspondant à la variable .

Ces résidus nous indiquent à quel point les équations sont déséquilibrées par rapport à chaque variable dans toutes les cellules du domaine. La convergence est déterminée par ces résidus. Il convient de vérifier les résidus et leur évolution d'une part et les valeurs des grandeurs calculées d'autre part. Un choix suffisant de conditions initiales permet d'atteindre une convergence accélérée et une solution stable.[14]

Chapitre IV

Résultats et Interprétations

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de simulations numériques de la convection forcée des nanofluides dans des conduites à section circulaire dans des conditions laminaires et stationnaires. Les résultats obtenus seront discutés en présentant l'influence des paramètres hydrodynamiques et thermiques sur l'amélioration du transfert de chaleur convectif par l'ajout des nanoparticules dans les fluides de base. Les calculs sont effectués à l'aide d'un code FORTRAN, principalement basé sur l'algorithme SIMPLE. Les simulations ont été réalisées sur une grille uniforme (181 x 41), 181 nœuds dans le sens (oz) et 41 nœuds dans le sens (or).

Les résultats obtenus sont présentés sous la forme suivante:

- ✓ Procédure de résolution et de convergence ;
- ✓ Validation du code de calcul ;
- ✓ Choix du maillage ;
- ✓ Effet de la concentration volumique sur le coefficient de convection ;
- ✓ Effet de la concentration volumique sur la chute de pression ;
- ✓ Effet de la concentration volumique sur la performance thermique ;
- ✓ Comparaison du h_{moyen} des différent nanofluides ;
- ✓ Comparaison du PTH des différent nanofluides ;

IV.2 Procédure de résolution et de convergence

La solution est considérée obtenue lorsque les variables calculées (U , V , P , θ) deviennent invariantes aux cours du processus itératif (les variations négligeables aux itérations). La convergence est contrôlée en calculant le résidu des équations algébriques obtenues à partir de la discrétisation des équations gouvernantes, la forme finale des équations dictées est :

$$A_{i,j}\phi_{i,j} = A_{i-1,j}\phi_{i-1,j} + A_{i+1,j}\phi_{i+1,j} + A_{i,j-1}\phi_{i,j-1} + A_{i,j+1}\phi_{i,j+1} + b_{i,j} \quad (\text{IV.1})$$

Où : $\phi = U, V, \theta$

Le résidu $R_{\phi_{i,j}}$ est calculé à chaque itération à partir de l'équation (IV. 2) comme suit :

$$R_{\phi_{i,j}} = A_{i,j}\phi_{i,j} - A_{i-1,j}\phi_{i-1,j} - A_{i+1,j}\phi_{i+1,j} - A_{i,j-1}\phi_{i,j-1} - A_{i,j+1}\phi_{i,j+1} - b_{i,j} \quad (\text{IV.2})$$

La convergence n'a été considérée comme atteinte que lorsque le résidu maximal dans tous les volumes de contrôle du domaine de calcul est inférieur à 10^{-6} ($Ru_{\text{max}} < 10^{-6}$ et $Rv_{\text{max}} < 10^{-6}$ et $RT_{\text{max}} < 10^{-6}$) figures sous dessous montrent la variation du résidu et h_{moyen} avec des itérations qui illustrent que la solution est approximativement convergée après 1200 itérations.

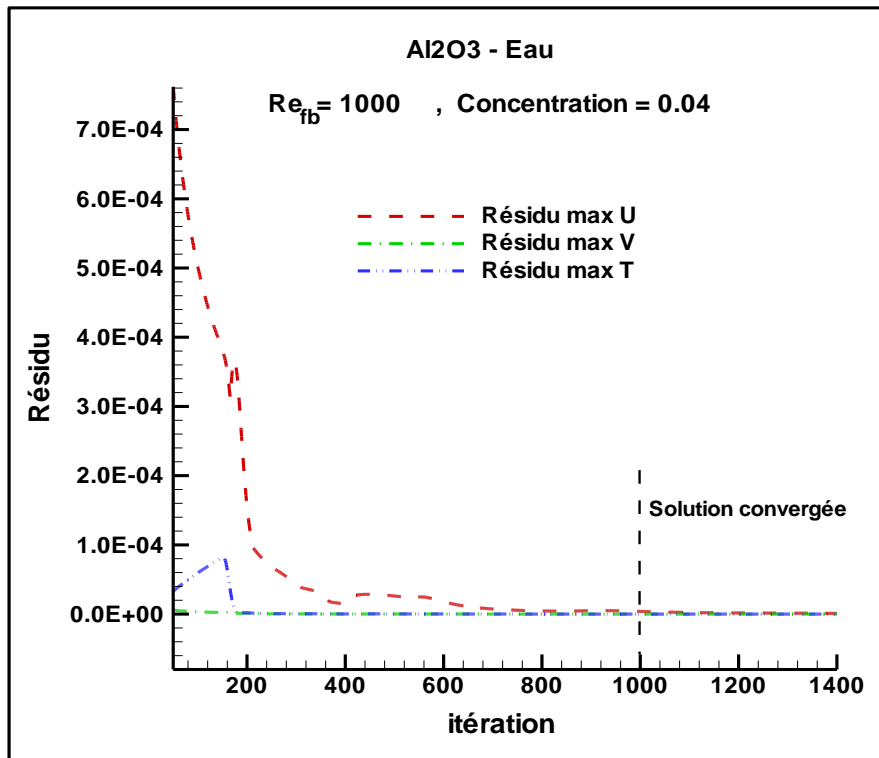


Figure IV-1 : Variation des Résidus au cours du calcul itératif pour Al₂O₃-Eau

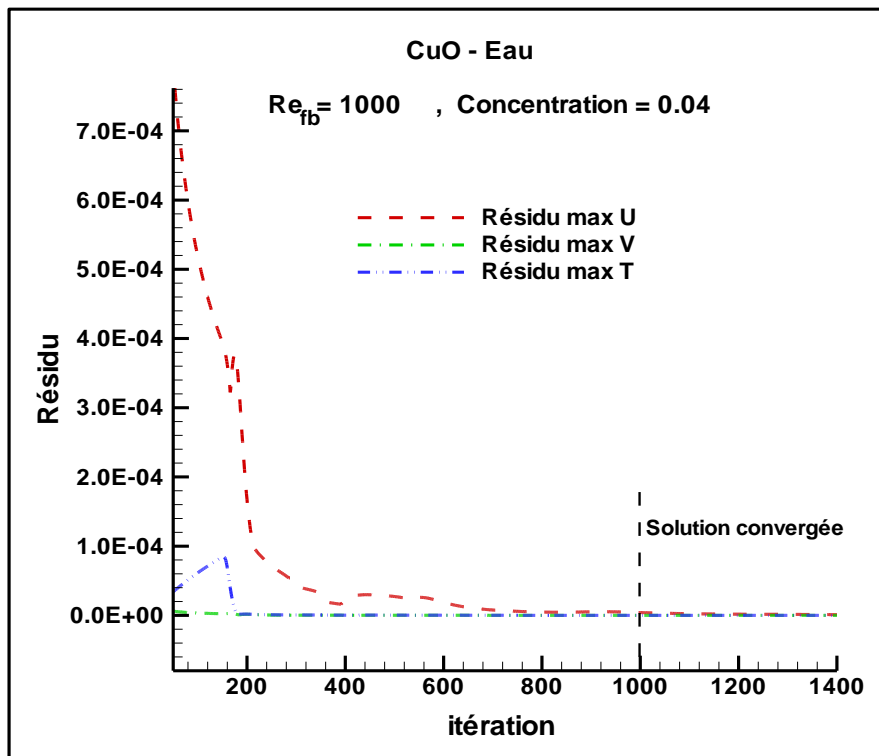


Figure IV-2 : Variation de Résidu avec itération pour CuO-Eau

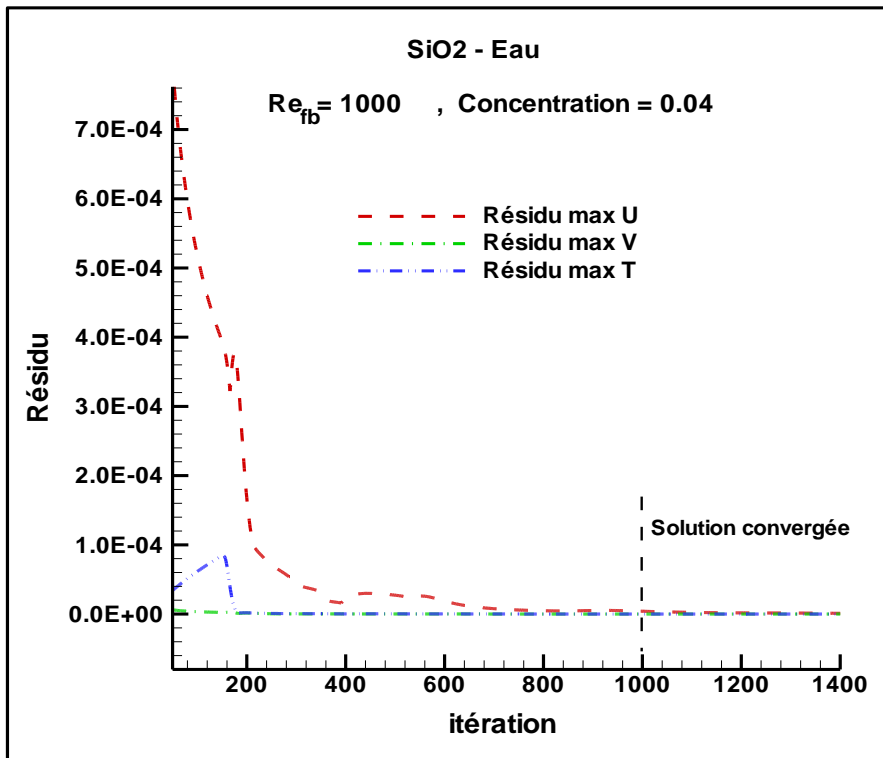


Figure IV-3 : Variation de Résidu avec itération pour SiO₂ – Eau

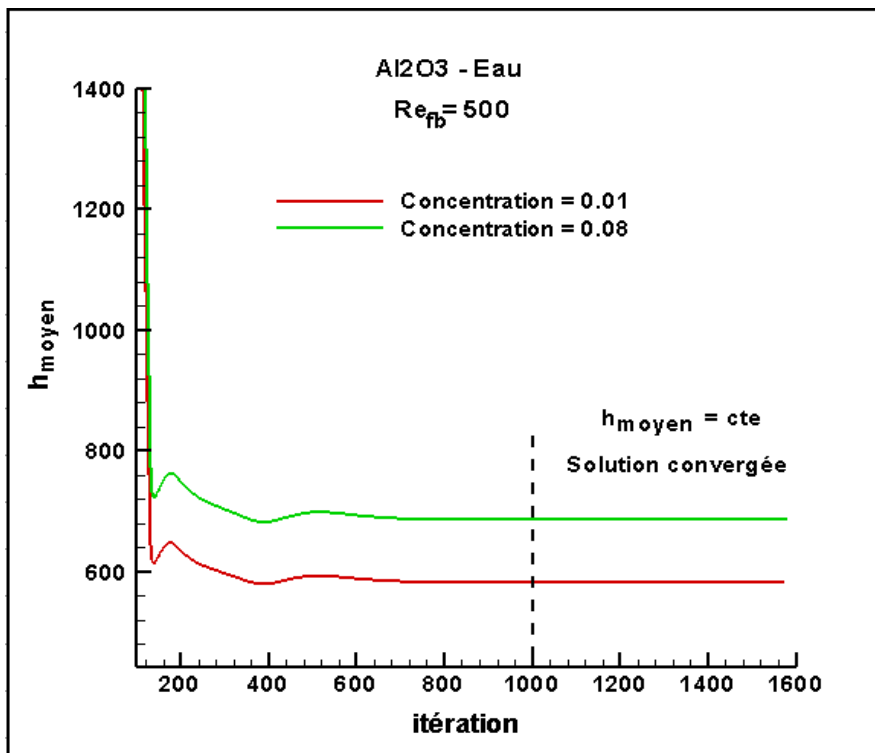


Figure IV-4 : Variation du h_{moyen} avec itération pour Al₂O₃ - Eau

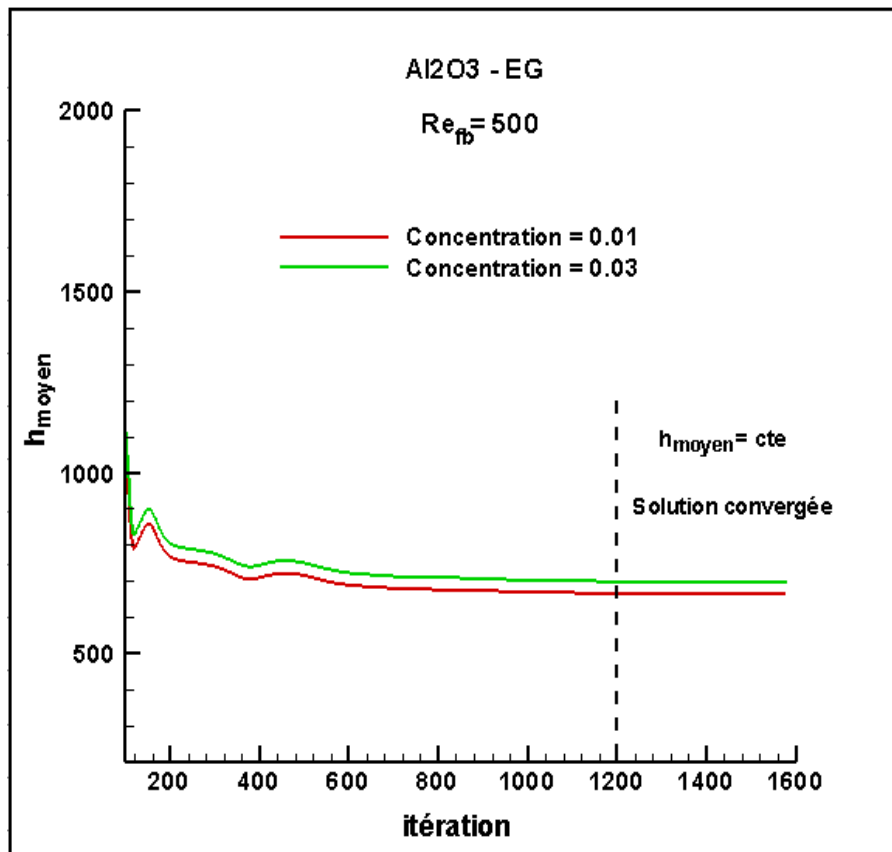


Figure IV-5 : Variation du h_{moyen} avec itération pour Al₂O₃ – EG .

IV.3 Validation du code de calcul

La vérification de la fiabilité de la méthode de résolution et le programme de calcul de cette simulation est basée sur deux comparaisons différentes:

- **1^{ère} comparaison :** Le tableau IV-1 montre une comparaison entre le coefficient de perte de charge analytique ($f_{analytique} = 64/Re_{nf}$) et le coefficient de perte de charge numérique ($f_{numérique}$) en changeant la concentration(ϕ) de 0 à 0,08 dans chaque cas. On peut remarquer que les deux solution sont très proches et les différences entre eux sont négligeables.

Tableau IV-1: Comparaison entre $f_{analytique}$ et $f_{numérique}$ du CuO–Eau

ϕ	Re_f	Re_{nf}	$f_{analytique}$	$f_{numérique}$	Erreur relative
0	500	500	0.128	0.1284	0.3704 %
0.01		514.5225	0.1243	0.1249	0.4334 %
0.02		527.8818	0.1212	0.1218	0.4978 %
0.03		540.1078	0.1184	0.1191	0.5632 %
0.04		551.2300	0.1161	0.1168	0.6120 %
0.05		561.2777	0.1140	0.1147	0.6790 %
0.06		570.2802	0.1122	0.1130	0.7248 %
0.07		578.2664	0.1106	0.1115	0.7740%
0.08		585.2649	0.1093	0.1102	0.8161 %

2^{ème} comparaison : La figure IV-6 montre une comparaison entre le coefficient de transfert de chaleur convectif moyen calculé numériquement par notre code et la solution de Bianco [24]. La comparaison a été effectuée pour le cas d'un écoulement laminaire de nanofluide à l'intérieur d'un tube soumis à une densité de flux de chaleur uniforme et constante $\dot{q}_p = 5000 \text{ [w/m}^2\text{]}$, pour deux fractions volumiques de $\phi = 0\%$ et $\phi = 4\%$ avec $Re_{nf} = 250$. La comparaison illustre qu'un bon accord a été trouvé entre les résultats de ce code et ceux montrés dans [24], où la différence maximale en tant qu'erreur relative entre les deux solutions est négligeable.

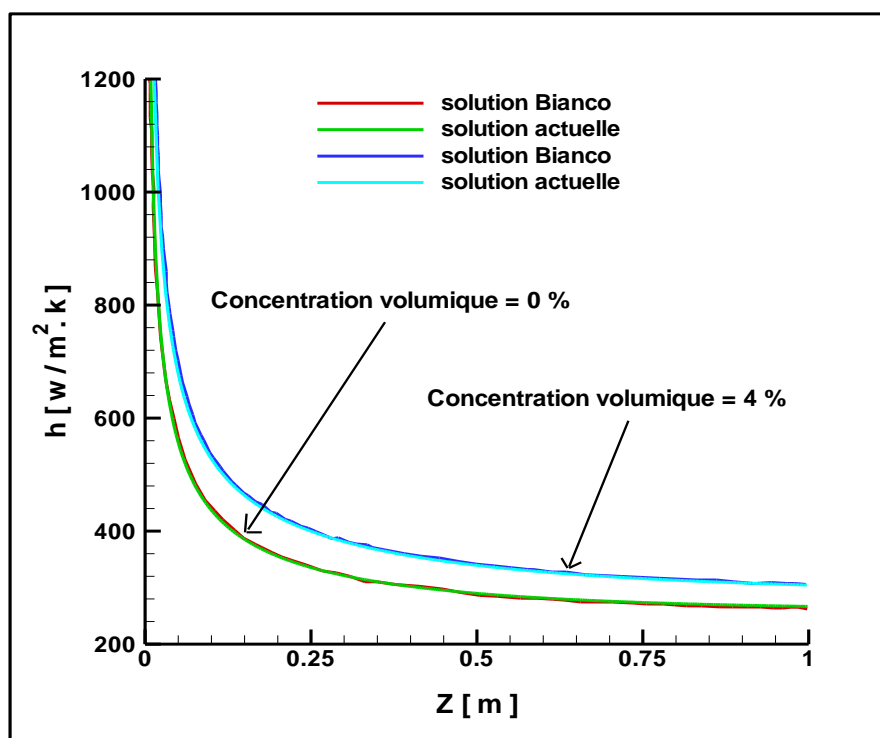


Figure IV-6 : Comparaison entre les résultats actuels et ceux de Bianco[24].

IV.4 Choix du maillage :

La choix du maillage du domaine de calcul est une étape cruciale dans la simulation numérique, qui a une grande influence sur la précision des résultats et le temps de calcul. Pour optimiser ces paramètres, nous avons effectué plusieurs simulations de la variation du coefficient de convection moyen et du coefficient de frottement moyen pour différentes tailles de maille. Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau pour $Re_{fb}=500$ et $\phi = 4\%$. Les résultats montrent que le nombre des mailles (181 x 41) est suffisants pour assurer une grande précision dans la résolution du phénomène étudié. Ce choix est basé sur la stabilité des valeurs du nombre de Nusselt et du coefficient de frottement, notamment pour les trois derniers maillages. Toute augmentation de la taille de la grille supérieure à (181 x 41) augmente le temps d'exécution sans améliorer la précision de la solution.

Tableau IV-2 : Nombre de Nusselt moyen et facteur de frottement du CuO-Eau à $Re_{fb}=1000$ et $\phi = 4\%$

Maillage	121 x 11	141 x 21	161 x 31	181 x 41	181 x 51	201 x 61
\overline{Nu}	10.59	10.53	10.52	10.53	10.53	10.53
\overline{f}	0.141	0.140	0.140	0.141	0.141	0.142

IV.5 Résultats et discussion

Les résultats incluent l'influence de l'ajout des nanoparticules (Al_2O_3 , CuO et SiO_2) dans deux fluides de base (Eau, EG) sur le coefficient moyen de la convection et la chute de pression pour différentes concentrations volumiques (0% à 8%) et deux nombres de Reynolds différents ($Re_{fb} = 500$ et $Re_{fb} = 1500$). De plus, une comparaison des facteurs PTH de trois nanofluides différents sera envisagée pour sélectionner le type de nanofluide qui peut fournir une meilleure amélioration du transfert de chaleur avec une augmentation raisonnable de la puissance de pompage. Tous les calculs sont fait pour une longueur sans dimension ($L/D = 40$) et une densité de flux thermique fixée à $\dot{q}_p = 15000$ [w/m²]

Tableau IV-3 : Les propriétés thermophysiques de différentes nanoparticules et de différents fluides de base à $T= 300$ (K) [45].

Propriétés thermophysiques	Eau	Ethylène Glycol	Al ₂ O ₃	CuO	SiO ₂
ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	996.5	1114.4	3600	6500	2200
C_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	4181	2415	765	533	745
λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0.613	0.252	36	17.65	1.4
μ [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]	0.001	0.0157	-	-	-

IV.5.1 Effet de la concentration sur le coefficient de convection

L'effet de la concentration des nanoparticules Al₂O₃, CuO et SiO₂ sur le coefficient de convection moyen pour les deux fluides de base (Eau et Ethylène Glycol) est présenté dans les figures : IV-7 et IV-8 à deux valeurs de nombre de Reynolds 500 et 1500. La fraction volumique varie de 0% à 8%. Les résultats obtenus révèlent que :

- L'ajout de nanoparticules à l'eau pure et à l'Ethylène Glycol pure a un effet positif sur le coefficient convectif de transfert de chaleur, où la valeur du coefficient convectif du nanofluide est supérieure à celle du fluide de base .
- L'amélioration considérable du transfert de chaleur par convection est obtenue par les nanoparticules CuO et Al₂O₃ , ceci en raison de leurs conductivités thermiques élevées.
- L'amélioration du transfert de chaleur par convection par l'utilisation des nanoparticules SiO₂ n'est pas significative, car l'augmentation de sa conductivité thermique avec l'augmentation de la concentrations est faible .
- Les valeurs du \bar{h} trouvées pour ($Re_{fb} = 500$) sont supérieures aux celles du ($Re_{fb} = 1500$). Par conséquent, un transfert de chaleur amélioré peut être obtenu en augmentant la vitesse d'écoulement.

Selon les tableaux : IV-4, IV-5, IV-6 et IV-7 , on remarque que :

- $h_{moyen} (CuO-Eau) > h_{moyen} (Al_2O_3-Eau) > h_{moyen} (SiO_2-Eau)$
- $h_{moyen} (CuO-EG) > h_{moyen} (Al_2O_3-EG) > h_{moyen} (SiO_2-EG)$
- Les valeurs maximales d'amélioration du taux de transfert de chaleur sont obtenus pour la concentration 8% où le pourcentage d'amélioration du :
 - Al₂O₃-Eau est: 20.8% à $Re_{fb}= 500$ et 20.5% à $Re_{fb}=1500$
 - CuO-Eau est: 27.5% à $Re_{fb}= 500$ et 28.3% à $Re_{fb}=1500$

- SiO₂-Eau est: 16.9% à Re_{fb}= 500 et 16% à Re_{fb}=1500
- Al₂O₃-EG est: 15.9% à Re_{fb}= 500 et 20.2% à Re_{fb}=1500
- CuO-EG est: 27.3% à Re_{fb}= 500 et 27.6% à Re_{fb}=1500
- SiO₂-EG est: 9.8% à Re_{fb}= 500 et 15.5% à Re_{fb}=1500

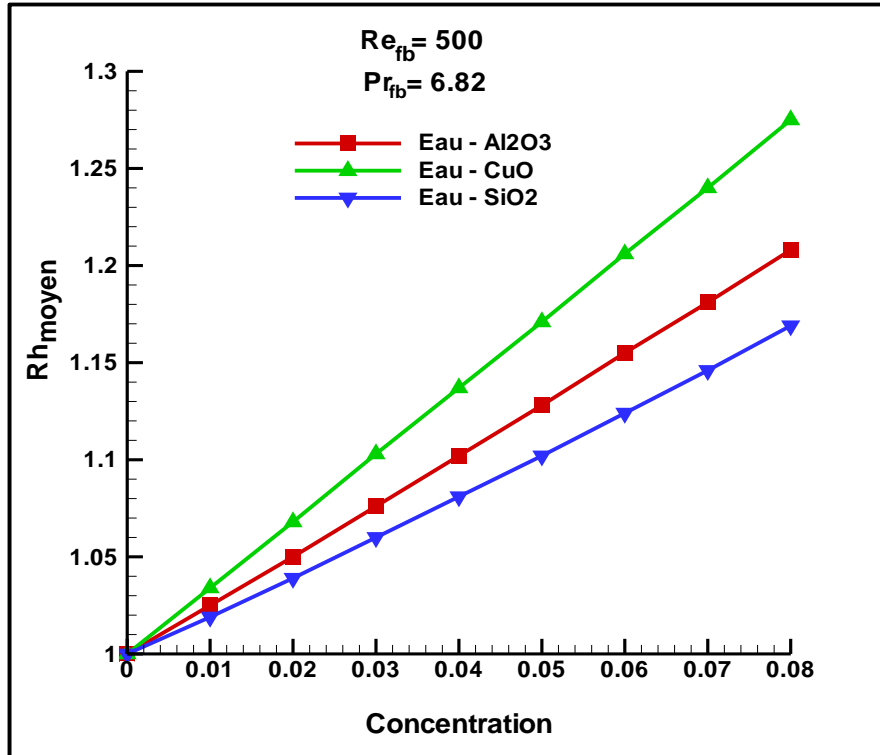
1^{er} cas : l'eau fluide de base

Tableau IV-4 : Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour Re_{fb} =500

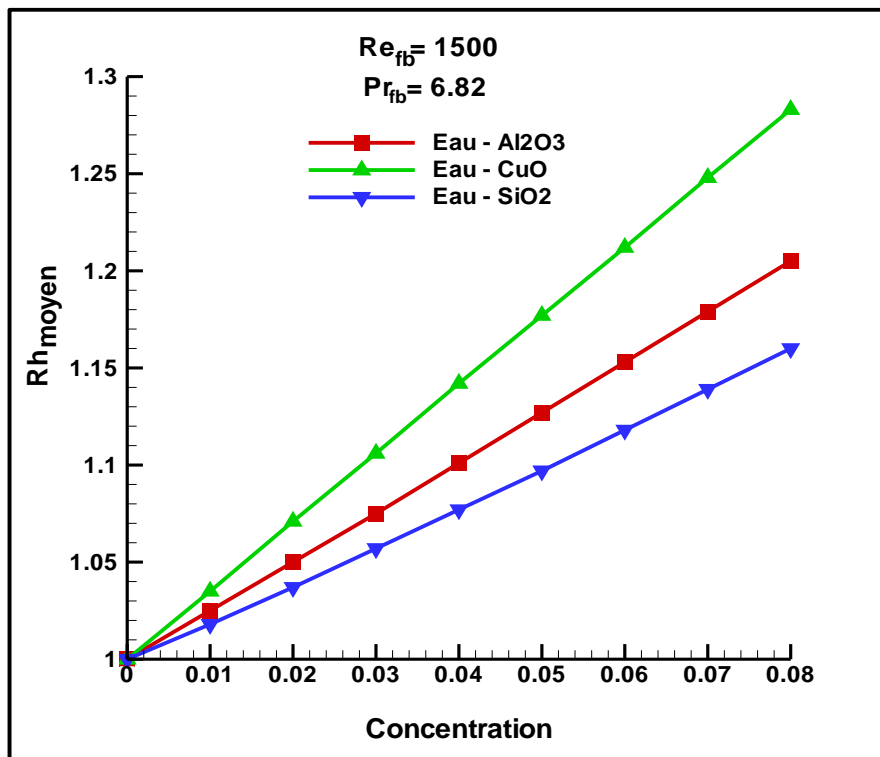
Al ₂ O ₃ – Eau			CuO - Eau			SiO ₂ – Eau		
ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$	ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$	ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$
0	565.743	1	0	565.743	1	0	565.743	1
0.01	580.095	1.025	0.01	585.224	1.034	0.01	576.832	1.019
0.02	594.553	1.050	0.02	604.682	1.068	0.02	588.191	1.039
0.03	609.119	1.076	0.03	624.131	1.103	0.03	599.811	1.060
0.04	623.796	1.102	0.04	643.582	1.137	0.04	611.687	1.081
0.05	638.587	1.128	0.05	663.043	1.171	0.05	623.812	1.102
0.06	653.495	1.155	0.06	682.525	1.206	0.06	636.180	1.124
0.07	668.523	1.181	0.07	702.036	1.240	0.07	648.784	1.146
0.08	683.674	1.208	0.08	721.582	1.275	0.08	661.619	1.169

Tableau IV-5: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour Re_{fb} =1500

Al ₂ O ₃ -Eau			CuO-Eau			SiO ₂ -Eau		
ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$	ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$	ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$
0	861.421	1.000	0	861.421	1.000	0	861.421	1
0.01	883.098	1.025	0.01	892.142	1.035	0.01	877.551	1.018
0.02	904.892	1.050	0.02	922.765	1.071	0.02	894.016	1.037
0.03	926.806	1.075	0.03	953.313	1.106	0.03	910.816	1.057
0.04	948.841	1.101	0.04	983.801	1.142	0.04	927.942	1.077
0.05	971.001	1.127	0.05	1014.248	1.177	0.05	945.380	1.097
0.06	993.287	1.153	0.06	1044.663	1.212	0.06	963.117	1.118
0.07	1015.704	1.179	0.07	1075.064	1.248	0.07	981.144	1.139
0.08	1038.247	1.205	0.08	1105.456	1.283	0.08	999.442	1.160



(a) $Re_{fb} = 500$



(b) $Re_{fb} = 1500$

Figure IV-7: Effet de la concentration sur Rh_{moyen} cas de l'eau fluide de base

(a) $Re_{fb} = 500$, (b) $Re_{fb} = 1500$

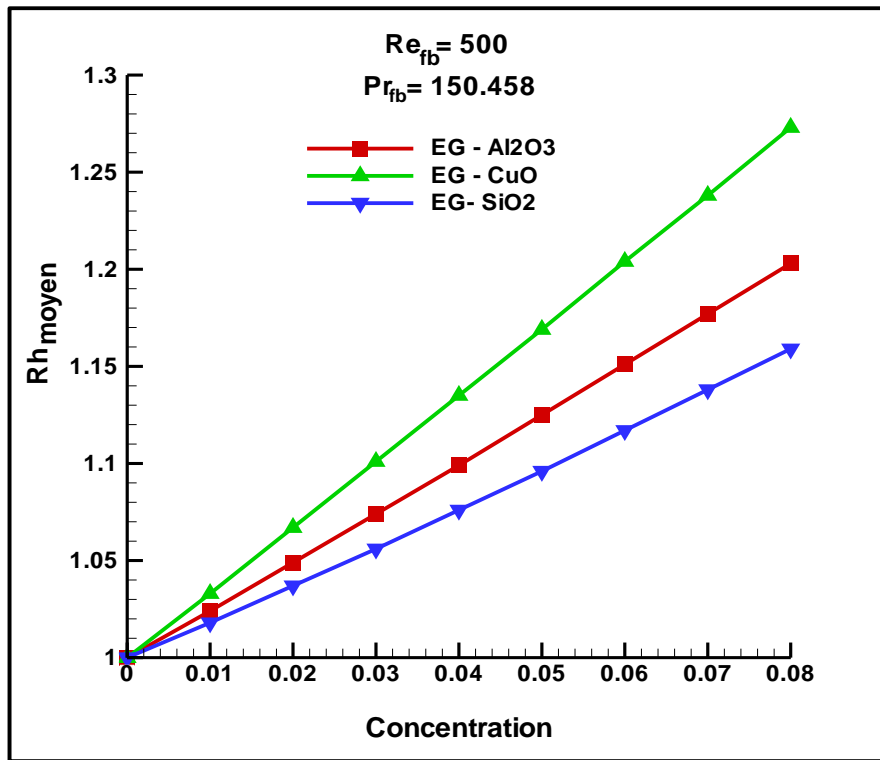
2^{ème} cas : Ethylène Glycol fluide de base

Tableau IV-6: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 500$

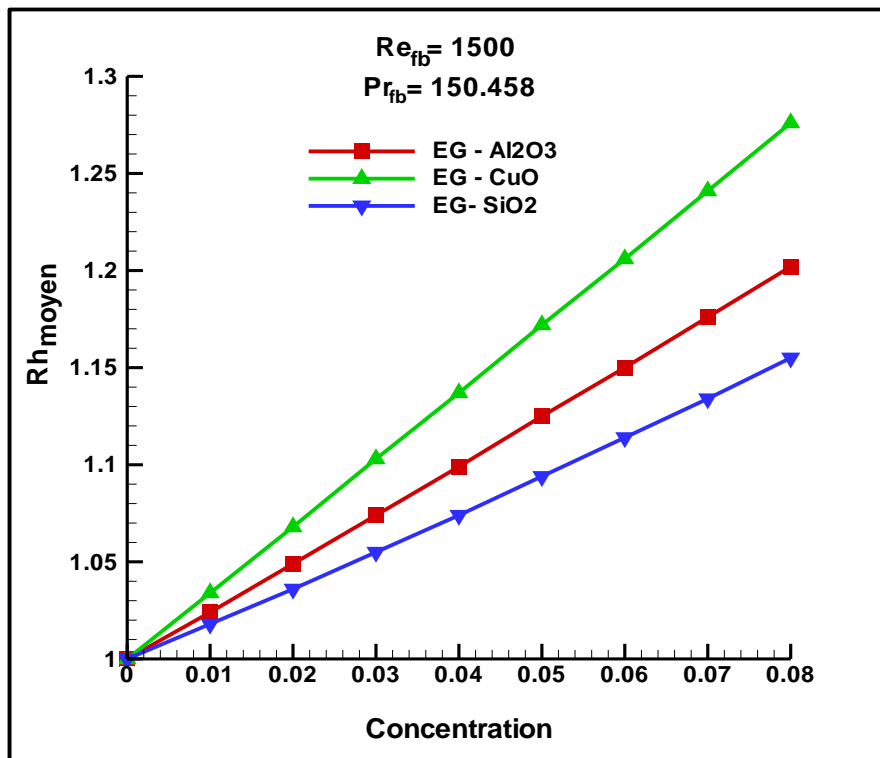
Al ₂ O ₃ -EG			CuO-EG			SiO ₂ -EG		
ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$	ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$	ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$
0	646.185	1	0	646.185	1	0	646.185	1
0.01	658.156	1.018	0.01	668.041	1.033	0.01	654.108	1.012
0.02	670.405	1.037	0.02	689.939	1.067	0.02	662.044	1.024
0.03	682.921	1.056	0.03	711.893	1.101	0.03	669.990	1.036
0.04	695.700	1.076	0.04	733.905	1.135	0.04	677.953	1.049
0.05	708.732	1.096	0.05	755.991	1.169	0.05	685.929	1.061
0.06	721.999	1.117	0.06	778.156	1.204	0.06	693.912	1.073
0.07	735.505	1.138	0.07	800.411	1.238	0.07	701.913	1.086
0.08	749.236	1.159	0.08	822.760	1.273	0.08	709.929	1.098

Tableau IV-7: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 1500$

Al ₂ O ₃ -EG			CuO-EG			SiO ₂ -EG		
ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$	ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$	ϕ	\bar{h}	$R_{\bar{h}}$
0	997.985	1	0	997.985	1	0	997.985	1
0.01	1022.593	1.024	0.01	1032.253	1.034	0.01	1016.170	1.018
0.02	1047.381	1.049	0.02	1066.547	1.068	0.02	1034.604	1.036
0.03	1072.353	1.074	0.03	1100	1.103	0.03	1053.424	1.055
0.04	1097.474	1.099	0.04	1135.348	1.137	0.04	1072.617	1.074
0.05	1122.766	1.125	0.05	1169.865	1.172	0.05	1092.203	1.094
0.06	1148.230	1.150	0.06	1204.482	1.206	0.06	1112.134	1.114
0.07	1173.871	1.176	0.07	1239.232	1.241	0.07	1132.394	1.134
0.08	1199.710	1.202	0.08	1274.083	1.276	0.08	1152.988	1.155



(a) $Re_{fb} = 500$



(b) $Re_{fb} = 1500$

Figure IV-8: Effet de la concentration sur Rh_{moyen} cas de l'Ethylène Glycol fluide de base
(a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$.

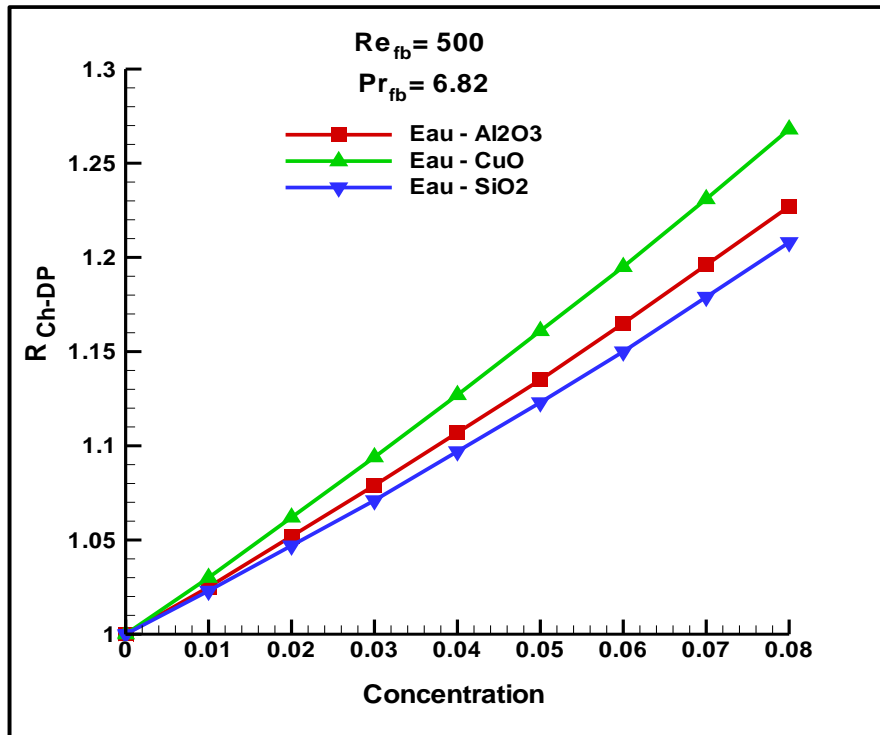
IV.5.2 Influence de la concentration volumique sur la chute de pression

La section précédente montre que l'emploi du nanofluide a un effet positif sur le transfert de chaleur mais il est important de connaître son effet sur la chute de pression (perte des charges) . Dans cette section, la variation de la chute de pression à l'intérieur du tube en fonction de la concentration de nanoparticules est affichée sur les figures : IV-9 et IV-11, où ϕ varie de 0 % à 8 %.

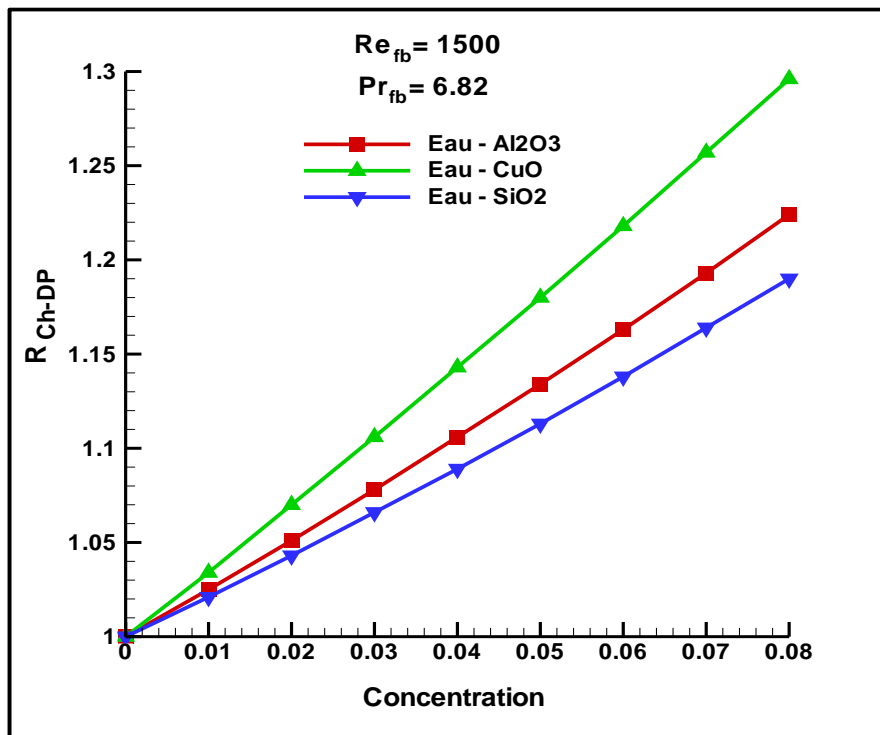
On peut voir que:

- La chute de pression est proportionnelle à la concentration, où tous les types des nanofluides étudiés dans ce travail ont un effet négatif sur la perte de charge par rapport à les deux fluide de base (Eau et EG), car l'augmentation de la concentration produit une augmentation des pertes de charge. Par conséquent, augmente la puissance de pompage.
- Les figures : IV-10 et IV-12, illustrent que tout ajout des nanoparticules à la base fluide fait augmenter la densité du nanofluide, ce qui entraîne l'augmentation des valeurs de chute de pression.
- la chute de pression la plus élevée est produite par les nanofluides CuO-Eau et CuO-EG car ils ont une densité volumique maximale par rapport aux autres nanofluides suivi par une chute de pression moyenne trouvée respectivement pour $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-EG}$. Tandis que la plus faible est atteinte pour $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ et $\text{SiO}_2\text{-EG}$.
- Les pertes de charge calculées pour ($\text{Re}_{fb}=1500$) sont supérieures à celle du ($\text{Re}_{fb}=500$) pour tous les types des nanofluides utilisés dans notre étude. Par conséquent, la puissance de la pompe augmente par l'augmentation de la vitesse d'écoulement.

1^{er} cas : l'eau fluide de base



(a) $Re_{fb} = 500$



(b) $Re_{fb} = 1500$

Figure IV-9: Effet de la concentration sur $R_{h_{moyen}}$ cas de l'Eau fluide de base

(a) $Re_{fb} = 500$, (b) $Re_{fb} = 1500$

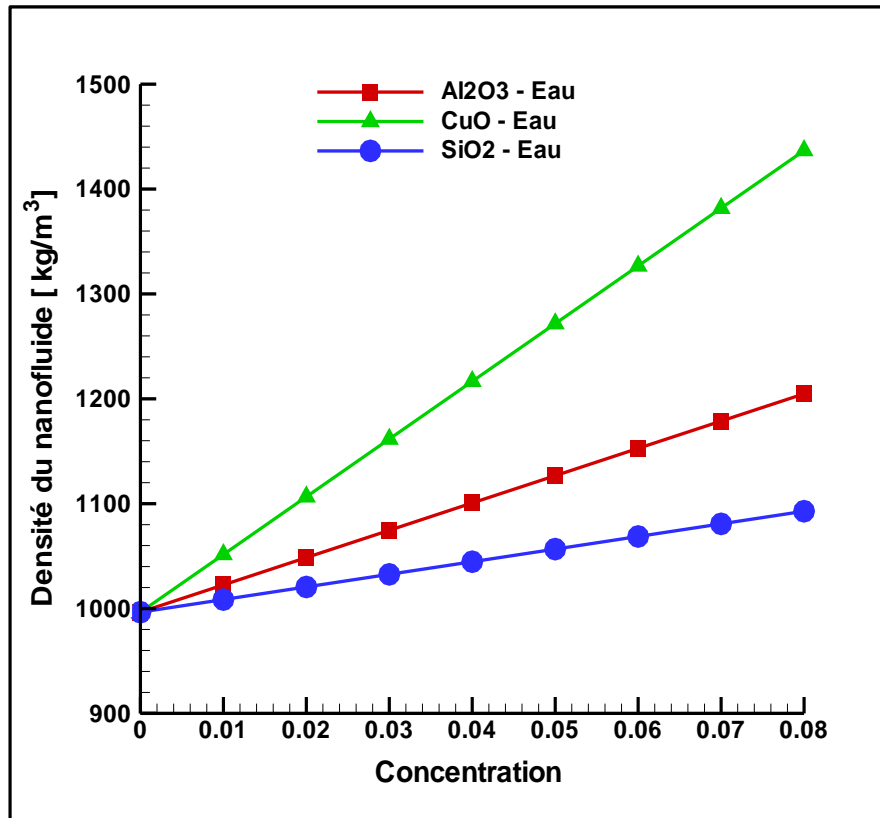


Figure IV-10: Effet de la concentration sur la densité volumique du nanofluid cas de l'eau fluide de base .

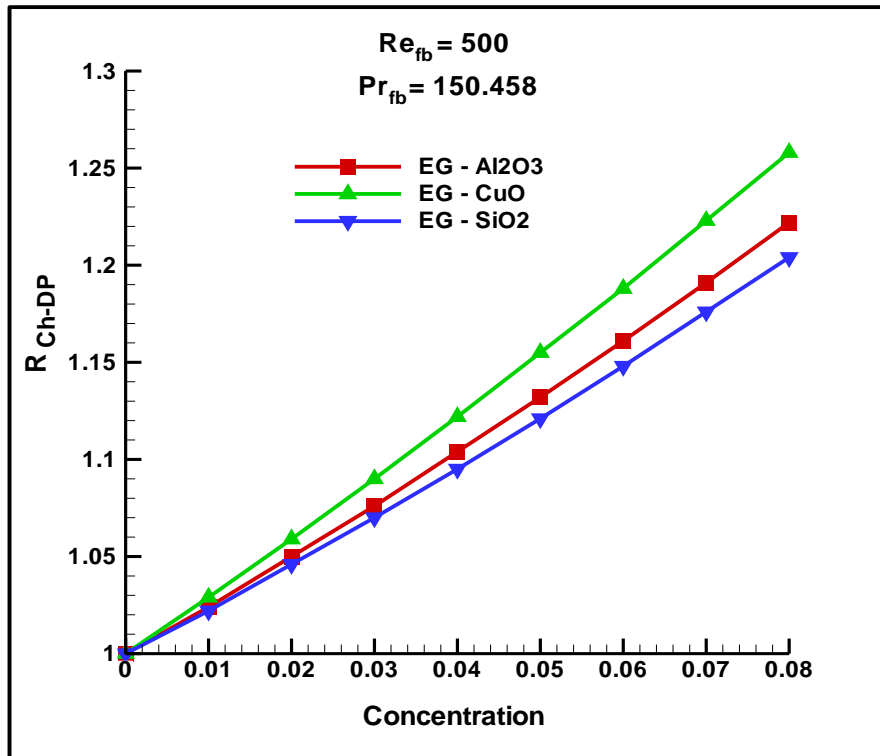
Tableau IV-8: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\Delta P}$ pour $Re_{fb} = 500$

Al ₂ O ₃ -Eau			CuO-Eau			SiO ₂ -Eau		
ϕ	ΔP	$R_{\Delta P}$	ϕ	ΔP	$R_{\Delta P}$	ϕ	ΔP	$R_{\Delta P}$
0	7.555	1	0	7.555	1	0	7.555	1
0.01	7.749	1.025	0.01	7.787	1.030	0.01	7.730	1.023
0.02	7.947	1.052	0.02	8.024	1.062	0.02	7.910	1.047
0.03	8.152	1.079	0.03	8.267	1.094	0.03	8.097	1.071
0.04	8.363	1.107	0.04	8.516	1.127	0.04	8.289	1.097
0.05	8.581	1.135	0.05	8.772	1.161	0.05	8.488	1.123
0.06	8.806	1.165	0.06	9.035	1.195	0.06	8.694	1.150
0.07	9.037	1.196	0.07	9.304	1.231	0.07	8.907	1.179
0.08	9.277	1.227	0.08	9.582	1.268	0.08	9.128	1.208

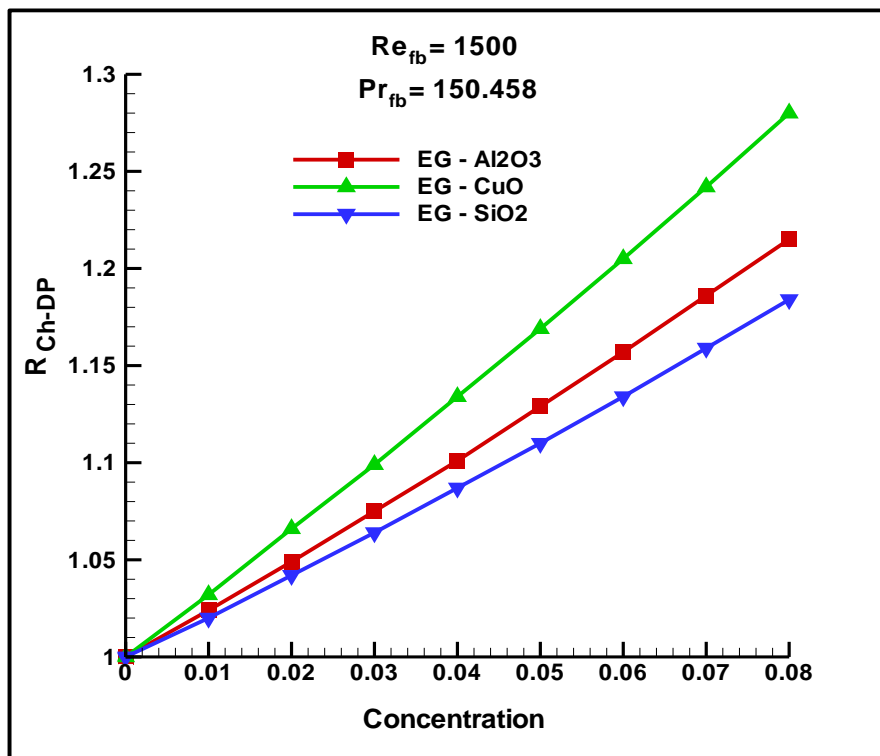
Tableau IV-9: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\Delta P}$ pour $Re_{fb} = 1500$

Al ₂ O ₃ -Eau			CuO-Eau			SiO ₂ -Eau		
ϕ	ΔP	$R_{\Delta P}$	ϕ	ΔP	$R_{\Delta P}$	ϕ	ΔP	$R_{\Delta P}$
0	29.761	1.000	0	29.761	1.000	0	29.761	1
0.01	30.524	1.025	0.01	30.799	1.034	0.01	30.390	1.021
0.02	31.307	1.051	0.02	31.855	1.070	0.02	31.052	1.043
0.03	32.108	1.078	0.03	32.926	1.106	0.03	31.734	1.066
0.04	32.930	1.106	0.04	34.018	1.143	0.04	32.433	1.089
0.05	33.773	1.134	0.05	35.128	1.180	0.05	33.151	1.113
0.06	34.639	1.163	0.06	36.262	1.218	0.06	33.890	1.138
0.07	35.528	1.193	0.07	37.416	1.257	0.07	34.649	1.164
0.08	36.447	1.224	0.08	38.598	1.296	0.08	35.432	1.190

2^{ème} cas : Ethylène Glycol fluide de base



(a) $Re_{fb} = 500$



(b) $Re_{fb} = 1500$

Figure IV-11 : Effet de la concentration sur $R_{h_{moyen}}$ cas de l'Ethylène Glycol fluide de base

(a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$

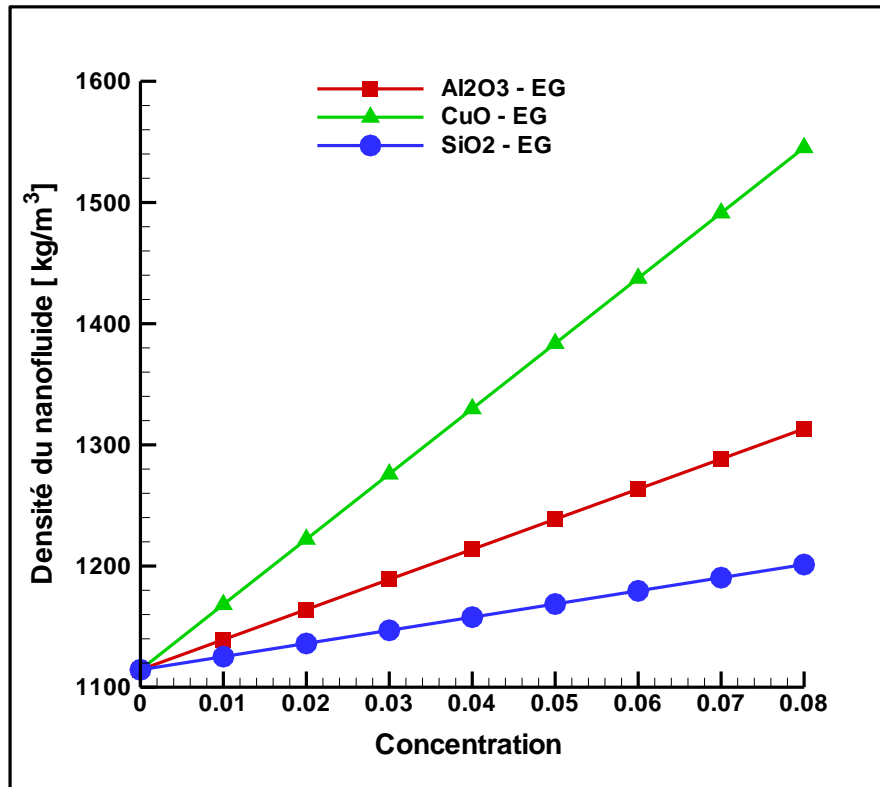


Figure IV-12 : Effet de la concentration sur la densité volumique du nanofluide cas de l'Ethylène Glycol fluide de base .

Tableau IV-10: Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 500$

Al ₂ O ₃ – EG			CuO - EG			SiO ₂ – EG		
\emptyset	ΔP	$R_{\Delta P}$	\emptyset	ΔP	$R_{\Delta P}$	\emptyset	ΔP	$R_{\Delta P}$
0	1665.417	1	0	1665.417	1	0	1665.417	1
0.01	1703.236	1.022	0.01	1714.423	1.029	0.01	1703.236	1.022
0.02	1742.304	1.046	0.02	1764.684	1.059	0.02	1742.304	1.046
0.03	1782.704	1.070	0.03	1816.236	1.090	0.03	1782.704	1.070
0.04	1824.451	1.095	0.04	1869.202	1.122	0.04	1824.451	1.095
0.05	1867.634	1.121	0.05	1923.594	1.155	0.05	1867.634	1.121
0.06	1912.360	1.148	0.06	1979.515	1.188	0.06	1912.360	1.148
0.07	1958.462	1.176	0.07	2037.008	1.223	0.07	1958.642	1.176
0.08	2006.581	1.204	0.08	2096.188	1.258	0.08	2006.281	1.204

Tableau IV-11 : Effet de la concentration sur \bar{h} et $R_{\bar{h}}$ pour $Re_{fb} = 1500$

Al ₂ O ₃ – EG			CuO - EG			SiO ₂ – EG		
\emptyset	ΔP	$R_{\Delta P}$	\emptyset	ΔP	$R_{\Delta P}$	\emptyset	ΔP	$R_{\Delta P}$
0	6559.722	1	0	6559.722	1	0	6559.722	1
0.01	6720.020	1.024	0.01	6774.137	1.032	0.01	6693.938	1.020
0.02	6884.389	1.049	0.02	6992.747	1.066	0.02	6835.670	1.042
0.03	7053.014	1.075	0.03	7214.907	1.099	0.03	6981.141	1.064
0.04	7226.991	1.101	0.04	7441.829	1.134	0.04	7130.537	1.087
0.05	7406.086	1.129	0.05	7673.318	1.169	0.05	7283.502	1.110
0.06	7590.493	1.157	0.06	7909.649	1.205	0.06	7440.927	1.134
0.07	7780.411	1.186	0.07	8150.550	1.242	0.07	7603.041	1.159
0.08	7975.628	1.215	0.08	8397.414	1.280	0.08	7769.854	1.184

IV.5.3 Effet de la concentration sur la performance thermique

Afin d'étudier l'influence de la concentration sur la performance thermique il est nécessaire de présenter la variation du rapport du Nusselt moyen $R_{\overline{Nu}_{nf}}$ et le rapport du coefficient des pertes de charge $R_{\bar{f}}$

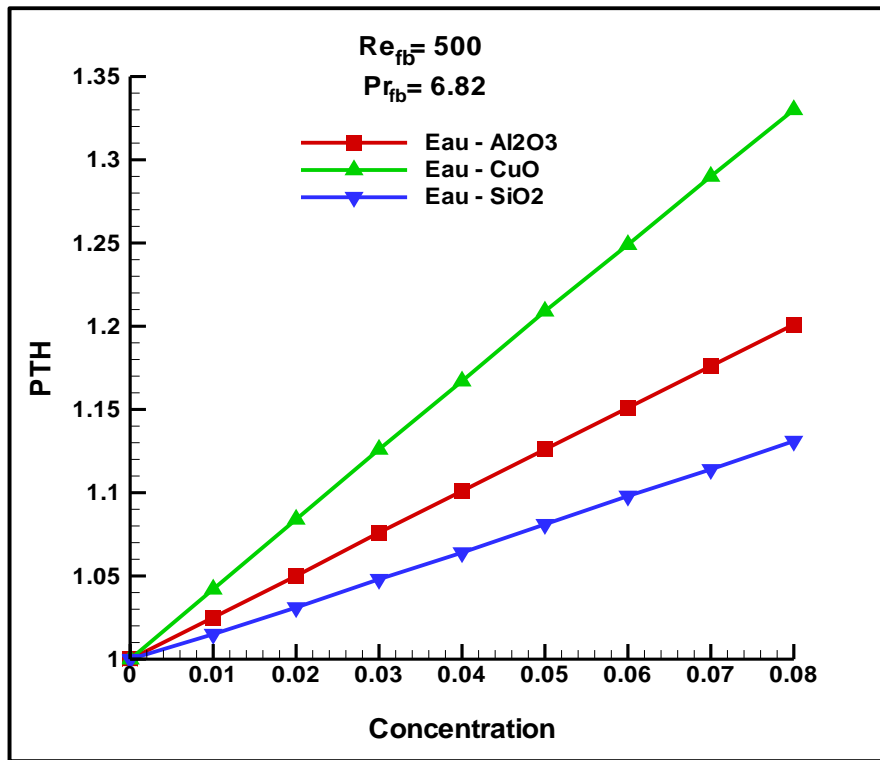
1^{er} cas : l'eau fluide de base

Tableau IV-12: Effet de la concentration sur $R_{\overline{Nu}_{nf}}$, $R_{\bar{f}}$ et PTH pour $Re_{fb} = 500$

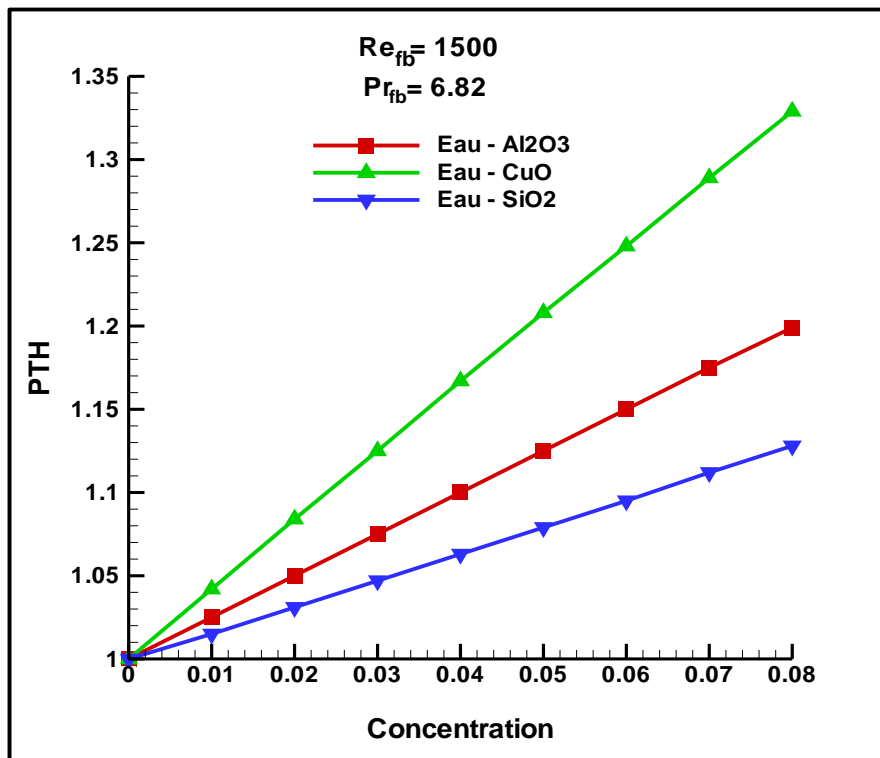
Al ₂ O ₃ -Eau				CuO-Eau				SiO ₂ -Eau			
\emptyset	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH	\emptyset	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH	\emptyset	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0.01	1.025	1	1.025	0.01	1.034	0.977	1.042	0.01	1.019	1.011	1.015
0.02	1.050	1	1.050	0.02	1.068	0.957	1.084	0.02	1.039	1.023	1.031
0.03	1.076	1.001	1.076	0.03	1.103	0.939	1.126	0.03	1.060	1.035	1.048
0.04	1.102	1.003	1.101	0.04	1.137	0.924	1.167	0.04	1.081	1.047	1.064
0.05	1.128	1.005	1.126	0.05	1.171	0.910	1.209	0.05	1.102	1.060	1.081
0.06	1.155	1.008	1.151	0.06	1.206	0.899	1.249	0.06	1.124	1.074	1.098
0.07	1.181	1.012	1.176	0.07	1.240	0.889	1.290	0.07	1.146	1.088	1.114
0.08	1.208	1.016	1.201	0.08	1.275	0.880	1.330	0.08	1.169	1.102	1.131

Tableau IV-13 : Effet de la concentration sur $R_{\overline{Nu}_{nf}}$, $R_{\bar{f}}$ et PTH pour $Re_{fb} = 1500$

Al ₂ O ₃ -Eau				CuO-Eau				SiO ₂ -Eau			
\emptyset	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH	\emptyset	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH	\emptyset	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH
0	1	1	1	0	1	1.000	1	0	1	1	1
0.01	1.025	0.999	1.025	0.01	1.035	0.981	1.042	0.01	1.018	1.009	1.015
0.02	1.050	1.000	1.050	0.02	1.071	0.964	1.084	0.02	1.037	1.019	1.031
0.03	1.075	1.000	1.075	0.03	1.106	0.949	1.125	0.03	1.057	1.029	1.047
0.04	1.101	1.002	1.100	0.04	1.142	0.936	1.167	0.04	1.077	1.040	1.063
0.05	1.127	1.004	1.125	0.05	1.177	0.925	1.208	0.05	1.097	1.050	1.079
0.06	1.153	1.006	1.150	0.06	1.212	0.915	1.248	0.06	1.118	1.062	1.095
0.07	1.179	1.009	1.175	0.07	1.248	0.907	1.289	0.07	1.139	1.073	1.112
0.08	1.205	1.013	1.999	0.08	1.283	0.899	1.329	0.08	1.160	1.086	1.128



(a) Re_{fb} = 500



(b) Re_{fb} = 1500

Figure IV-13 : Effet de la concentration volumique sur PTH pour l'eau fluide de base avec :

(a) Re_{fb} = 500 et (b) Re_{fb} = 1500

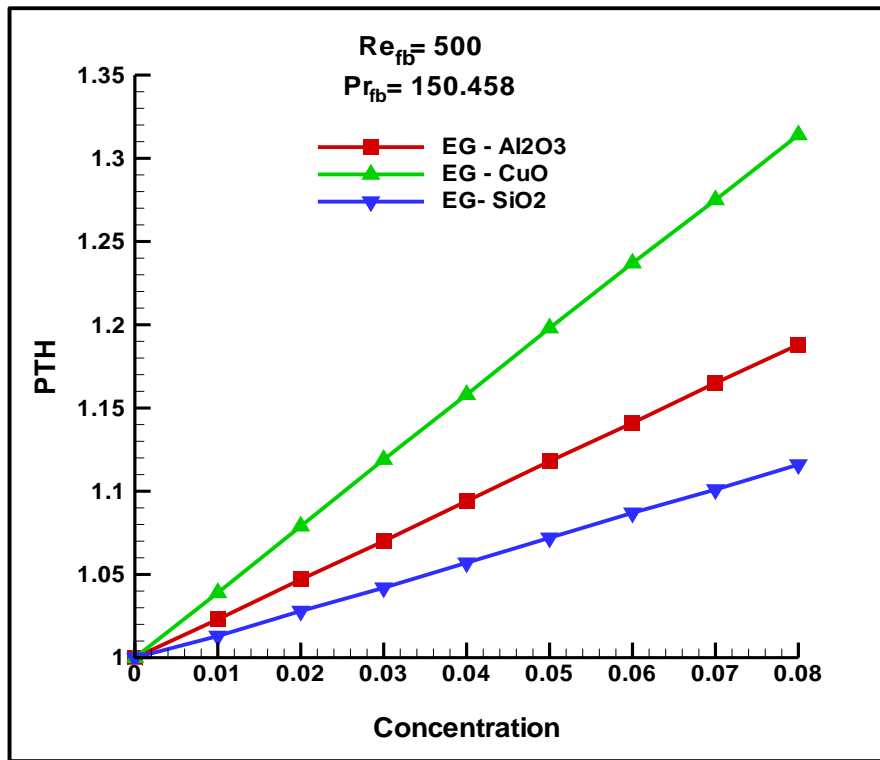
2^{ème} cas : Ethylène Glycol fluide de base

Tableau IV-14 : Effet de la concentration sur $R_{\overline{Nu}_{nf}}$, $R_{\bar{f}}$ et PTH pour $Re_{fb} = 500$

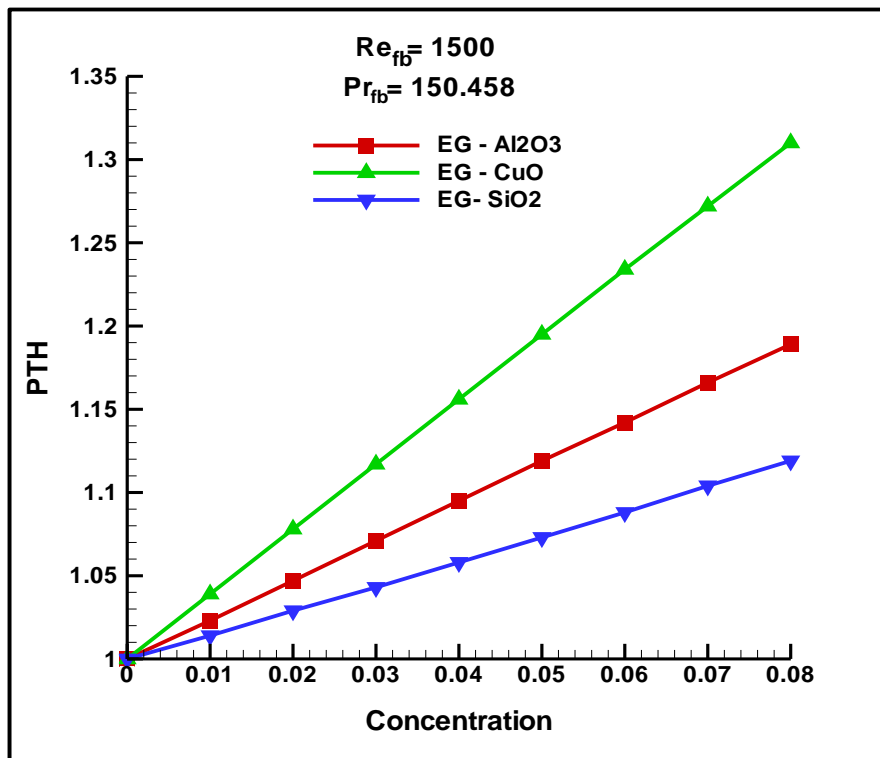
Al ₂ O ₃ -EG			CuO-EG			SiO ₂ -EG					
ϕ	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH	ϕ	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH	ϕ	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0.01	1.018	1.013	1.023	0.01	1.033	0.982	1.039	0.01	1.012	1.013	1.013
0.02	1.037	1.027	1.047	0.02	1.067	0.967	1.079	0.02	1.024	1.027	1.028
0.03	1.056	1.041	1.070	0.03	1.101	0.953	1.119	0.03	1.036	1.041	1.042
0.04	1.076	1.055	1.094	0.04	1.135	0.941	1.158	0.04	1.049	1.055	1.057
0.05	1.096	1.070	1.118	0.05	1.169	0.931	1.198	0.05	1.061	1.070	1.072
0.06	1.117	1.085	1.141	0.06	1.204	0.922	1.237	0.06	1.073	1.085	1.087
0.07	1.138	1.102	1.165	0.07	1.238	0.914	1.275	0.07	1.086	1.102	1.101
0.08	1.159	1.118	1.188	0.08	1.273	0.908	1.314	0.08	1.098	1.118	1.116

Tableau IV-15 : Effet de la concentration sur $R_{\overline{Nu}_{nf}}$, $R_{\bar{f}}$ et PTH pour $Re_{fb} = 1500$

Al ₂ O ₃ -EG			CuO-EG			SiO ₂ -EG					
ϕ	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH	ϕ	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH	ϕ	$R_{\overline{Nu}_{nf}}$	$R_{\bar{f}}$	PTH
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0.01	1.024	1.002	1.023	0.01	1.034	0.985	1.039	0.01	1.018	1.011	1.014
0.02	1.049	1.005	1.047	0.02	1.068	0.972	1.078	0.02	1.036	1.022	1.029
0.03	1.074	1.008	1.071	0.03	1.103	0.961	1.117	0.03	1.055	1.034	1.043
0.04	1.099	1.011	1.095	0.04	1.137	0.951	1.156	0.04	1.074	1.046	1.058
0.05	1.125	1.016	1.119	0.05	1.172	0.942	1.195	0.05	1.094	1.059	1.073
0.06	1.150	1.020	1.142	0.06	1.206	0.935	1.234	0.06	1.114	1.072	1.088
0.07	1.176	1.026	1.166	0.07	1.241	0.928	1.272	0.07	1.134	1.085	1.104
0.08	1.202	1.032	1.189	0.08	1.276	0.923	1.310	0.08	1.155	1.099	1.119



(a) $Re_{fb} = 500$



(b) $Re_{fb} = 1500$

Figure IV-14: Effet de la concentration volumique sur PTH pour EG fluide de base:

(a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$

IV.5.4 Comparaison du h_{moyen} des différent nanofluides

Les figures IV-15, IV-16 et IV-17 montrent que les nanofluides de fluide de base **Ethylène Glycol** comme (Al_2O_3 -EG, CuO -EG et SiO_2 -EG) donnent une amélioration considérable du h_{moyen} par rapport aux nanofluides de fluide de base **Eau** (Al_2O_3 -Eau , CuO -Eau et SiO_2 -Eau), ça revient à la valeur élevée du nombre de Prandtl du liquide EG qu'est supérieur à celui de l'eau ($Pr_{EG} = 150.458 > Pr_{eau} = 6.82$)

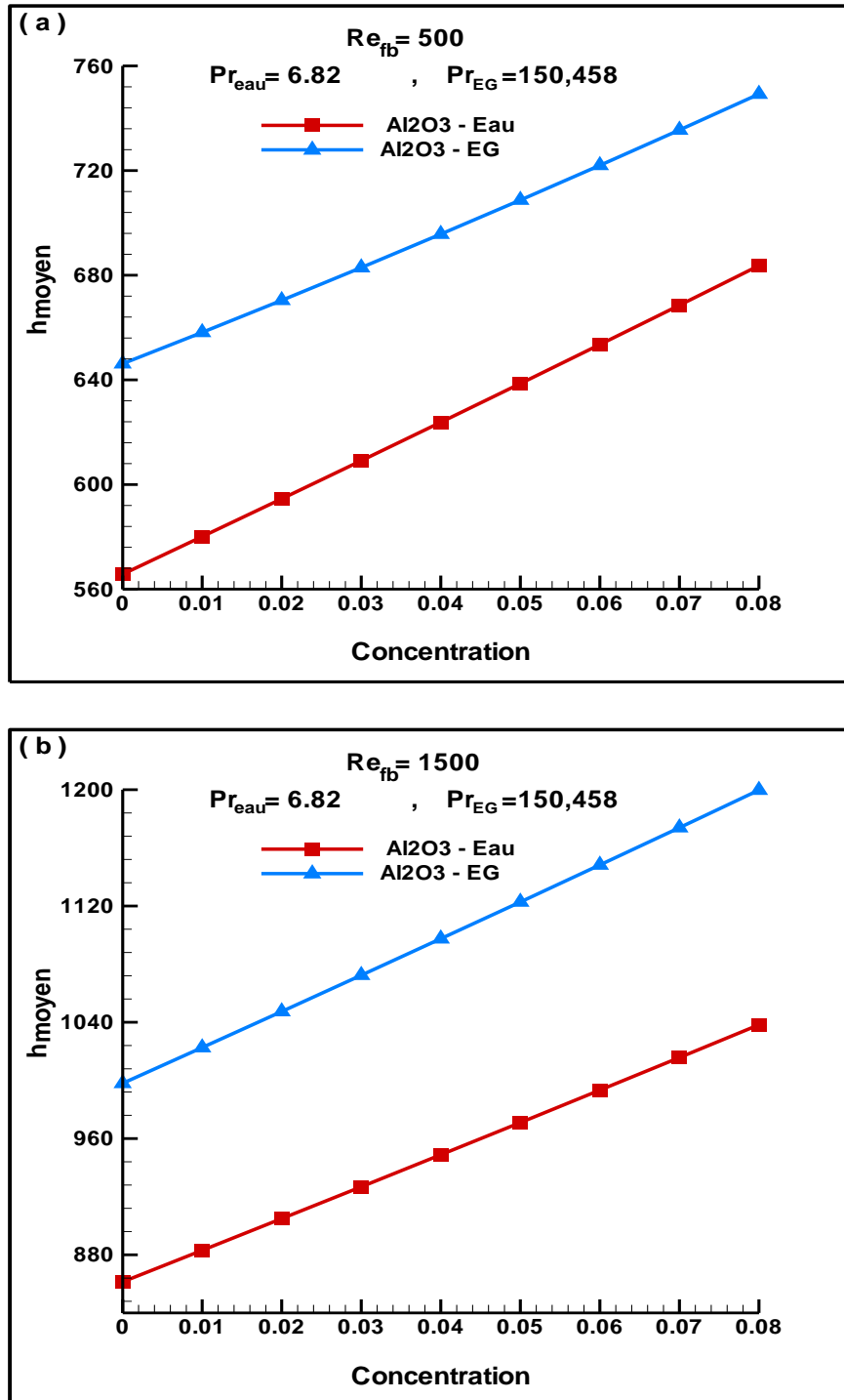


Figure IV-15: Comparaison du h_{moyen} du Al_2O_3 -Eau ; Al_2O_3 -EG :

(a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$

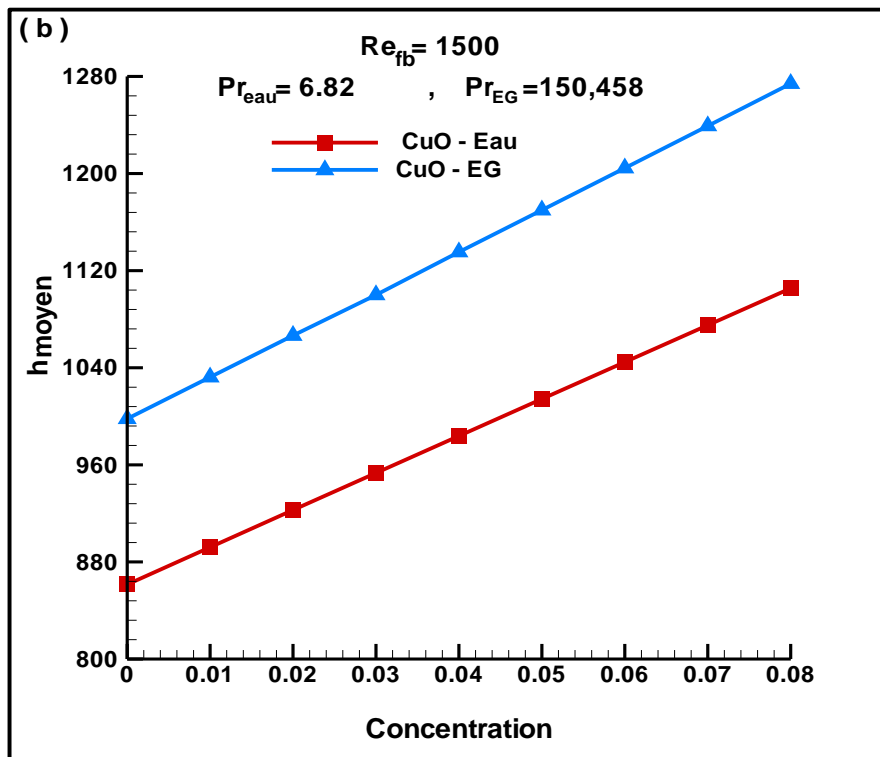
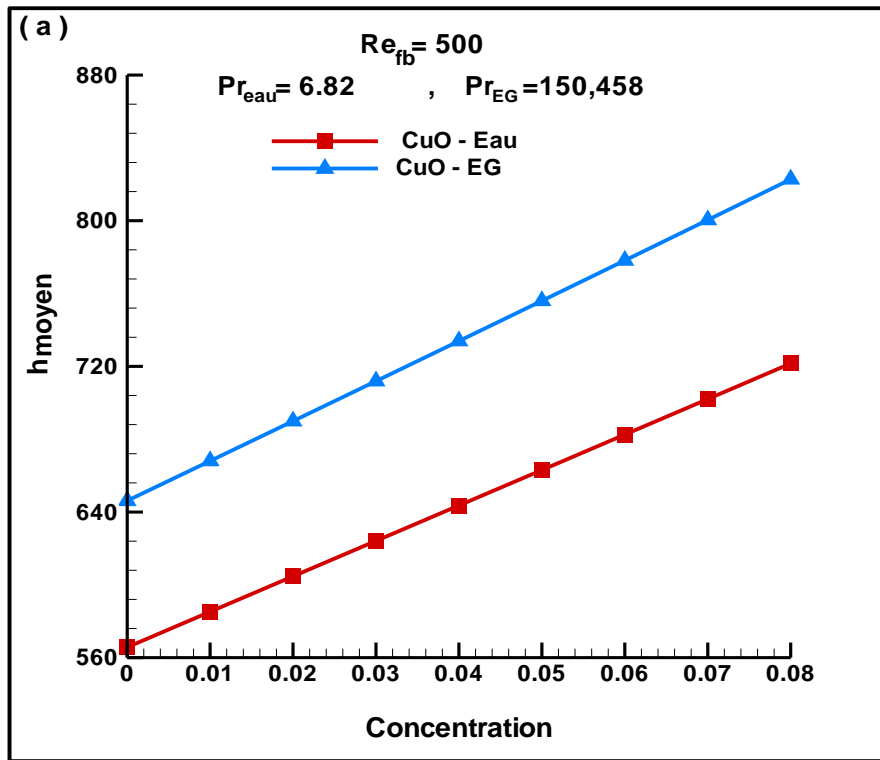


Figure IV-16 : Comparaison du h_{moyen} du CuO – Eau et CuO – EG
 (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$

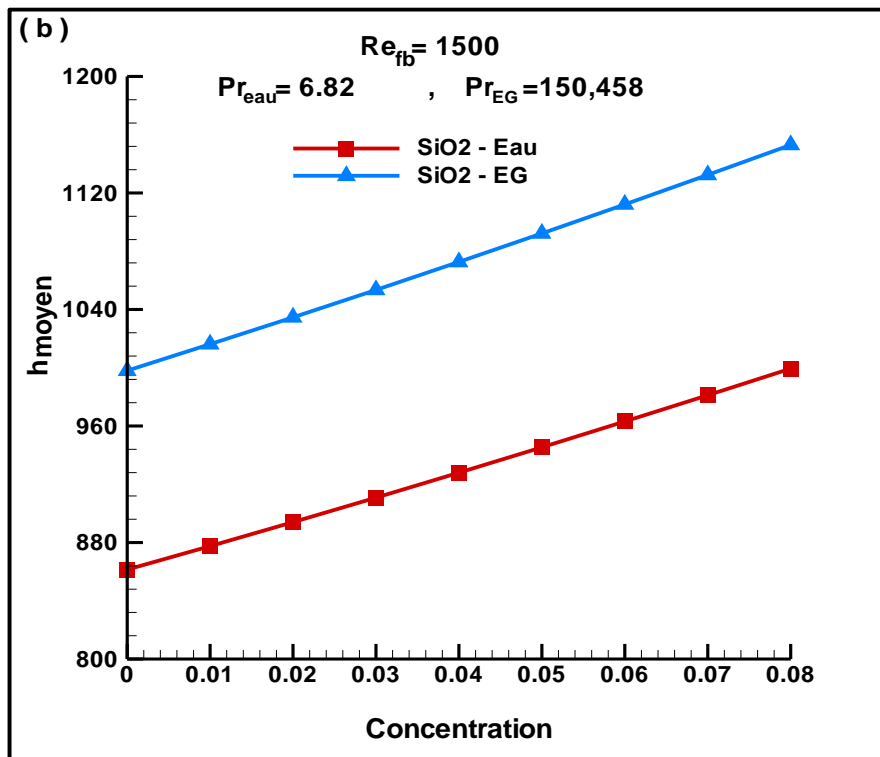
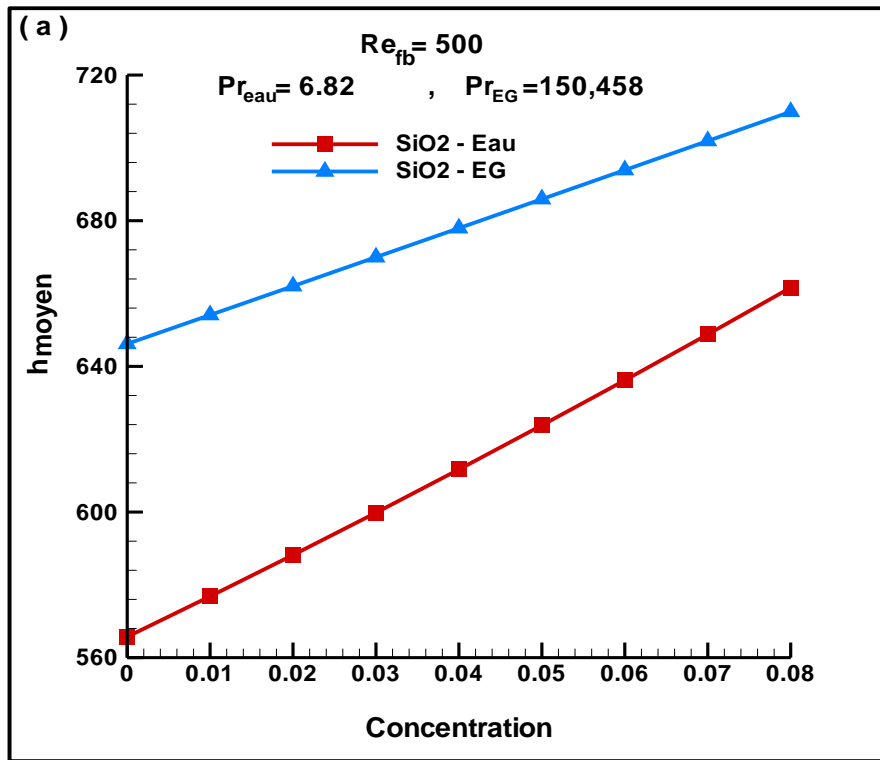


Figure IV-17: Comparaison du h_{moyen} du SiO₂ – Eau et SiO₂ – EG
 (a) $Re_{fb}=500$ et (b) $Re_{fb}=1500$

IV.5.5 Comparaison du PTH des différents nanofluides

Les figures : IV-18 , IV-19 et IV-20 illustrent une comparaison entre les PTH des nanofluides à base d'eau et les nanofluides à base Ethylène Glycol. Les resultats sont présentés pour $Re_{fb} = 500$ et $Re_{fb}=1500$. On remarque que :

- $PTH (Al_2O_3\text{-Eau}) > PTH (Al_2O_3\text{-EG})$
- $PTH (CuO\text{-Eau}) > PTH (CuO\text{-EG})$
- $PTH (SiO_2\text{-Eau}) > PTH (SiO_2\text{-EG})$

Dans les conditions de cette étude, on peut dire que les nanofluides à base d'eau donnent une performance thermique légèrement supérieure à celle des nanofluides à base EG. Le nanofluide qui présente meilleur performance thermique est le CuO-Eau

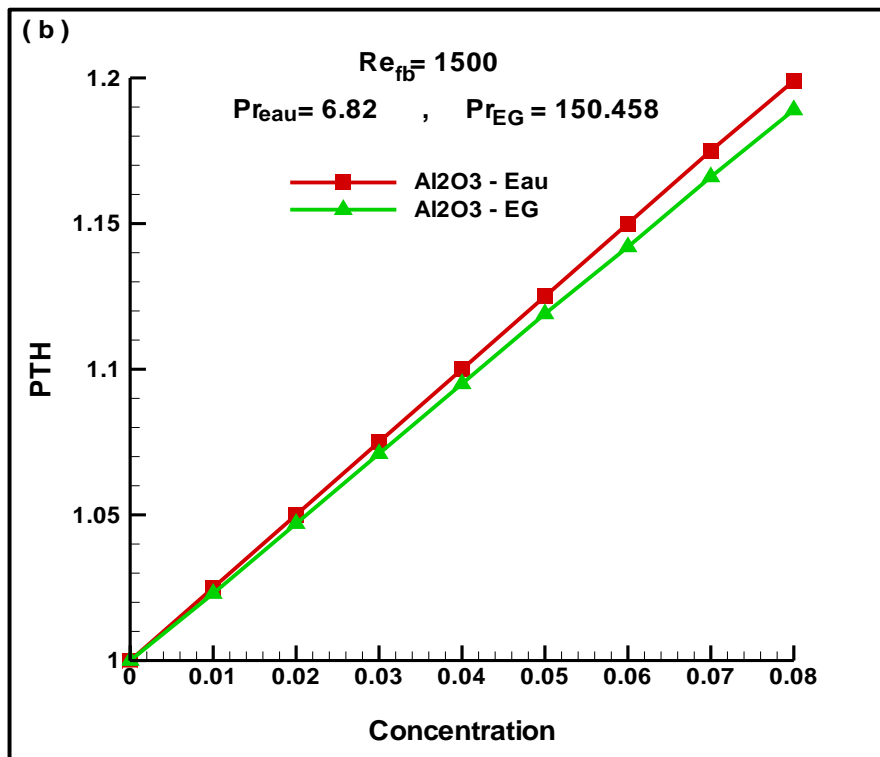
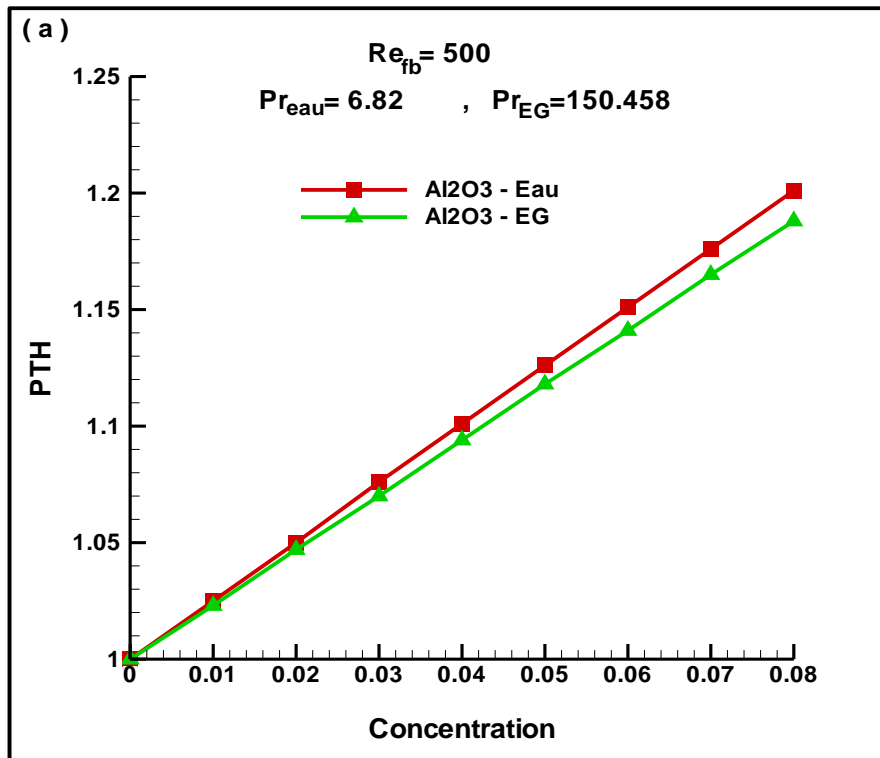


Figure IV-18 : Comparaison entre PTH du Al₂O₃ – Eau et Al₂O₃ – EG
 (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$

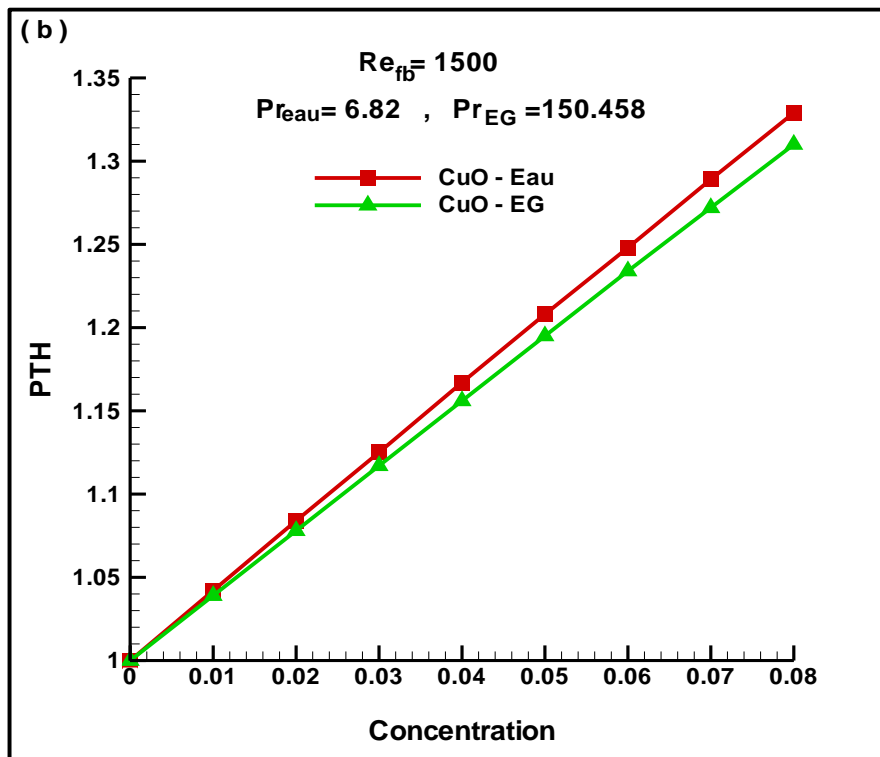
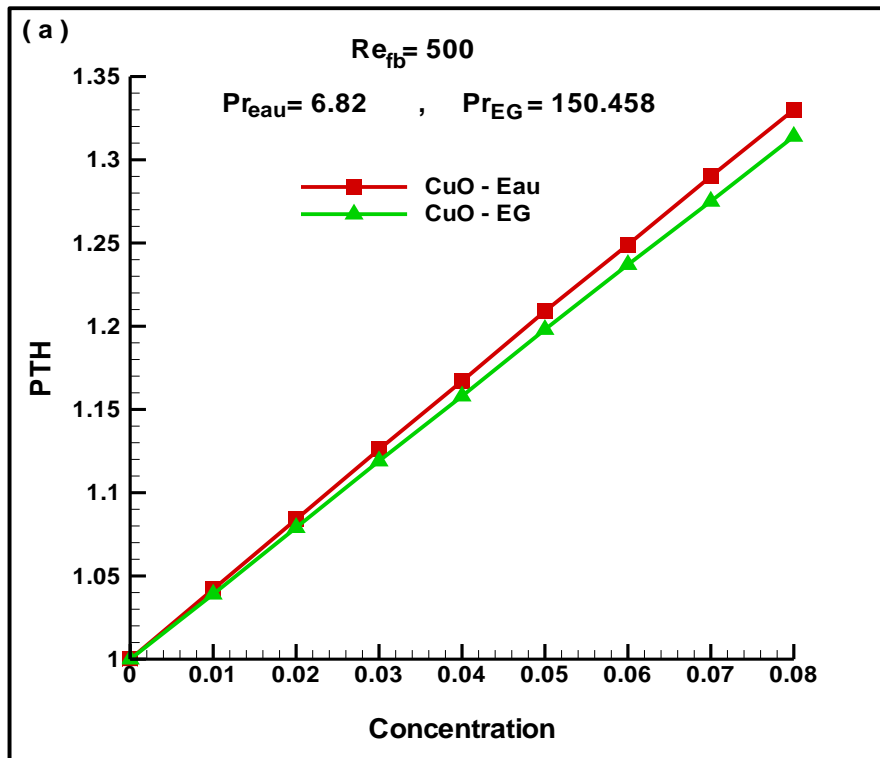


Figure IV-19 : Comparaison entre PTH du CuO– Eau et CuO – EG
 (a) $Re_{fb} = 500$; (b) $Re_{fb} = 1500$

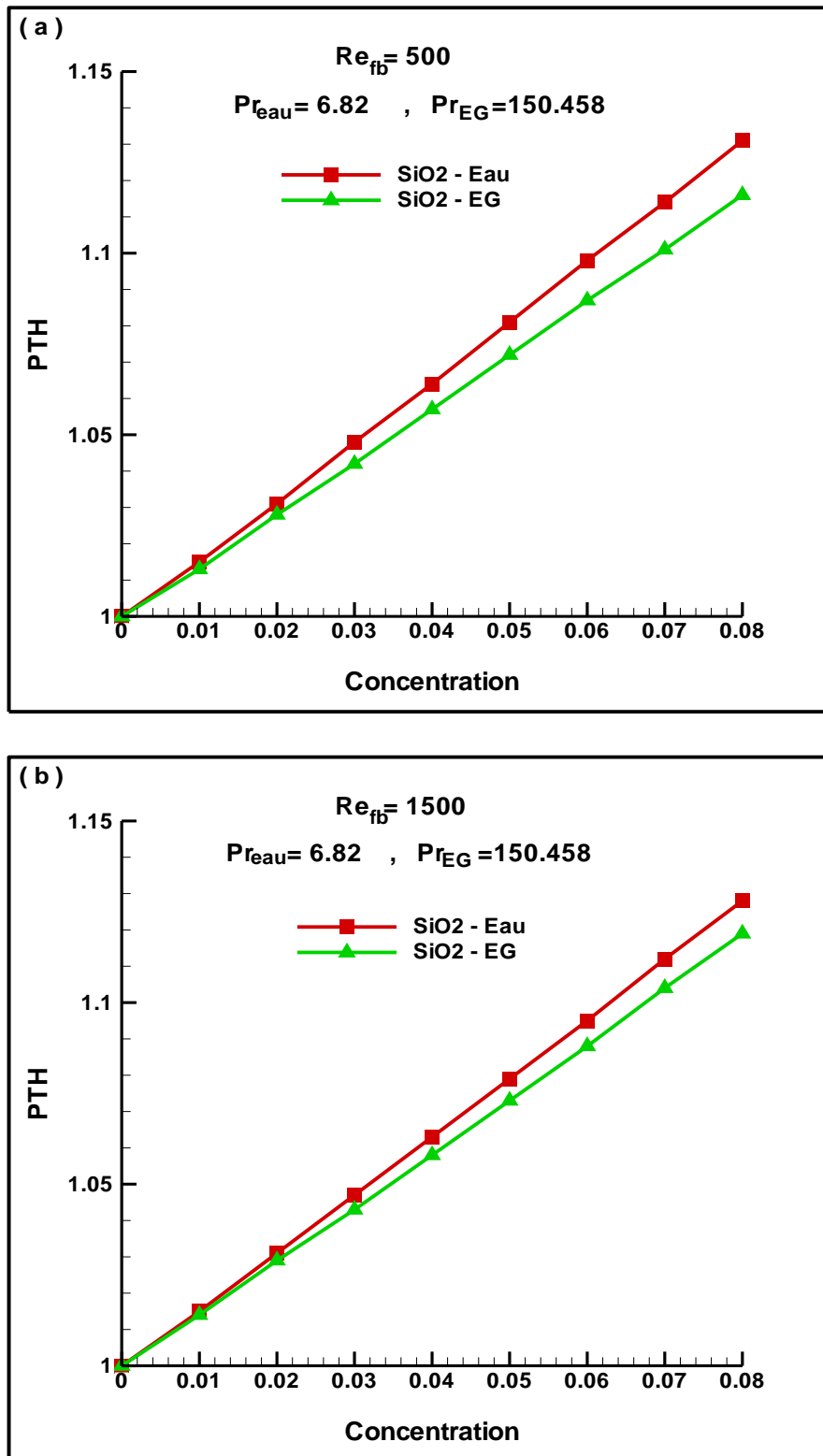


Figure IV-20: Comparaison entre PTH du SiO₂-Eau et SiO₂-EG
 (a) $Re_{fb} = 500$ et (b) $Re_{fb} = 1500$

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a présenté une simulation numérique de la convection forcée laminaire de six types de nanofluides dans une conduite cylindrique soumise à un flux de chaleur constant. Les nanofluides étudiés sont : Al_2O_3 -Eau, Al_2O_3 -EG, CuO-Eau, CuO-EG, SiO_2 -Eau et SiO_2 -EG . La concentration volumique des nanoparticules variait entre 0 % et 8 %. Sous les conditions utilisées dans cette simulation et à partir des résultats obtenus, les principales conclusions sont les suivants :

- Tous les types de nanofluides montrent une amélioration du transfert de chaleur par rapport aux fluides de base (Eau pure et Ethylène glycol).
- Le coefficient de convection moyen de tous les types de nanofluides est amélioré par l'augmentation de la concentration des nanoparticules; ceci est dû au fait que l'augmentation de la concentration fait augmenter la conductivité thermique des nanofluides.
- L'ajout de nanoparticules a montré un impact négatif sur la chute de pression, car l'augmentation de la concentration fait augmenter la chute de pression des nanofluides par rapport aux fluides de base l'Eau et l'EG
- Toute augmentation de la concentration augmente la densité du nanofluide, ce qui entraîne une augmentation des pertes de charge ainsi qu'une augmentation de la puissance de pompage.
- Les valeurs de PTH des nanofluides CuO- H_2O , CuO-EG, Al_2O_3 - H_2O et Al_2O_3 -EG sont supérieures à l'unité. Ensuite, ces nanofluides sont adéquats à utiliser car ils montrent une amélioration considérable du transfert de chaleur avec une augmentation acceptable de la chute de pression. Pour les nanofluides (SiO_2 - H_2O , SiO_2 -EG) toutes les valeurs sont approximativement égales à 1, car l'augmentation du nombre de Nusselt est faible.
- Finalement, le nanofluides CuO- H_2O présente meilleure performance thermique .

Références :

- [1] HAMZE, S. (2020). Graphene based nanofluids: development, characterization and application for heat and energy systems, Doctoral thesis, Rennes 1, France.
- [2] TAHIRI, A. (2017). Contribution à l'étude des transferts thermo convectifs d'un fluide non Newtonien en écoulement dans un conduit, Doctoral dissertation, UMBB BOUMERDES, Algeria.
- [3] Gladés, B. (2010). Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nano fluides en configuration de Rayleigh-Bénard, Doctoral dissertation, Toulouse III- Paul Sabatier, France.
- [4] P Sivashanmugam. Application of nanofluids in heat transfer. An overview of heat transfer phenomena, 2012, 16.
- [5] LABIED Abdelhamid (2021) . Nano-fluides et distillation solaire des eaux saumâtres, perspectives et défis. Thèse doctorat en génie des procédés. Université Kasdi-Merbah Ouargla
- [6] Wei LI ,these de docteur elaboration par procédé de precipitation de nanoparticules aux propriétés controlees.application a la magnétite.pp.54.(2011)
- [7] Munish Gupta, Vinay Singh, Rajesh Kumar, and Z Said. A review on thermophysical properties of nano fluids and heat transfer applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews2017, 74 :638– 670,..
- [8] Shigeki Yatsuya, Kazuhiro Mihama, and Ryozi Uyeda. A new technique for the preparation of extremely fine metal particles. Japanese Journal of Applied Physics, 1974,13(4) :749.
- [9] M Wagener, BS Murty, and B Günther. Preparation of metal nano-suspensions by high-pressure dc-sputtering on running liquids. MRS Online Proceedings Library Archive, 1996, 457.
- [10] Jeffery A Eastman, US Choi, Shaoping Li, LJ Thompson, and Shinpyo Lee. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. Technical report,Argonne National Lab, IL (United States), 1996.
- [11] Chih-Hung Lo, Tsing-Tshih Tsung, and Liang-Chia Chen. Shape-controlled synthesis of cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (sanss). Journal of Crystal Growth, 2005, 277(1-4) :636–642.
- [12] Tran X Phuoc, Yee Soong, and Minking K Chyu. Synthesis of ag-deionized water nanofluids using multi-beam laser ablation in liquids. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(12) : 1099–1106.

- [13] E. Pop, V. Varshney, A. K. Roy, “Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications”, MRS Bull, Vol. 37, pp.1273-1281, 2012.
- [14] CHADI, Kamel (2020). Modélisation et simulation du refroidissement des éléments à base de composants électroniques par des nanofluides. Doctoral thesis, Université Mohamed Khider Biskra.
- [15] Jan Rudolf Eggers and Stephan Kabelac. Nanofluids revisited. Applied Thermal Engineering, 2016, 106 :1114–1126.
- [16] Khentoul Moussa. Étude numérique de la convection mixte dans un canal horizontal contenant des ailettes. 2017
- [17] A. Einstein. Investigations on the Theory of the Brownian Movement. Dover Publications, New York, 1956
- [18] H.C. Brinkman. The viscosity of concentrated suspensions and solution. J. Chem. Phys, 20, 571–581, 1952
- [19] G.K. Batchelor. Brownian Diffusion of particles with Hydrodynamic Interaction. Journal of Fluid Mechanics, 74(1): 1-29, 1976.
- [20] S. Maiga, S. Palm, S. Nguyen, C. Roy, and G. Galanis. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. Int. J. Heat Fluid Flow, 26, 530-546, 2005.
- [21] B.C. Pak and Y.I. Cho. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, 11(2), 151–170, 1998.
- [22] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, Int. J. Heat Mass Transf. 43 (2000) 3701–3707. doi:10.1016/S0017-9310(99)00369-5.
- [23] Stéphane FOHANNO, Guillaume POLIDORI, Catalin POPA. Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle. Université de Reims Champagne-Ardenne, France 2012
- [24] V. Bianco et al. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes. Applied Thermal Engineering 29(2009) 3632 – 3642 .
- [25] Dan Li and Richard B Kaner. Processable stabilizer-free polyaniline nanofiber aqueous colloids. Chemical communications, (26) :3286–3288, 2005

- [26] ALMI N, BOUDRIOUA L (2022) Simulation de l'Effet des Nano-Fluides sur les Performances d'un Échangeur Thermique à Double Tube en U. Mémoire master en génie mécanique , Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [27] GHENNAI Ahlam (2021) Contribution à l'étude des transferts thermiques dans les nano - fluides. Thèse doctorat en génie mécanique .Université des Frères Mentouri – Constantine 1.
- [28] V. Bianco, F. Chiacchio, O. Manca and S. Nardini. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes. *Applied Thermal Engineering*,29(17-18), 3632–3642,2009
- [29] L. Syam Sundar and K.V. Sharma, “Laminar Convective Heat Transfer and Friction Factor of Al₂O₃ Nanofluid in Circular Tube Fitted with Twisted Tape Inserts”, *Int. J. Automot. Mech. En*, vol. 3, pp. 265–278, Dec. 2022.
- [30] H. Almohammadi, Sh. Nasiri Vatan, E. Esmailzadeh, A. Motezaker and A. Nokhosteen . Experimental Investigation of Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Al₂O₃ / Water Nanofluid in Laminar Flow Regime inside a I Circular Tube. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* Vol:6, No:8, 2012
- [31] Leyuan Yu and Dong Liu. Study of the Thermal Effectiveness of Laminar Forced Convection of Nanofluids for Liquid Cooling Applications. *Ieee Transactions On Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 3, No. 10, October 2013
- [32] I. Behroyan , Sh.M. Vanaki , P. Ganesan , R. Saidur . A comprehensive comparison of various CFD models for convective heat transfer of Al₂O₃ nanofluid inside a heated tube . *International Communications in Heat and Mass Transfer* Volume 70, January 2016, Pages 27-37.
- [33] Nilesh Purohit , Varun Anand Purohit , Kamlesh Purohit . Assessment of nanofluids for laminar convective heat transfer: A numerical study. *Engineering Science and Technology, an International Journal*.19 (1), 574-586,2016.
- [34] C.J. Ho , C.Y. Chang , C.Y. Cheng , S.J. Cheng , Y.W. Guo , S.T. Hsu and Wei-Mon Yan. Laminar forced convection effectiveness of Al₂O₃–water nanofluid flow in a circular tube at various operation temperatures: Effects of temperature-dependent properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 100 (2016) 464-481 .
- [35] Beybin Ilhan, Hakan Ertürk . Experimental characterization of laminar forced convection of hBN-water nanofluid in circular pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 111 (2017) 500-507

- [36] Ahmed M. Teamah, Mohamed A. Hassab, Wael M. El-Maghlany. Influence of nano-particles addition on hydrodynamics and heat transfer in laminar flow entrance region inside tube. Alexandria Engineering Journal (2018) 57, 4091–4102
- [37] Muhammad Sajjad , Muhammad Sajid Kamran , Rabia Shaukat , Mudather Ibrahim Mudather Zeinelabdeen. Numerical investigation of laminar convective heat transfer of graphene oxide/ethylene glycol-water nanofluids in a horizontal tube .Engineering science and technology, an international journal. Volume 21, Issue 4, August 2018, Pages 727-735.
- [38] Wagd Ajeeb , Monica S.A. Oliveira , Nelson Martins , S.M. Sohel Murshed. Forced convection heat transfer of non-Newtonian MWCNTs nanofluids in microchannels under laminar flow. International Communications in Heat and Mass Transfer 127 (2021) 105495.
- [39] ROUSSEL, J. (2010). Cours de physique mécanique des fluides (éd. 1er). Rennes, France.
- [40] Ioan C. Popa (2002) . Modélisation numérique du transfert thermique - méthode des volumes finis.
- [41] Trodi Amira (2018) . Etude des phénomènes de transfert de chaleur dans les nanofluides. Thèse doctorat en sciences en chimie industrielle . Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [42] Benkherbache Souad (2016) . Simulation numérique directe de la convection dans des tubes coaxiaux. Thèse doctorat en science en mécanique. Université de Batna.
- [43] L.H. Thomas, Elliptic Problems in Linear Differential Equations over a Network, Watson Sci. Comput. Lab Report, Columbia University, New York, 1949.
- [44] S. V. Patankar, A calculation procedure for two-dimensionnal elliptic situations. Numer. Heat Transfer. Part A, Vol. 14(25), pp. 409, 1981.
- [45] H.K. Dawood et al. Heat transfer augmentation using nanofluids in an elliptic annulus with constant heat flux boundary condition. Case Studies in Thermal Engineering. Case studies in thermal engineering 4 (2014) 32–41.