

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Par : MEZOUAR Khaled
MERABET Bilal

Sujet

Analyse numérique du comportement thermo-convectif d'un écoulement de nanofluide à travers un échangeur de chaleur en présence des ailettes

Soutenu publiquement, le 26 / 06 /2023 , devant le jury composé de :

M/ ALIANE Abdennour	MCB	Université de Tlemcen	Président
Mme/ SARI HASSOUN Hind	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
Mme/ MOSTEFAOUI Amina	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant
M/ SAIM Rachid	Pr	Université de Tlemcen	Co-encadrant

Année universitaire : 2022 / 2023

Remerciements

En premier lieu, nous exprimons notre profonde gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, pour la santé, la volonté et la patience qu'Il nous a accordées tout au long de ces années.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadreur, Mme. Mostefaoui Amina, ainsi qu'à notre Co-encadreur, M. SAJM Rachid, pour leur soutien infailible tout au long de notre parcours académique et leur encadrement durant la rédaction de notre mémoire. Leurs expertises et leur patience ont été d'une aide précieuse tout au long de ce processus.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers M. Aliane Abdenour pour avoir gracieusement accepté d'évaluer notre travail et d'avoir présidé le jury. Sa présence a été un honneur pour nous.

Nous souhaitons également exprimer notre sincère reconnaissance à Mme Sari Hassoun Hind pour avoir généreusement accepté d'examiner notre travail et d'y participer en tant que membre du jury.

Nous tenons à vous remercier pour vos commentaires constructifs et vos critiques honnêtes, qui nous ont permis de mieux comprendre les attentes académiques. Votre évaluation minutieuse de notre travail a été d'une grande valeur pour nous.

Nous vous remercions sincèrement pour tout ce que vous avez fait pour nous et pour votre dévouement envers notre réussite académique.

Cordialement,

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mon cher père **Mohammed** mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié Pour m'avoir réussi, que*

dieu le garde dans son vaste paradis.

- *A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon coeur,*

ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

- *à ma famille élargie, vos encouragements et votre fierté ont été une source de motivation supplémentaire. Votre présence dans ma vie a apporté une richesse et un soutien*

inestimables.

- *Mon binôme **Merabet Bilal** avec qui j'ai réalisé ce travail*

- *Et une dédicace très spéciale à Mon ami **Cherifi Ossama** pour son soutien*

moral sans oublier tous les amis.

Merci d'être toujours là pour moi

Khaled.

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mon cher père **Djelloul** mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié Pour m'avoir réussi, que dieu*

le garde dans son vaste paradis.

- *A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon coeur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

- à ma famille élargie, vos encouragements et votre fierté ont été une source de motivation supplémentaire. Votre présence dans ma vie a apporté une richesse et un soutien inestimables.

- *Mon binôme **Mezouar Khaled** avec qui j'ai réalisé ce travail*

- *Et une dédicace très spéciale à Mon ami **Cherifi Ossama** pour son soutien moral sans oublier tous les amis.*

Merci d'être toujours là pour moi

Bilal.

ملخص

في هذه الدراسة، تحليل CFD لتدفق سائل النانوفلويد (Al_2O_3) من خلال مبادل حراري ذو زعانف لتحليل السلوك الديناميكي والحراري للسائل النانوي المنتشر في المساحة الداخلية للجهاز. تم تحديد رقم Nusselt وعامل الاحتكاك ومعيار الأداء الحراري الهيدروليكي (PEC) للسائل النانوي النانوي Al_2O_3 / الماء لتركيز حجمي قدره 5%. تم تحليل نفس الأداء الحراري الهيدروليكي في مجموعة من أرقام رينولد التي تتراوح من 5800 إلى 10000 (تدفق مضطرب) للسائل النانوي النانوي Al_2O_3 / الماء ولتركيزات الحجم المختلفة 1%، 3%، 5%.

تم حل المعادلات الحاكمة باستخدام طريقة الحجم المحدد وكذلك تم استخدام النماذج التالية هاملتون كروس ، برينكمان وشوان ورويتزل لحساب الخصائص الفيزيائية الحرارية في تخطيط شبكي منظم وموحد ظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن استخدام موائع النانو / الماء لتركيز حجم أعلى يؤدي إلى تحسن في معدل انتقال الحرارة من ناحية ومعيار تقييم الأداء الحراري الهيدروليكي من ناحية أخرى لعدد من رينولدز أعلى. .

الكلمات المفتاحية: المبادل الحراري، الموائع النانوية، الزعانف، انتقال الحرارة، التدفق المضطرب

Résumé

Dans cette étude, une analyse CFD d'un écoulement de nanofluide (Al_2O_3) à travers un échangeur de chaleur à ailettes pour analyser le comportement dynamique et thermique du nanofluide circulant dans l'espace interne de l'appareil. Le nombre de Nusselt, le facteur de frottement ainsi que le critère de performance thermo-hydraulique (PEC) des nanofluides Al_2O_3 /eau a été déterminé pour une concentration volumique de 5 %. Les mêmes performances thermo-hydrauliques ont été analysé dans une gamme de nombre de Reynolds variant de 5800 à 10000 (écoulement turbulent) pour le nanofluide Al_2O_3 /eau et pour différentes concentrations volumiques 1%, 3%, 5%. Les équations gouvernantes ont été résolues en utilisant la méthode des volumes finis et aussi on a utilisé les modèles suivants : Hamilton crosser , Brinkman et Xuan et Roetzel pour calculer les propriétés thermo physiques dans une disposition de grille uniforme structurée. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de nanofluide Al_2O_3 /eau pour une concentration volumique plus élevée entraîne une amélioration du taux de transfert de chaleur d'une part et le critère d'évaluation des performances thermo-hydraulique d'autre part pour un nombre de Reynolds plus élevé.

Mots clés : Echangeur de chaleur, Nanofluide, ailettes, transfert de chaleur, écoulement turbulent.

Abstract

In this study, a CFD analysis of a flow of nanofluid (Al₂O₃) through a heat exchanger was conducted to analyze the dynamic and thermal behavior of the nanofluid flowing in the internal space of the device. The Nusselt number, friction factor, and thermal-hydraulic performance criterion (PEC) of Al₂O₃/water nanofluids were determined for a volumetric concentration of 5%. The same thermal-hydraulic performance was analyzed over a range of Reynolds numbers ranging from 5800 to 10000 (turbulent flow) for Al₂O₃/water nanofluid and different volumetric concentrations of 1%, 3%, and 5%. The governing equations were solved using the finite volume method, and the following models were used: Hamilton Crosser, Brinkman, and Xuan-Roetzel to calculate the thermo-physical properties in a structured uniform grid arrangement. The results showed that the use of Al₂O₃/water nanofluid at higher volumetric concentrations resulted in an improvement in the heat transfer rate and the thermal-hydraulic performance criterion, particularly at higher Reynolds numbers.

Contents

Chapitre I : Généralités sur les échangeurs de chaleur.....	3
I. 1. Introduction.....	4
I. 2. Rôle de l'échangeur thermique.....	5
I. 3. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur.....	5
I. 4. Modes de transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur.....	6
I. 4. 1. Transfert de chaleur par conduction.....	6
I. 4. 2. Transfert thermique par convection.....	7
I. 4. 3. Transfert thermique par rayonnement.....	8
I. 5. Modes d'écoulement dans l'échangeur de chaleur.....	9
I. 5. 1. Co-Courants.....	9
I. 5. 2. Contre-courants.....	10
I. 5. 3. Courants croisés.....	11
I. 6. Types d'échangeur de chaleur.....	12
I. 6. 1. Échangeur de chaleur tubulaire (à tube).....	12
I. 6. 2. Echangeurs monotube.....	12
I. 6. 3. Echangeurs coaxiaux.....	13
I. 6. 4. Les échangeurs multitubulaires.....	13
I. 6. 5. Échangeurs à plaques.....	16
I. 6. 6. Échangeur à surface secondaire.....	19
I. 6. 7. Autres types d'échangeurs.....	20
I. 7. Echangeurs de chaleurs à ailettes.....	21
I. 7. 1. Effet de la géométrie d'ailette.....	21
I. 7. 2. Quelques types d'ailettes.....	22
I. 7. 3. Analyse de l'effet des paramètres géométriques.....	24
I. 7. 4. Domaines d'application.....	24
I. 7. 5. Différents types d'échangeur de chaleur à ailettes.....	25

I. 8. Revues bibliographiques	28
I. 9. Conclusion :.....	35
Chapitre II : Généralités sur les Nano fluides.....	37
II. 1. Introduction	38
II. 2. Type des nanoparticules.....	41
II. 3. Les propriétés thermo physiques des nano fluides.....	42
II. 3. 1. La Masse volumique	42
II. 3. 2. Chaleur spécifique	43
II. 3. 3. Coefficient d'expansion thermique	44
II. 3. 4. La viscosité dynamique	44
II. 3. 5. Conductivité thermique des nanofluides	47
II. 3. 6. Fraction volumique.....	51
II. 3. 7. La masse volumique et la capacité thermique.....	52
II. 3. 8. Coefficient d'expansion thermique	52
II. 4. Processus de production des nanoparticules	53
II. 4. 1. Les méthodes physiques	53
II. 4. 2. Les méthodes chimiques	54
II. 5. Domaines d'utilisation.....	55
II. 5. 1. Applications de refroidissement industriel	55
II. 5. 2. Smart Fluides.....	56
II. 5. 3. Réacteurs nucléaires.....	56
II. 5. 4. Extraction de l'énergie géothermique et d'autres sources d'énergie	57
II. 6. Comment un nanofluide peut-il améliorer le transfert thermique ?	57
II. 7. Avantages des nanofluides	58
II. 8. Inconvénients des nanofluides.....	58
II. 9. Conclusion.....	59
Chapitre III : Formulation Mathématique	60

III. 1. Introduction	61
III. 2. Description du modèle physique	62
III. 3. Formulation mathématique.....	64
III. 3. 1. Hypothèses	64
III. 3. 2. Équations Gouvernantes dans le régime turbulent.....	64
III. 4. <i>Propriétés</i> thermo- physiques.....	67
III. 5. Conditions aux limites	69
III. 6. Paramètres caractéristiques	71
III. 6. 1. Nombre de Reynolds (Re).....	71
III. 6. 2. Nombre de Prandtl (Pr)	71
III. 6. 3. Nombre de Nusselt (Nu).....	71
III. 6. 4. Coefficient de frottement f.....	72
III. 6. 5. Indice de performance thermo hydraulique	72
III. 7. Présentation de GAMBIT et de FLUNET :.....	73
III. 7. 1. GAMBIT :.....	73
III. 7. 2. FLUENT :.....	77
III. 8. Test de maillage	84
III. 9. Con clusion.....	84
<i>Chapitre IV Résultats et interprétations</i>	83
IV. 1. <i>Introduction</i>	88
IV. 2. <i>Validation</i>	88
IV. 3. <i>Résultats et discussions</i>	89
IV. 3. 1. Profil de vitesse	89
IV. 3. 2. Contour de vitesse.....	95
IV. 3. 3. <i>Iso vitesse</i>	96
IV. 3. 4. <i>Ligne des courants</i>	97
IV. 3. 5. <i>Contour de température</i>	98

<i>IV. 3. 6. Variation du nombre de Nusselt.....</i>	<i>99</i>
<i>IV. 3. 7. Critère d'évaluation des performances thermo-hydrauliques.....</i>	<i>100</i>
<i>IV. 4. Conclusion.....</i>	<i>101</i>
Conclusion générale	102
Bibliographie	105

Liste des figures :

Figure I.1: Echangeur de chaleur [1].....	5
Figure I.2: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur.....	6
Figure I.3: Transfert de chaleur par conduction [5]	7
Figure I.4: Transfert de chaleur par convection [5]	8
Figure I.5: Transfert de chaleur par rayonnement [5]	8
Figure I.6: écoulement Co-courant [7]	9
Figure I.7: Evolution des températures dans un échangeur à co-courant.....	9
Figure I.8: Ecoulement contre-courant [7]	10
Figure I.9: Evolution des températures dans un échangeur à contre-courant.	10
Figure I.10: écoulement à courants croisés [7].....	11
Figure I.11: Types d'échangeurs à courants croisés [7].	11
Figure I.12: Échangeur de chaleur tubulaire (à tube) [9].....	12
Figure I.13: Echangeur de chaleur tubulaire à monotube. [10].....	12
Figure I.14: échangeur de chaleurs tubulaires coaxiales. [10]	13
Figure I.15: échangeur de chaleur multitubulaire à tubes séparés. [10]	14
Figure I.16: Echangeur de chaleur multitubulaire à tubes rapprochés. [10]	14
Figure I.17: échangeur de chaleur multitubulaire avec tubes à ailettes [10].....	15
Figure I.18: échangeur de chaleur multitubulaire à tubes et calandre. [10].....	16
Figure I.19: Echangeur de chaleur à plaques [10]	17
Figure I.20: Echangeur de chaleur à plaque à surface primaire. [10]	17
Figure I.21: Echangeur de chaleur à plaques et joints. [10].....	18
Figure I.22: Echangeur de chaleur à plaques soudées ou brasées. [5]	18
Figure I.23: Echangeur de chaleur à plaques brasées.[10]	19
Figure I.24: Echangeur de chaleur à caloduc [9].....	20
Figure I.25: Sécheur a lit fluidisé [9]	21
Figure I.26: Exemple d'une sur face à ailettes [11]	22
Figure I.27: Ailettes continues [9]	23
Figure I.28: Différentes géométries et profils d'ailette pour une et deux restriction d'espace [9]	23
Figure I.29: Géométries d'ailettes [7]	24
Figure I.30: Différentes paramètres géométriques définissant un échangeur thermique. [7]	24
Figure I.31: Refroidisseur d'huile à air [11].....	26
Figure I.32: Type lk [11]	26
Figure I.33: Type LBD [11].....	27
Figure I.34: Type LBF [11]	27
Figure I.35: Type LBW [11].....	28
Figure I.36: Type KKG [11]	28
Figure I.37: Conception schématique de HGHE avec ailettes	30
Figure I.38: Géométrie DPHE avec une ailette rectangulaire incurvée	31
Figure I.39: Spécifications géométriques (à gauche) et une coupe transversale de l'échangeur de chaleur simple (à droite).....	32
Figure I.40: Conduits annulaires à ailettes avec différents nombres de trous (0–16).....	32
Figure I.41: Échangeur de chaleur à mini-canaux à l'étude.....	33

Figure I.42: Échangeur de chaleur à contre-courant à double tube.	33
Figure I.43: Comparaison des résultats d'analyse expérimentale et de validation (a) %0 (b)%5.....	34
Figure II.1: Photographie au microscope d'un nanofluide	38
Figure II.2: Formulation chimique de L'éthylène et de propylène glycol [27].....	40
Figure II.3: Toluène (C ₇ H ₈) a sept atomes de carbone (C).....	40
Figure II.4: Exemple de différentes nanoparticules étudiées en thérapeutique [26].	41
Figure II.5: Schéma du système GFS [44].....	54
Figure III.1: les étapes de calcul à l'aide d'un code CFD.....	62
Figure III.2: Géométrie d'échangeur de chaleur sans ailettes	62
Figure III.3: Géométrie d'échangeur de chaleur avec ailettes	63
Figure III.4: les dimensions des ailettes	63
Figure III.5: l'interface de Gambit.....	73
Figure III.6: Choix du solveur.....	74
Figure III.7: Création de la géométrie de l'échangeur de chaleur.....	75
Figure III.8: Maillage sans ailettes	75
Figure III.9: Maillage avec ailettes	75
Figure III.10: Les conditions aux limites des systèmes étudiés	76
Figure III.11: Exportation du maillage.....	76
Figure III.12: Interface du fluent	77
Figure III.13: Type de résolution.....	78
Figure III.14: Affichage du maillage.	78
Figure III.15: Définition du modèle.....	79
Figure III.16: Equation d'énergie	79
Figure III.17: Interface de la liste des fluides.....	80
Figure III.18: les propriétés de nanofluide.....	81
Figure III.19: Définition des conditions aux limites	81
Figure III.20: Control de solution.....	82
Figure III.21: Initialisation de la vitesse et la température à l'entrée.....	82
Figure III.22: Résidus des calculs.....	83
Figure III.23: Choix du nombre des itérations.	83
Figure III.24: Fenêtre des itérations.....	83
Figure III.255: Test de maillage.	84
Figure IV.1 Comparaison avec les travaux expérimentaux de Samad A. et al [49] dans un échangeur de chaleur sans et avec ailette pour le nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Reynolds. ...	89
Figure IV.2 Profil de vitesse à x= 0.944 de l'échangeur de chaleur à ailette pour le nanofluide [AL] _2 O_3/ eau à 5%	90
Figure IV.3 La variation de vitesse au milieu de l'échangeur pour le nanofluide [AL] _2 O_3/ eau à (1%, 3%, 5%) et pour nombre de Reynolds (5800,8500 ,10000).....	91
Figure IV.4 Profil de vitesse au milieu de l'échangeur de chaleur à ailette pour le nanofluide [AL] _2 O_3/ eau à 5% pour deux nombre de Reynolds.	92
Figure IV.5 la distribution de la vitesse à la sortie de l'échangeur de chaleur pour le nanofluide [AL] _2 O_3/ eau.....	93
Figure IV.6 Profil de vitesse à la sortie de l'échangeur de chaleur pour le nanofluide [AL] _2 O_3/ eau à Trois concentrations volumiques (1%,3% , 5%) pour un nombre de Reynolds égale 8500.	94

Figure IV.7 Profil de vitesse à la sortie de l'échangeur de chaleur pour le nanofluide $[\text{AL}]_2\text{O}_3/\text{eau}$ à 5% pour deux nombre de Reynolds, 5800 et 10000.	95
Figure IV.8 Contours de vitesse à travers la géométrie de l'échangeur de chaleur sans et avec ailette.	96
Figure IV.9 Iso vitesse pour le nanofluide $[\text{AL}]_2\text{O}_3/\text{eau}$ à une concentration volumique de 5% pour deux nombre de Reynolds 5800 et 10000.	97
Figure IV.10 Lignes de courant pour le nanofluide $[\text{AL}]_2\text{O}_3/\text{eau}$ à une concentration volumique de 5% pour deux nombre de Reynolds 5800 et 10000.	98
Figure IV.11 Contours de température à travers la géométrie de l'échangeur de chaleur sans et avec ailette.	99
Figure IV.12 Variation du Nombre de Nusselt pour différents concentrations volumiques de nanoparticule Al_2O_3 en fonction du nombre de Reynolds.	100
Figure IV.13 Critère d'évaluation des performances pour différents concentration volumique de nanoparticule Al_2O_3 en fonction du nombre de Reynolds.	101

Liste des tableaux :

Table 1: Conductivité thermique de divers fluides de base et matériaux	39
Table 2: Rapport des masses volumiques des différents nanofluides en fonction de la	43
Table 3: Dimensions géométriques détaillées de l'échangeur de chaleur sans ailettes.....	64
.Table 4: Dimensions géométriques détaillées de l'échangeur de chaleur avec ailettes	64
Table 5: propriétés du fluide de base et de nanoparticule utilisée dans cette recherche	68
Table 6: Propriétés du nanofluide à différentes concentrations volumiques	68
Table 7: Valeurs de vitesses correspondantes aux nombres de Reynolds choisis.	69
Table 8: Conditions aux limites.....	70

Nomenclature :

Symboles :

D	Diamètre [m]
D_h	Diamètre hydraulique [m]
d_p	Diamètre de nanoparticules [nm]
E	Epaisseur de la paroi [m]
f	Coefficient de frottement moyen
f_0	Facteur de frottement à l'écoulement d'eau pure
h	Coefficient d'échange thermique [W/m^2k]
k_b	Constante de Boltzmann, 1.3807×10^{-23}
L	Longueur de l'échangeur [m]
$Nu(x)$	Nombre de Nusselt local
P	Pression [Pa]
R_1	Rayon interne de tube interne [m]
R_2	Rayon externe de tube interne [m]
R_3	Rayon interne de tube externe [m]
R_4	Rayon externe de tube externe [m]
Re	Nombre de Reynolds
T	Température [k]
V	Volume [m^3]
C_p	capacité calorifique du fluide [$J/Kg.k$]

Indice :

Al_2O_3 dioxyde d'Aluminium

C chaud

f Froide

In entrer

Out sortie

nf Nanofluide

bf Base fluide.

s Solide.

np Nano particule.

Symboles grecs :

φ Concentration volumique [%]

μ Viscosité [Pa s]

\emptyset Flux thermique [W]

ρ Densité [kg/m³]

λ Conductivity thermique [W/mk]

η Efficacité

Δ Operateur de la différence

β Coefficient d'expansion

Introduction générale

Les échangeurs de chaleur jouent un rôle essentiel dans de nombreux systèmes de refroidissement et de chauffage industriels, et leur efficacité est d'une importance primordiale pour assurer des performances optimales. Dans le contexte actuel de recherche de solutions plus efficaces et innovantes, l'utilisation de nanofluides dans les échangeurs de chaleur est devenue une voie prometteuse. Les nanofluides sont des suspensions de nanoparticules dans un fluide de base, présentant des propriétés améliorées de transfert de chaleur par rapport aux fluides traditionnels. Cependant, l'analyse de leur comportement dans des configurations spécifiques, telles que les échangeurs de chaleur à ailettes, nécessite une approche numérique avancée.

Ce mémoire vise à étudier numériquement l'écoulement d'un nanofluide à travers un échangeur de chaleur à ailettes et à analyser ses caractéristiques thermiques. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité du transfert de chaleur dans ce système en présence de nanofluides et de déterminer les paramètres clés influençant les performances thermiques. Pour cela, le travail est organisé en quatre chapitres distincts qui aborderont les différents aspects de cette étude.

Le premier chapitre présente un aperçu des échangeurs de chaleur, en mettant en évidence leur importance dans les applications industrielles et les avantages potentiels qu'ils offrent en termes de transfert de chaleur amélioré. Et il consacré aussi à la présentation d'une revue bibliographique des principaux travaux publiés sur l'utilisation d'échangeur de chaleur avec ailettes et des nanofluides, cette revue permettra d'identifier les lacunes actuelles dans les connaissances et de déterminer les aspects spécifiques qui nécessitent une investigation approfondie.

Le deuxième chapitre se concentre sur des généralités sur les nanofluides, On présente quelques résultats de modèles proposés pour l'estimation des propriétés thermo-physiques des nanofluides ainsi que leurs influences sur le transfert de chaleur.

Le troisième chapitre décrit la méthodologie de simulation numérique qui sera utilisée pour modéliser l'écoulement du nanofluide à travers l'échangeur de chaleur à ailettes. Les équations fondamentales (conservation de la masse, de quantité de mouvement et d'énergie)

les modèles de turbulence et les techniques de discrétisation seront présentés, fournissant ainsi une base solide pour les simulations numériques à venir.

Introduction générale

Dans le quatrième et dernier chapitre on a consacré à l'analyse des résultats de simulation obtenus. Les caractéristiques thermiques de l'écoulement du nanofluide, Le modèle numérique est ensuite validé par les résultats expérimentaux de la littérature.

Enfin, une conclusion générale sera présentée dans le dernier chapitre, résumant les principaux résultats et conclusions de l'étude. Des perspectives pour de futures recherches et des recommandations pratiques seront également discutées.

Chapitre I : Généralités sur les échangeurs de chaleur

I. 1. Introduction

Un dispositif appelé échangeur de chaleur est conçu pour transférer la chaleur d'un fluide à un autre. Son utilisation est essentielle dans divers domaines liés à la gestion de l'énergie, tels que le chauffage, la climatisation, le stockage d'énergie, le refroidissement, et bien d'autres.

Un dispositif connu sous le nom d'échangeur de chaleur, comme présenté dans l'illustration I-1, est utilisé pour transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Son rôle est de faciliter cet échange thermique sans mélanger les fluides ni transférer de substances d'un fluide à l'autre.

Il existe divers types d'échangeurs, qui sont classés en fonction de critères spécifiques. Dans ce chapitre, nous allons examiner en détail l'échangeur à ailettes, qui fait partie des types d'échangeurs les plus couramment utilisés. Un autre type d'échangeur qui sera abordé est celui utilisant des particules de taille nanométrique, connu sous le nom de nanofluide. L'incorporation de ces nanoparticules modifie les propriétés thermiques et fluidiques du fluide de base.

Un dispositif largement utilisé pour le transfert de chaleur entre deux fluides est l'échangeur de chaleur à ailettes. Ce dispositif utilise des surfaces spéciales appelées ailettes pour faciliter l'échange thermique entre un fluide chaud et un fluide froid. Les ailettes, qui sont des extensions de surface, augmentent la surface d'échange thermique, favorisant ainsi une meilleure conduction de la chaleur entre les fluides.

En ce qui concerne leur interaction, il est possible d'utiliser des nanofluides en tant que fluides de travail dans les échangeurs de chaleur à ailettes. L'incorporation de nanoparticules dans les fluides de base améliore les propriétés thermiques des nanofluides, ce qui peut entraîner une amélioration globale des performances de l'échangeur de chaleur.

Cependant, il convient de prendre en compte les aspects pratiques et les défis liés à l'utilisation des nanofluides avant de les appliquer dans des applications spécifiques. [1].



Figure I.1: Echangeur de chaleur [1]

I. 2. Rôle de l'échangeur thermique

Le rôle fondamental d'un échangeur thermique est de transférer l'énergie thermique d'un fluide à un autre, sans les mélanger. Dans le contexte d'un système de chauffage ou de production d'eau chaude, un fluide primaire appelé "chauffant" est utilisé pour chauffer le fluide secondaire. Pour permettre un échange efficace, les deux fluides doivent avoir des températures différentes, d'où l'un est chaud et l'autre froid.

Pour faciliter le transfert de chaleur, l'échangeur thermique requiert un matériau suffisamment conducteur pour optimiser l'échange tout en minimisant les pertes de chaleur. Une fois que le transfert de chaleur s'effectue entre les deux fluides, l'échangeur thermique a accompli sa fonction essentielle.

Il est également important de souligner que l'échangeur thermique n'est pas uniquement utilisé pour chauffer un fluide. Selon le système dans lequel il est intégré, il peut être employé pour assurer la réfrigération du fluide, comme c'est le cas pour les climatiseurs ou les réfrigérateurs. [2]

I. 3. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur

Le fonctionnement d'un échangeur de chaleur repose sur le déplacement des deux fluides (chaud et froid) à travers des conduits, ce qui leur permet d'entrer en contact thermique à travers des parois généralement constituées de matériaux métalliques. En général, c'est le fluide chaud qui transfère de la chaleur au fluide froid, facilitant ainsi l'échange thermique entre eux.

L'un des défis consiste à définir des surfaces d'échange suffisantes entre les deux fluides afin de transférer une quantité donnée de chaleur. Ce paramètre dépend non seulement de la surface disponible, mais aussi de la température d'entrée, des propriétés thermiques (capacité thermique, conductivité thermique) et du coefficient de transfert de chaleur par convection.

L'efficacité d'un échangeur de chaleur dépend de plusieurs facteurs tels que la conception géométrique, la surface d'échange, les propriétés thermiques des matériaux utilisés et les débits des fluides. Différents types d'échangeurs de chaleur, tels que les échangeurs à plaques, les échangeurs à tubes et les échangeurs à coque et tubes, sont utilisés en fonction des besoins spécifiques de chaque application.

En résumé, un échangeur de chaleur facilite le transfert thermique entre deux fluides en utilisant les principes de conduction, de convection et de rayonnement thermique, permettant ainsi d'optimiser l'efficacité du processus de transfert de chaleur. [1] [3]

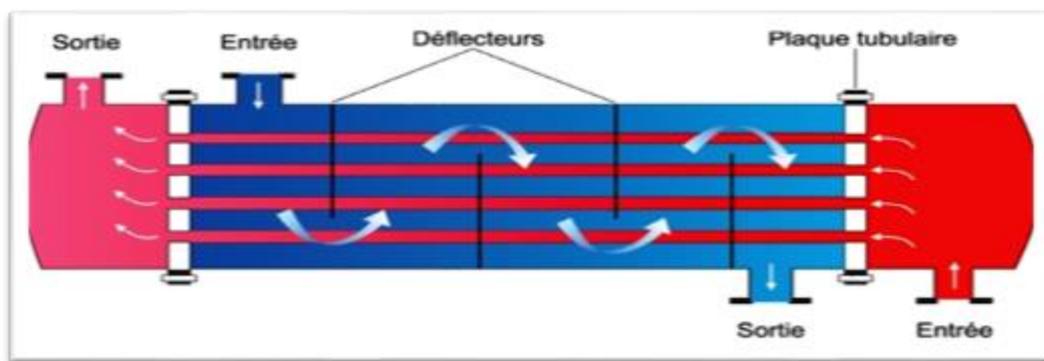


Figure I.2: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur

I. 4. Modes de transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur

I. 4. 1. Transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction correspond à un échange d'énergie qui se produit au contact direct de deux objets ou substances. Dans les gaz et les liquides, l'énergie se propage par les chocs aléatoires entre les molécules à l'échelle microscopique. Dans les solides, la conduction thermique est assurée par les électrons de conduction et les phonons, qui sont les vibrations du réseau cristallin. Les phonons interagissent avec les électrons libres, expliquant ainsi le lien entre la conductivité thermique et électrique. C'est pourquoi certains métaux tels que le cuivre, l'argent, l'aluminium, l'acier inoxydable sont de bons conducteurs de chaleur et d'électricité.

La conduction thermique correspond à un transfert spontané de chaleur d'une région à température élevée vers une région à température plus basse. La loi de Fourier établit que la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température.

Des exemples de transfert thermique par conduction se retrouvent dans notre vie quotidienne. Par exemple, la chaleur se propage à travers une paroi diathermique comme celle des radiateurs d'un système de chauffage central. En revanche, une paroi adiabatique, telle qu'une bouteille thermos, empêche le transfert de chaleur.

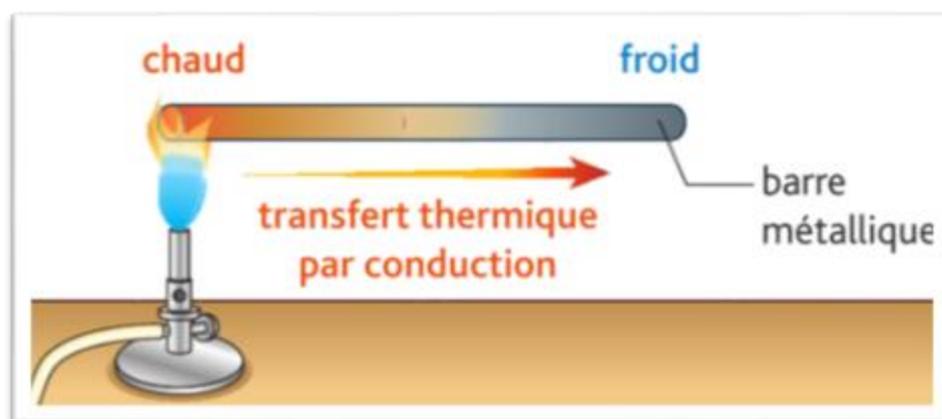


Figure I.3: Transfert de chaleur par conduction [5]

I. 4. 2. Transfert thermique par convection

Lors du transfert d'énergie dans un liquide ou un gaz, des mouvements moléculaires s'accompagnent de ce processus. La convection naturelle, également appelée convection libre, est un mécanisme d'échange de chaleur qui entraîne ces mouvements. C'est le transfert thermique lui-même qui induit ces mouvements. Par exemple, un radiateur électrique sans ventilateur ni soufflerie diffuse naturellement de l'air chaud. En revanche, on parle de convection forcée lorsque des mécanismes mécaniques entraînent les molécules vers la source de chaleur. Dans ce cas, le mouvement facilite le transfert thermique, tout comme lorsque l'on souffle sur un liquide chaud dans une tasse.

Ce même principe est observé dans les radiateurs à circulation d'eau ou d'air.

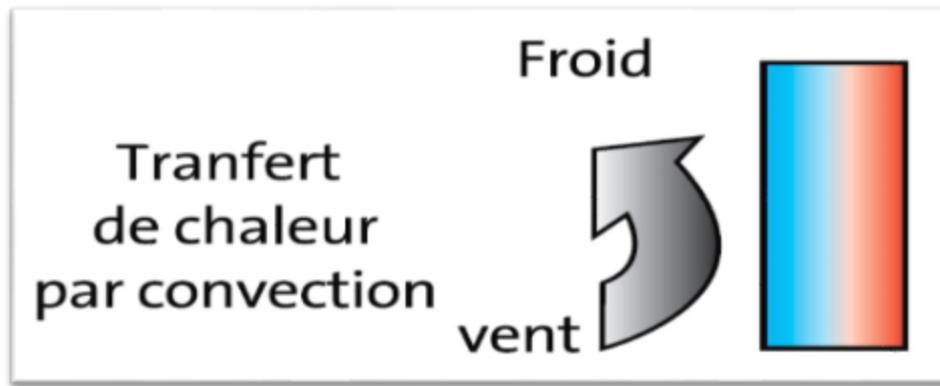


Figure I.4: Transfert de chaleur par convection [5]

I. 4. 3. Transfert thermique par rayonnement

Le transfert thermique peut s'effectuer par rayonnement électromagnétique, tel que l'infrarouge, qui peut se produire même en l'absence de matière, comme dans le vide. Un exemple caractéristique en est le rayonnement solaire dans l'espace.

Lorsque le corps récepteur est exposé au rayonnement, il peut réfléchir certaines longueurs d'onde. Ce sont uniquement les longueurs d'onde absorbées qui contribuent à l'équilibre thermique du corps récepteur. Dans le cas d'un corps noir, qui est un modèle idéal utilisé par les physiciens, il absorbe l'ensemble du rayonnement électromagnétique sans le réfléchir ni le transmettre, permettant ainsi à tout le rayonnement de contribuer à son équilibre thermique. Cependant, un corps noir est une abstraction et n'existe pas dans la réalité.

Ainsi, le transfert thermique par rayonnement joue un rôle important, même en l'absence de matière, et les physiciens utilisent le concept de corps noir comme référence pour étudier ces phénomènes.

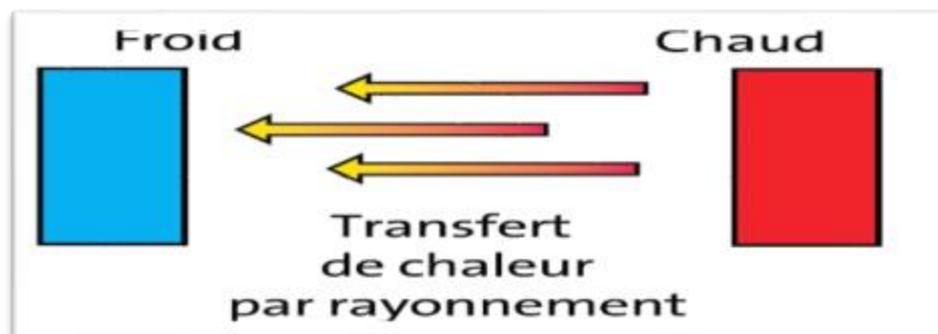


Figure I.5: Transfert de chaleur par rayonnement [5]

I. 5. Modes d'écoulement dans l'échangeur de chaleur

I. 5. 1. Co-Courants

Dans un échangeur de chaleur en écoulement co-courant, les fluides chauds et froids circulent dans la même direction. Les deux fluides entrent par le même côté de l'échangeur et se déplacent parallèlement l'un à l'autre. Cette configuration permet le transfert de chaleur entre les fluides, cependant, il est généralement moins efficace que l'écoulement contre-courant. En effet, au fur et à mesure que les fluides se déplacent le long de l'échangeur, la différence de température entre eux diminue. [5]

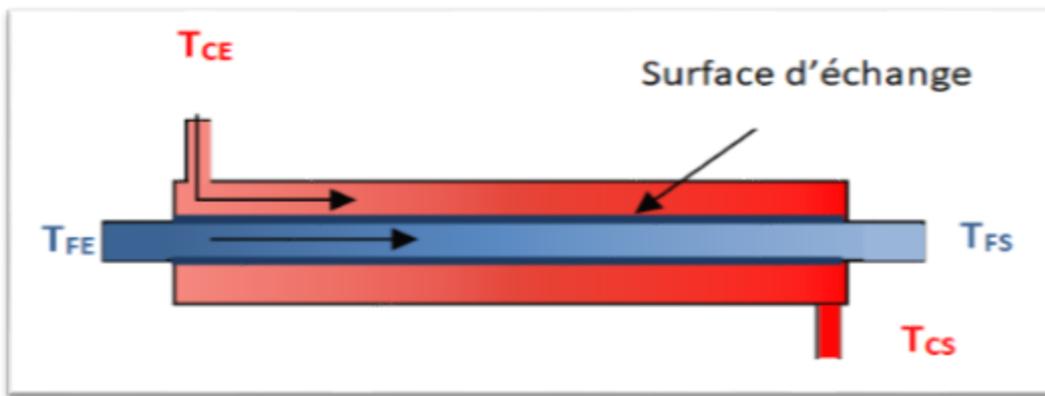


Figure I.6: écoulement Co-courant [7]

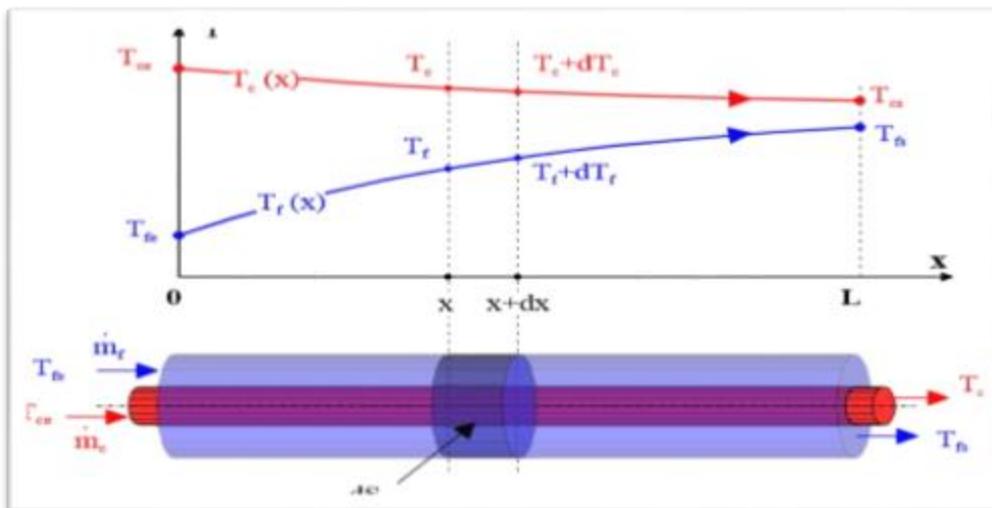


Figure I.7: Evolution des températures dans un échangeur à co-courant

I. 5. 2. Contre-courants

Dans un échangeur de chaleur en écoulement contre-courant, les fluides chauds et froids circulent dans des directions opposées. Cela signifie que le fluide chaud pénètre par un côté de l'échangeur tandis que le fluide froid entre par l'autre côté. Les flux de fluides se déplacent en sens inverse, créant ainsi un gradient de température le long de l'échangeur. L'écoulement contre-courant est considéré comme le plus efficace en termes de transfert de chaleur, car il permet d'obtenir la plus grande différence de température moyenne entre les deux fluides. Cette différence de température maximisée favorise un transfert de chaleur plus efficace entre les fluides.

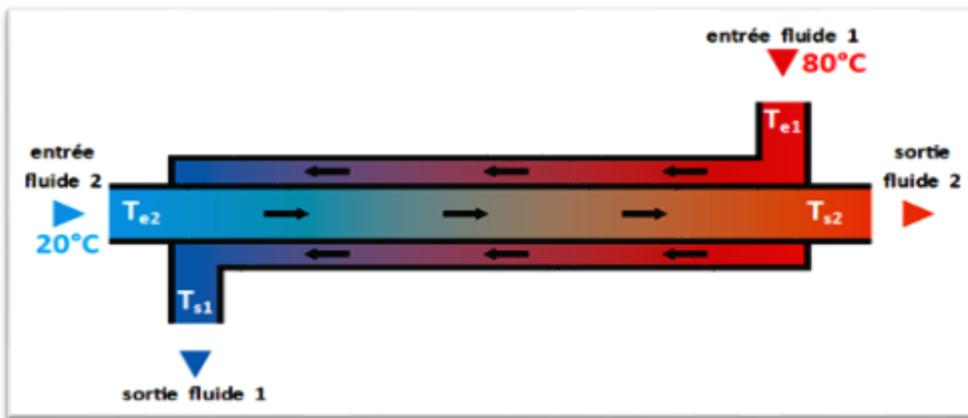


Figure I.8: Ecoulement contre-courant [7]

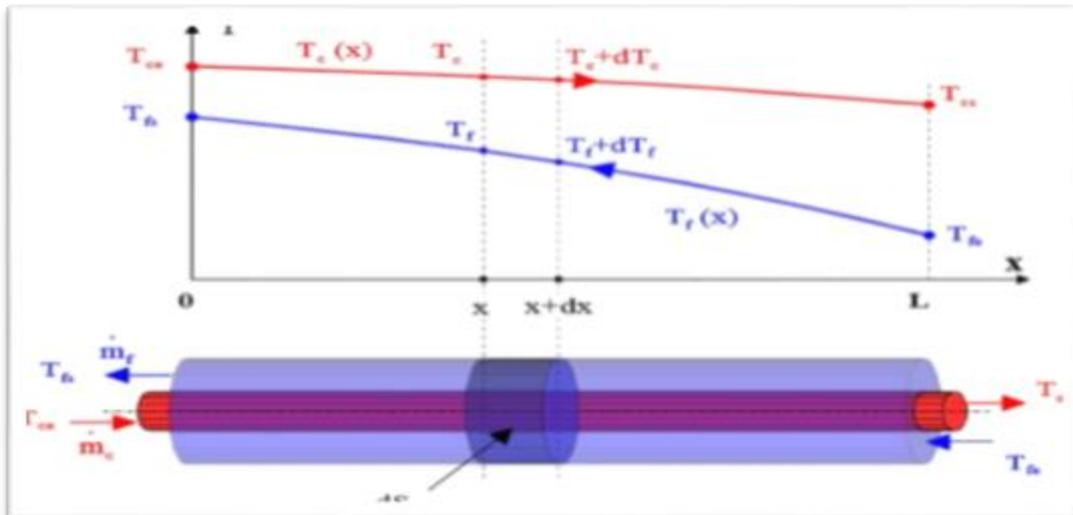


Figure I.9: Evolution des températures dans un échangeur à contre-courant.

I. 5. 3. Courants croisés

Dans un échangeur de chaleur en écoulement courant croisé, les fluides chauds et froids se déplacent de manière perpendiculaire l'un par rapport à l'autre. Cela crée une configuration en forme de croix dans laquelle les deux fluides traversent l'échangeur de chaleur. L'écoulement courant croisé est couramment utilisé dans les échangeurs de chaleur à plaques ou à faisceaux tubulaires. Bien que le transfert de chaleur puisse toujours s'effectuer dans ce mode d'écoulement, il est généralement moins efficace que l'écoulement contre-courant en raison de la différence de température moins élevée entre les fluides. [5]

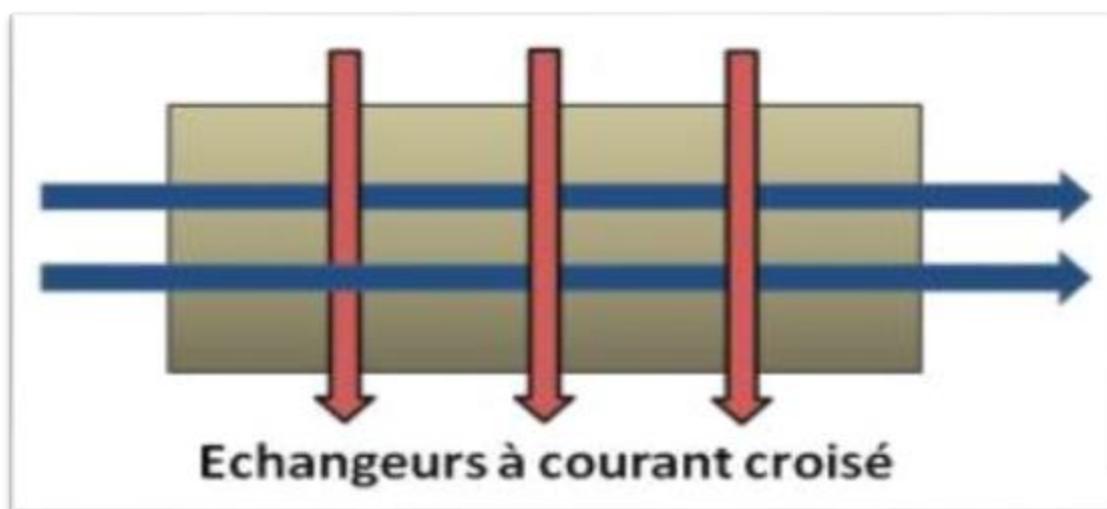


Figure I.10: écoulement à courants croisés [7]

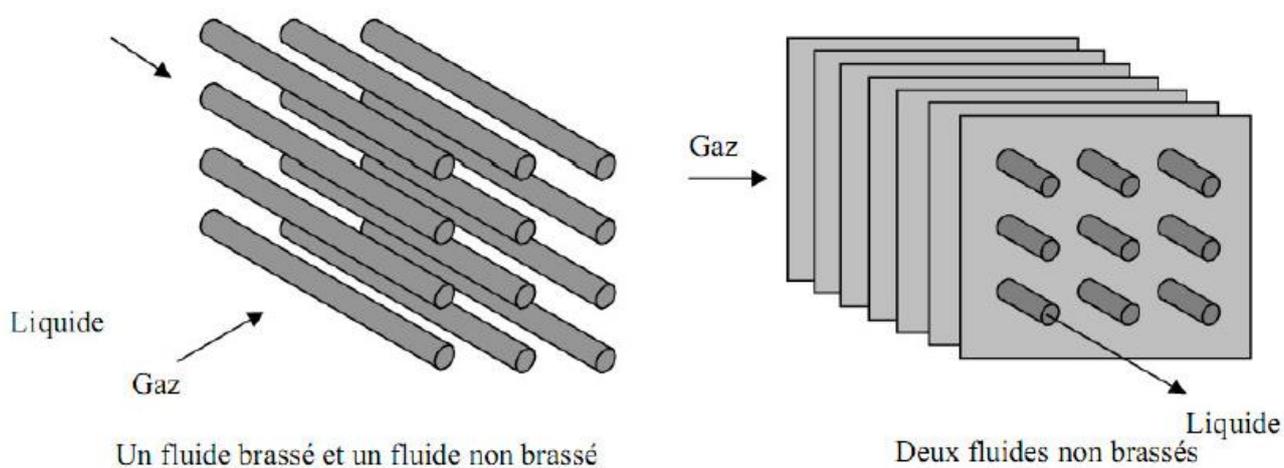


Figure I.11: Types d'échangeurs à courants croisés [7].

I. 6. Types d'échangeur de chaleur

I. 6. 1. Échangeur de chaleur tubulaire (à tube)

Les échangeurs de chaleur tubulaires sont des dispositifs composés de tubes dont les parois servent de surface d'échange thermique. En raison de leur popularité historique et de leur aspect économique, les échangeurs de chaleur tubulaires sont largement utilisés. [6]

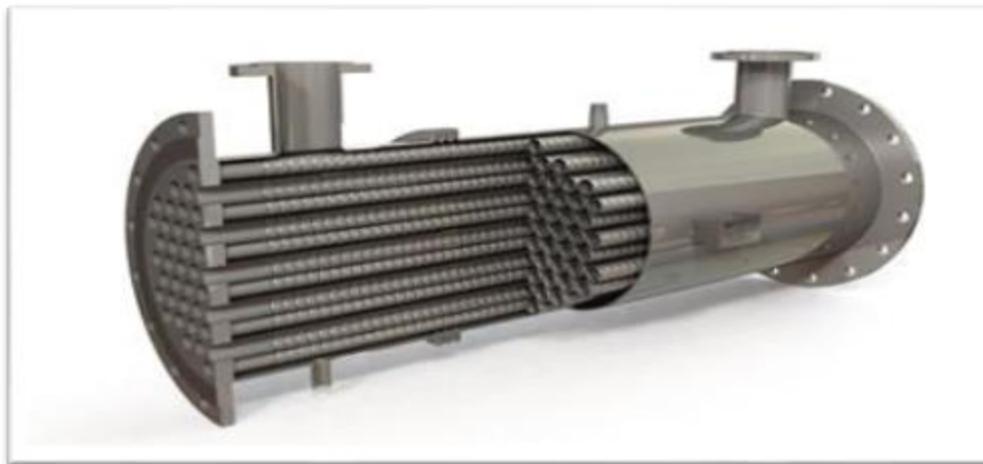


Figure I.12: Échangeur de chaleur tubulaire (à tube) [9]

I. 6. 2. Echangeurs monotube

Un échangeur de chaleur à nanotubes de carbone est un appareil qui exploite les propriétés des nanotubes de carbone pour faciliter le transfert de chaleur entre les fluides. Grâce à leur conductivité thermique élevée, les nanotubes de carbone présentent un potentiel prometteur pour améliorer les performances de transfert de chaleur. Toutefois, des défis techniques doivent être surmontés avant une utilisation plus répandue de cette technologie. [9]

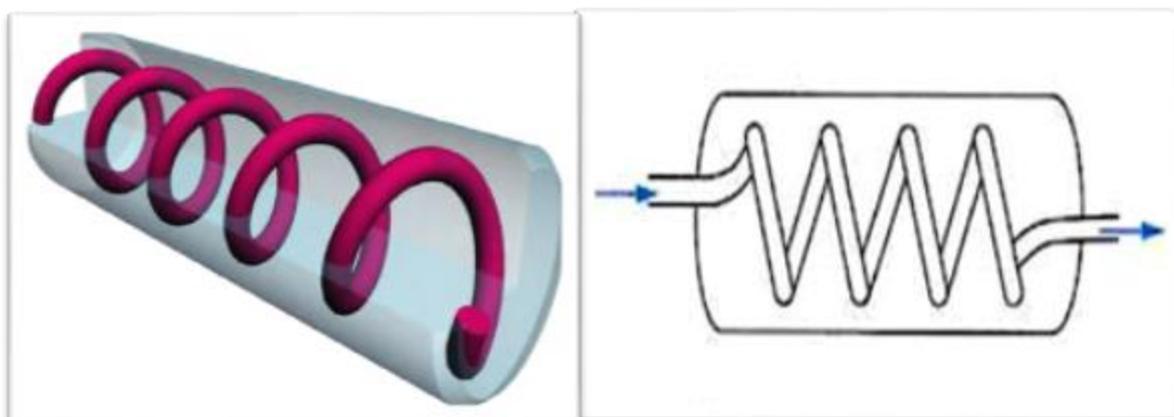


Figure I.13: Echangeur de chaleur tubulaire à monotube. [10]

I. 6. 3. Echangeurs coaxiaux

L'échangeur de chaleur coaxial est un dispositif qui permet le transfert de chaleur entre deux fluides en faisant circuler ces derniers à travers des espaces annulaires concentriques entre un tube intérieur et un tube extérieur. Cette configuration est fréquemment utilisée dans des applications de chauffage, de refroidissement et de condensation, ainsi que dans des environnements où une isolation adéquate entre les fluides est essentielle.

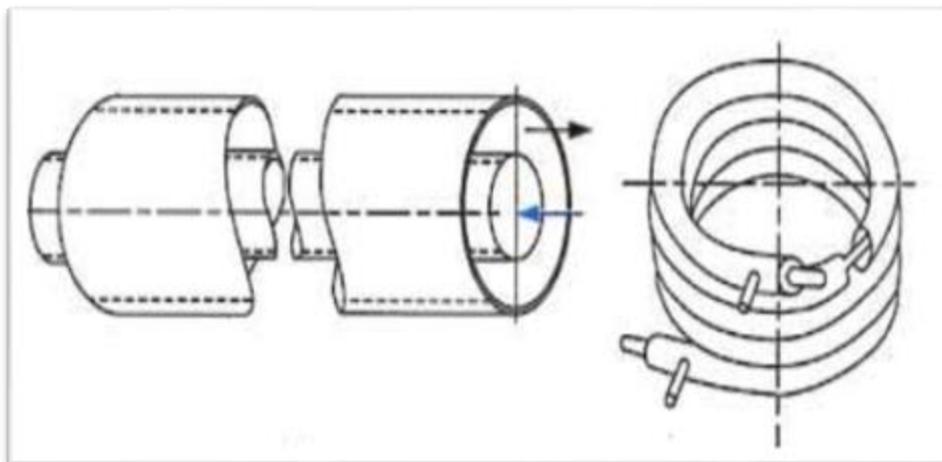


Figure I.14: échangeur de chaleurs tubulaires coaxiales. [10]

I. 6. 4. Échangeurs multitubulaires

Les échangeurs de chaleur à tubes multiples sont largement utilisés dans des secteurs industriels nécessitant des transferts de chaleur importants, tels que les raffineries, les centrales électriques, les industries chimiques et pétrochimiques, ainsi que dans les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation. Ces échangeurs offrent une grande surface d'échange thermique, une flexibilité de conception et sont fréquemment employés dans des applications nécessitant des échanges thermiques de grande envergure.

Il existe quatre formes pour ces échangeurs

I. 6. 4. 1. Échangeur à tubes séparés

Dans un échangeur de chaleur à tubes individuels, le transfert de chaleur s'effectue à travers des tubes distincts, permettant ainsi le transfert thermique entre les fluides. Il convient de souligner que les échangeurs de chaleur à tubes individuels peuvent avoir une surface d'échange thermique plus réduite par rapport aux échangeurs multitubulaires, ce qui peut avoir une incidence sur leur efficacité selon l'application spécifique.

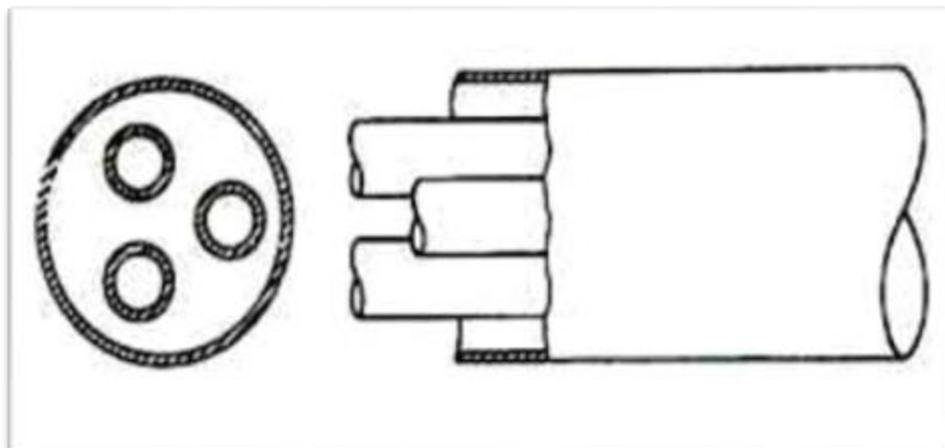


Figure I.15: échangeur de chaleur multitubulaire à tubes séparés. [10]

I. 6. 4. 2. Échangeur à tubes rapprochés

Un échangeur de chaleur à tubes rapprochés est un dispositif qui utilise un arrangement de tubes très proches les uns des autres afin de maximiser la surface d'échange thermique et d'améliorer l'efficacité du transfert de chaleur. Ces échangeurs offrent des avantages tels qu'une meilleure efficacité, une compacité et des économies potentielles de coûts. Cependant, il convient de noter qu'ils peuvent être plus sensibles aux problèmes d'encrassement en raison de l'espacement étroit entre les tubes. Une attention particulière doit donc être portée à cet aspect pour éviter ces problèmes.

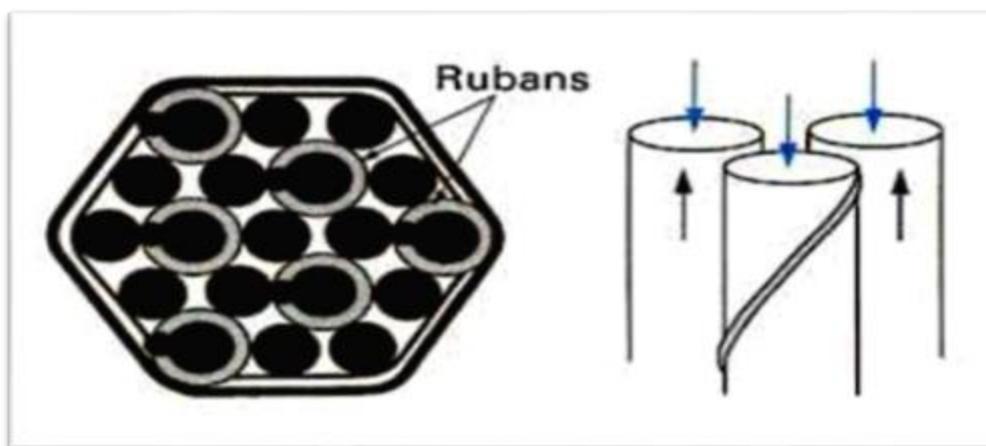


Figure I.16: Echangeur de chaleur multitubulaire à tubes rapprochés. [10]

I. 6. 4. 3. Échangeurs à tubes ailettes

Lorsqu'un échangeur de chaleur est utilisé pour transférer de la chaleur entre deux fluides, il peut arriver que l'un des fluides ait une meilleure capacité de transfert thermique que l'autre. Dans de tels cas, des ailettes sont ajoutées autour ou à l'intérieur des tubes de l'échangeur afin de réduire la résistance thermique globale.

Un exemple courant est celui des échangeurs gaz-liquide, également appelés "batteries à ailettes". Ces échangeurs sont composés de multiples couches de tubes à travers lesquels circule un fluide ayant de bonnes propriétés de transfert thermique. Les ailettes sont utilisées à l'extérieur des tubes pour minimiser la différence de résistance thermique entre l'interface interne et externe, car le fluide externe est généralement un gaz.

En intégrant des ailettes, on augmente la surface d'échange thermique et on améliore l'efficacité du transfert de chaleur, ce qui permet d'optimiser les performances globales de l'échangeur.

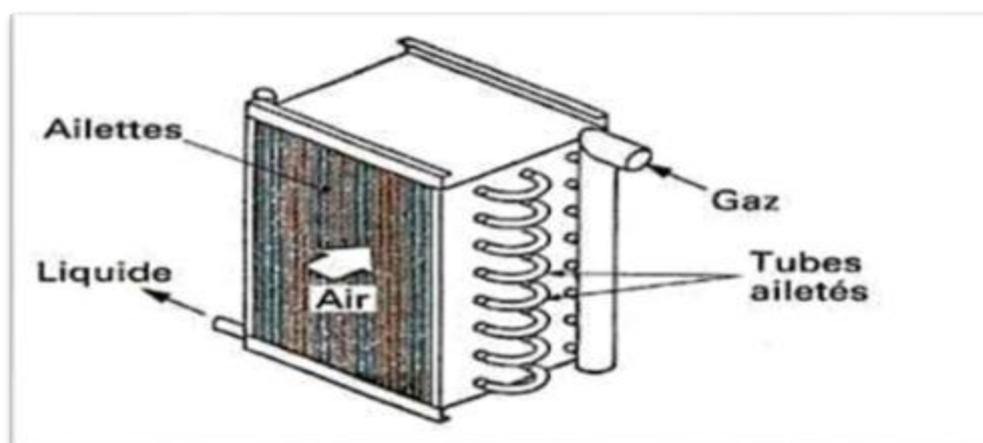


Figure I.17: échangeur de chaleur multitubulaire avec tubes à ailettes [10]

I. 6. 4. 4. Échangeurs à tubes et calandre

Les échangeurs de chaleur à calandre et tubes sont des dispositifs qui utilisent une structure composée d'une calandre externe et de tubes internes pour faciliter le transfert de chaleur entre deux fluides. Ces échangeurs offrent de nombreux avantages, tels qu'une efficacité élevée dans le transfert de chaleur, une capacité d'adaptation aux variations de débit et de température, ainsi qu'une facilité d'entretien. Cependant, il convient de noter qu'ils peuvent être plus complexes et coûteux à fabriquer que d'autres types d'échangeurs.

Les échangeurs de chaleur à calandre et tubes sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur performance éprouvée. Lors du choix d'un échangeur de chaleur de ce type, deux paramètres importants à considérer sont l'encrassement, qui peut affecter l'efficacité du transfert de chaleur, et la différence de température entre les deux fluides, qui a un impact sur le gradient de chaleur et donc sur l'efficacité globale de l'échangeur. [3]

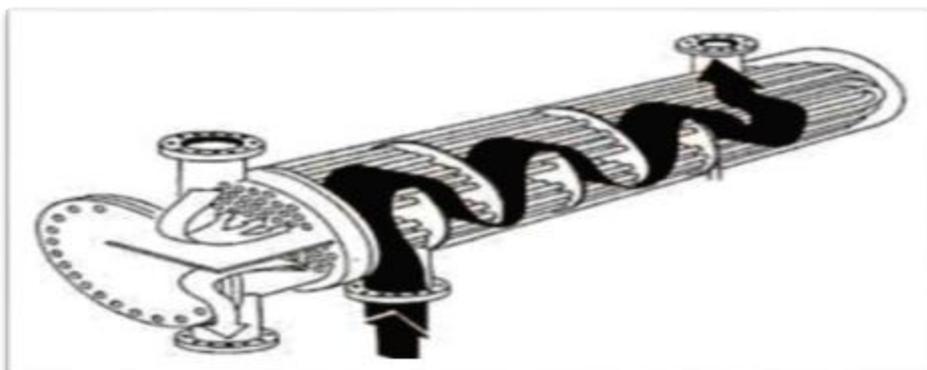


Figure I.18: échangeur de chaleur multitubulaire à tubes et calandre. [10]

I. 6. 5. Échangeurs à plaques

Les échangeurs de chaleur à plaques sont des dispositifs qui exploitent des plaques métalliques empilées pour faciliter le transfert de chaleur entre les fluides. Ces plaques, qui sont généralement minces, sont disposées en alternance pour créer des canaux à travers lesquels circulent les fluides chauds et froids. Les plaques sont étroitement pressées les unes contre les autres afin de favoriser une conductivité thermique efficace et de permettre un transfert de chaleur rapide. [3]

Les échangeurs de chaleur à plaques présentent de nombreux avantages, tels qu'une surface d'échange thermique étendue, une compacité, une efficacité de transfert de chaleur élevée et une facilité d'entretien. En conséquence, ils sont largement utilisés dans divers secteurs industriels et commerciaux. Ces applications incluent les systèmes de chauffage et de refroidissement, les systèmes de climatisation, les industries chimiques et alimentaires, les systèmes de récupération de chaleur, ainsi que d'autres domaines où le transfert de chaleur est essentiel. [3].

On distingue deux catégories de ce type d'échangeur. Selon la géométrie du canal utilisé, les échangeurs à surface primaire et échangeurs à surface secondaire, comme suit :



Figure I.19: Echangeur de chaleur à plaques [10]

I. 6. 5. 1. Échangeur à surface primaire

Les échangeurs de chaleur de ce type ont certaines limitations en termes de pression maximale de fonctionnement et de différence de pression entre les deux fluides. De plus, la température maximale de fonctionnement est également limitée par les propriétés des joints utilisés dans l'échangeur. Ces facteurs doivent être pris en compte lors de la sélection et de l'utilisation de ces échangeurs de chaleur.

On peut distinguer deux catégories d'échangeurs à plaque :



Figure I.20: Echangeur de chaleur à plaque à surface primaire. [10]

I. 6. 5. 2. Échangeur à plaque et joints

Ces échangeurs sont constitués d'un assemblage de nombreuses plaques métalliques minces conçues spécifiquement pour faciliter le transfert de chaleur entre deux liquides.

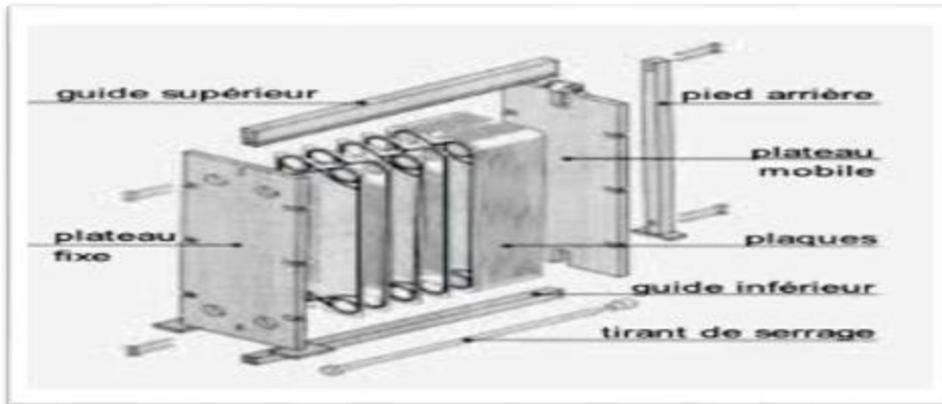


Figure I.21: Echangeur de chaleur à plaques et joints. [10]

I. 6. 5. 3. Échangeurs à plaques soudées ou brasées :

Ces échangeurs de chaleur à plaques sont couramment utilisés dans divers secteurs industriels tels que l'industrie chimique, la pétrochimie et d'autres domaines similaires.



Figure I.22: Echangeur de chaleur à plaques soudées ou brasées. [5]

Il en existe différents types et parmi eux :

- ✓ Échangeur platulaire
- ✓ Échangeur compabloc
- ✓ Échangeur packinox
- ✓ Échangeur lamellaire
- ✓ Échangeur à spirale

I. 6. 6. Échangeur à surface secondaire

I. 6. 6. 1. Échangeurs à plaques serties

Ces échangeurs de chaleur sont fabriqués en utilisant des matériaux tels que l'aluminium ou l'acier inoxydable. Ils sont composés d'un empilement de tôles ondulées formant des ailettes séparées par des plaques planes. Il existe deux types d'échangeurs de chaleur en fonction du mode de fabrication et des matériaux utilisés. L'un d'entre eux est constitué de tôles planes parallèles entre lesquelles des ailettes sont disposées. Ils sont fabriqués en utilisant des tôles légères, telles que l'acier galvanisé ou l'acier inoxydable. [5]

I. 6. 6. 2. Échangeurs à plaques brasées

Ces échangeurs de chaleur sont fabriqués en utilisant un procédé de brasage à l'aluminium. Les fluides circulent à travers des passages formés entre deux tôles planes consécutives, qui sont fermés sur les côtés par des barres. Cette conception permet un échange de chaleur efficace entre les fluides en maintenant une séparation claire et en favorisant un transfert thermique optimal.



Figure I.23: Echangeur de chaleur à plaques brasées.[10]

I. 6. 7. Autres types d'échangeurs

Il existe également d'autres types d'échangeurs de chaleur en plus de ceux mentionnés précédemment, qui peuvent être décrits comme suit :

I. 6. 7. 1. Échangeur à caloducs

Les caloducs sont des dispositifs de transfert thermique qui fonctionnent en boucle fermée selon le principe de l'évaporation-condensation. Leur principale particularité réside dans la grande quantité de chaleur latente libérée ou absorbée lors du changement de phase. Ces échangeurs de chaleur sont généralement conçus en configuration de flux croisé, avec une disposition verticale. Ils se distinguent par leur faible poids, l'absence de pièces mobiles et leur compacité. Il est important de noter que les conduits d'air, qu'ils soient d'admission ou d'évacuation, doivent être hermétiquement scellés pour assurer leur bon fonctionnement. [9]



Figure I.24: Echangeur de chaleur à caloduc [9]

I. 6. 7. 2. Échangeurs à lit fluidisé

Un lit fluidisé est constitué d'un ensemble de particules immergées dans un fluide en mouvement. Dans certaines situations, le fluide qui circule à travers les particules échange de la chaleur avec le lit fluidisé et les surfaces d'échange présentes. Les principaux avantages de cette configuration sont les suivants :

- ✓ Un bon transfert de chaleur entre gaz et particules.
- ✓ Un coefficient d'échange thermique élevé entre le lit et les surfaces d'échange.
- ✓ Une distribution uniforme de la température du lit.
- ✓ Un effet d'auto-nettoyage des surfaces

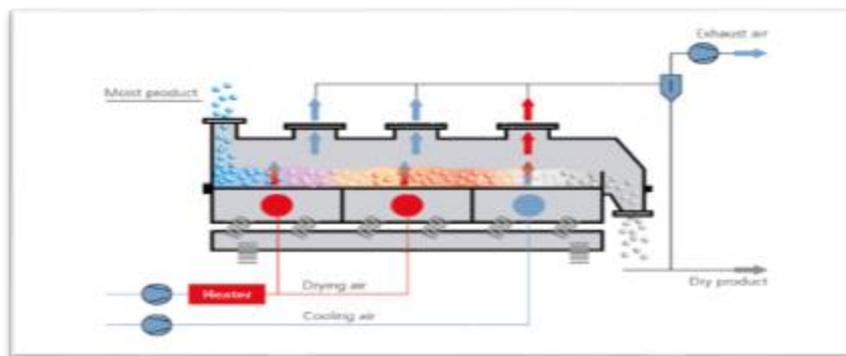


Figure I.25: Sécheur a lit fluidisé [9]

I. 6. 7. 3. Échangeur de chaleur à contact direct

Dans les échangeurs à contact direct, les deux fluides entrent en contact direct sans être séparés par une paroi, ce qui permet un échange de chaleur entre eux. Après l'échange de chaleur, les fluides sont ensuite séparés. En raison de l'absence de paroi, les températures des fluides peuvent se rapprocher davantage. Dans certains cas, le processus de transfert de chaleur dans ce type d'échangeur s'accompagne également d'un transfert de masse. [9]

I. 7. Echangeurs de chaleurs à ailettes

Les échangeurs de chaleur à ailettes sont largement utilisés pour le refroidissement ou le chauffage de liquides à l'aide de gaz, ou vice versa. Ils conviennent à une variété d'agents réfrigérants ou chauffants tels que l'eau, la saumure, la vapeur saturée, l'huile hydraulique, l'huile lubrifiante, l'huile thermique, les agents réfrigérants condensés ou évaporés, etc.

Les échangeurs de chaleur à ailettes sont très efficaces pour transférer la chaleur entre les fluides en raison de l'augmentation de la surface de contact due aux ailettes. Cela améliore considérablement le transfert de chaleur. De plus, les échangeurs de chaleur à ailettes sont compacts, ce qui les rend particulièrement adaptés aux espaces restreints. [9].

I. 7. 1. Effet de la géométrie d'ailette

La configuration des ailettes dans un échangeur de chaleur est un facteur essentiel pour assurer un transfert de chaleur efficace. Des paramètres tels que la hauteur, l'épaisseur, l'espacement et la forme des ailettes doivent être pris en compte avec attention afin de maximiser la surface d'échange thermique et d'optimiser les performances de l'échangeur. Voici quelques aspects importants de l'influence de la géométrie des ailettes :

- La hauteur et l'épaisseur des ailettes ont une incidence directe sur la surface de transfert de chaleur disponible, permettant ainsi un échange thermique plus efficace entre les fluides
- L'espacement entre les ailettes joue un rôle crucial en influençant la résistance à l'écoulement des fluides et en favorisant la création de turbulences. Un espacement réduit entre les ailettes facilite un meilleur mélange des fluides, améliorant ainsi le transfert de chaleur.
- Les ailettes peuvent présenter diverses formes, telles que plates, ondulées ou en forme de V. La forme des ailettes affecte le mouvement des fluides et la génération de turbulences, ce qui a un impact sur l'efficacité du transfert de chaleur.
- Le choix du matériau des ailettes peut également avoir une incidence sur l'efficacité du transfert de chaleur, en tenant compte de facteurs tels que la conductivité thermique, la résistance à la corrosion et la durabilité dans les conditions de fonctionnement spécifiques de l'échangeur de chaleur. [11]

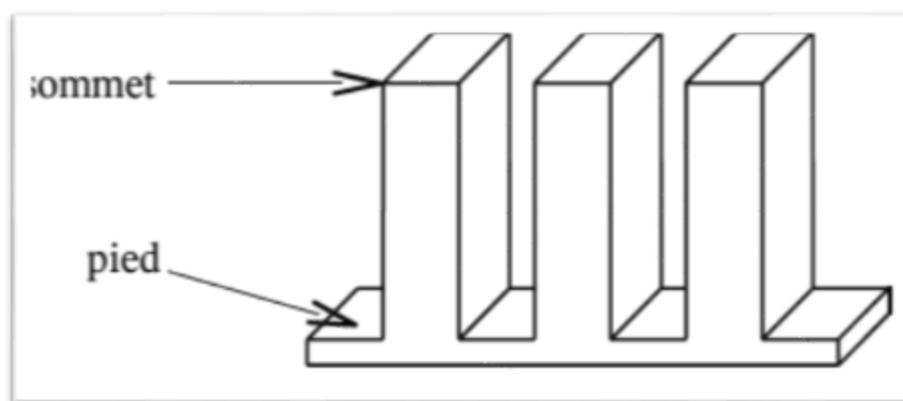


Figure I.26: Exemple d'une surface à ailettes [11]

I. 7. 2. Quelques types d'ailettes

I. 7. 2. 1. Ailettes continues

Dans les échangeurs à ailettes, l'objectif principal est de perturber le flux et de réduire l'épaisseur de la couche limite pour favoriser le transfert de chaleur. Les échangeurs à ailettes plates sont largement utilisés dans diverses applications technologiques en raison de leur configuration simple, de leur facilité de fabrication et de leur fiabilité élevée. Ces échangeurs permettent de minimiser les pertes de pression, ce qui les rend particulièrement attrayants pour de nombreuses applications. [7]

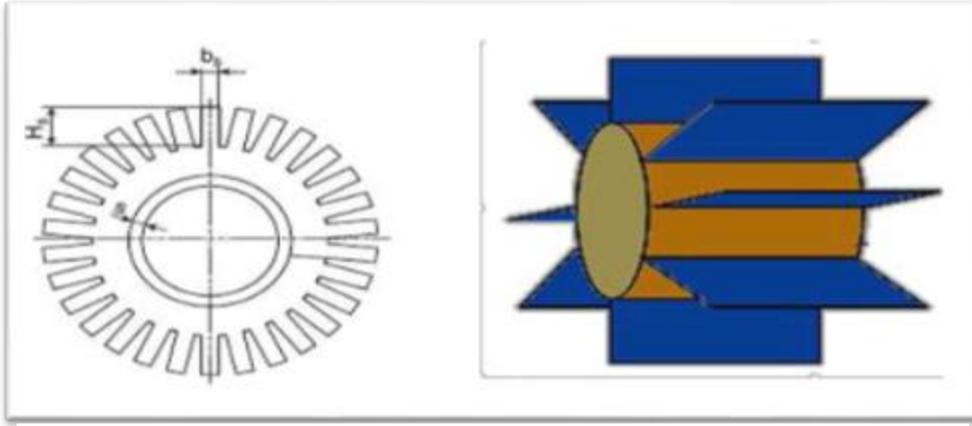


Figure I.27: Ailettes continues [9]

I. 7. 2. 2. Ailettes annulaires

Dans cette section, nous présentons une vue d'ensemble des différentes configurations géométriques des ailettes utilisées dans ce contexte spécifique. Deux configurations principales sont couramment utilisées pour les ailettes annulaires. [9]

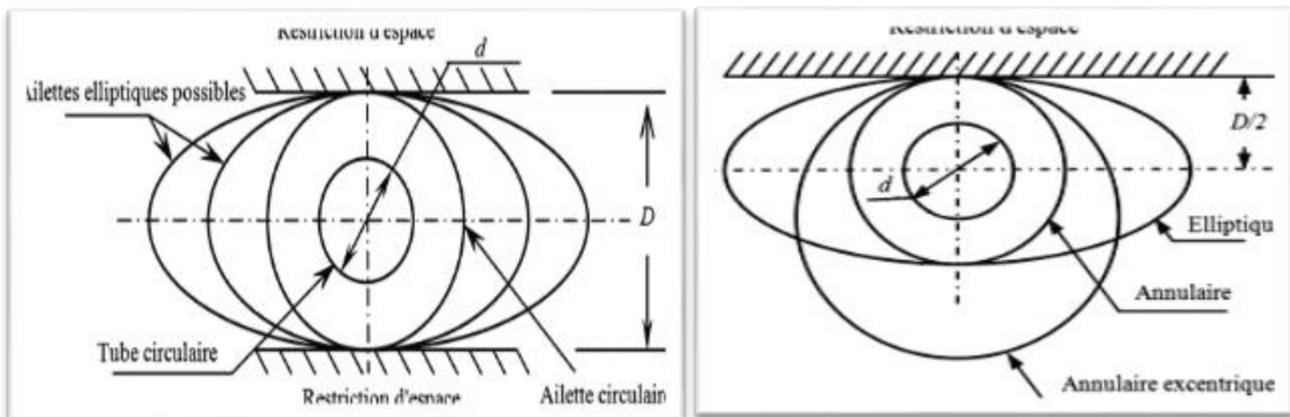
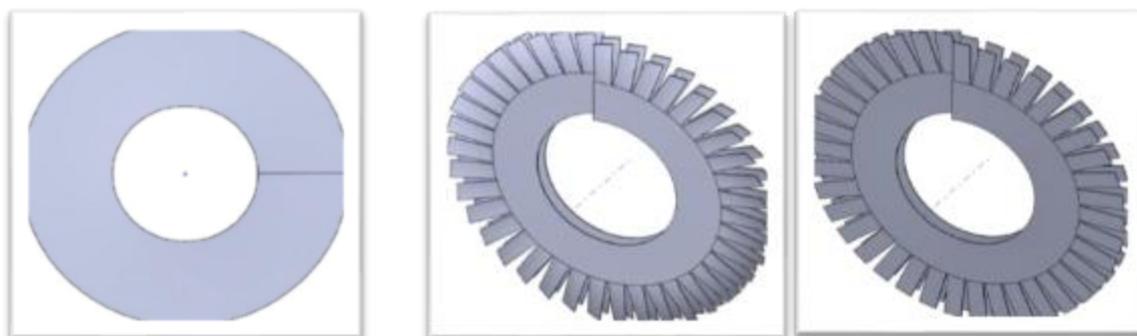


Figure I.28: Différentes géométries et profils d'ailette pour une et deux restriction d'espace [9]

I. 7. 2. 3. Ailettes dentelées

Pour améliorer les performances thermiques et dynamiques des ailettes annulaires, plusieurs chercheurs ont étudié la géométrie dentelée des ailettes. Une analyse théorique de l'efficacité des ailettes dentelées a été réalisée par Kenichi et al. (2010) en utilisant un modèle analytique simplifié. Ce modèle présente deux hypothèses clés : un coefficient d'échange thermique uniforme sur la surface des ailettes et une isolation thermique à l'extrémité de la section segmentée [9].



(a) Ailette dentelée sans vrillage

(b) Ailette dentelée avec vrillage

Figure I.29: Géométries d'ailettes [7]

I. 7. 3. Analyse de l'effet des paramètres géométriques

Dans cette partie du mémoire, nous avons examiné plusieurs études de recherche qui se sont penchées sur l'influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques de transfert de chaleur et les pertes de pression dans un échangeur de chaleur à tubes et ailettes. La Figure 1.30 illustre les différents paramètres géométriques qui déterminent la configuration d'un tel échangeur de chaleur.

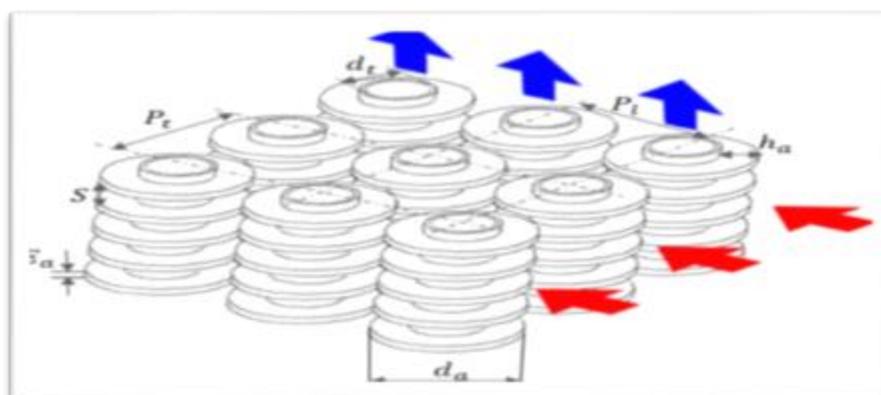


Figure I.30: Différents paramètres géométriques définissant un échangeur thermique. [7]

I. 7. 4. Domaines d'application

Les échangeurs de chaleur à ailettes sont largement utilisés dans divers domaines où un transfert de chaleur efficace est essentiel. Voici quelques exemples d'applications courantes pour les échangeurs de chaleur à ailettes :

- ✓ Refroidissement industriel : Les échangeurs de chaleur à ailettes sont utilisés pour

dissiper la chaleur générée par différents équipements industriels tels que les compresseurs, les moteurs, les générateurs, les turbines, les fours et les chaudières.

✓ Climatisation et réfrigération : Les échangeurs de chaleur à ailettes sont utilisés dans les systèmes de climatisation, les unités de réfrigération commerciales et résidentielles, les systèmes de réfrigération industrielle et les pompes à chaleur.

✓ Refroidissement des moteurs automobiles : Les échangeurs de chaleur à ailettes sont largement utilisés dans les systèmes de refroidissement des moteurs automobiles pour dissiper la chaleur générée par le moteur.

✓ Production d'énergie : Les échangeurs de chaleur à ailettes sont utilisés dans les centrales électriques, les installations de production d'énergie solaire et éolienne, les installations de cogénération et les systèmes de récupération de chaleur.

✓ Industrie chimique : Les échangeurs de chaleur à ailettes sont utilisés dans les procédés de production chimique pour le refroidissement et le chauffage des réacteurs, des colonnes de distillation, des réfrigérants et des réchauffeurs.

✓ Chauffage et refroidissement des bâtiments : Les échangeurs de chaleur à ailettes sont utilisés dans les systèmes de chauffage et de refroidissement des bâtiments pour transférer la chaleur entre les fluides de chauffage et les systèmes de distribution d'air ou d'eau.

Ces exemples illustrent la polyvalence des échangeurs de chaleur à ailettes et leur utilisation répandue dans de nombreux secteurs d'activité.

I. 7. 5. Différents types d'échangeur de chaleur à ailettes

Les refroidisseurs d'huile à air de la série FLNB sont le résultat d'un développement basé sur les connaissances les plus récentes en matière de thermo technique. Ils sont conçus en utilisant des éléments en aluminium, dotés d'une carcasse ou d'un capot, ainsi qu'un ventilateur intégré. La gamme standard comprend une variété de 12 modèles différents, offrant une capacité de refroidissement maximale de 150 kW. Ces refroidisseurs sont principalement utilisés pour abaisser la température de l'huile hydraulique, de l'huile lubrifiante ou de l'huile des engrenages lors de leur retour dans le système. [11]



Figure I.31: Refroidisseur d'huile à air [11]

I. 7. 5. 1. Type lk

Les réfrigérants de retour de la série LK sont couramment utilisés pour évacuer l'excès de chaleur dans l'air ambiant. Ils sont adaptés pour diverses applications, que ce soit dans des circuits hydrauliques avec des fluides tels que l'eau ou la saumure, ou même en tant que condenseurs. La série standard comprend un total de 24 types différents, offrant une surface thermiquement conductrice maximale de 1200 m². [11]



Figure I.32: Type lk [11]

I. 7. 5. 2. Type LBD

Ce type d'échangeur est spécifiquement conçu pour chauffer l'air ou le gaz du processus en condensant de la vapeur saturée ou surchauffée. Selon les besoins, différentes options de matériaux sont disponibles, telles que l'acier galvanisé, l'acier inoxydable, etc. Ces échangeurs peuvent également être utilisés dans des applications à haute pression de service, allant jusqu'à 800 bars, avec les certifications d'épreuve appropriées. [11].



Figure I.33: Type LBD [11]

I. 7. 5. 3. Type LBF

Ce type polyvalent d'échangeur de chaleur à ailettes est utilisé pour le chauffage et le refroidissement de gaz et de liquides. Il offre une flexibilité en termes de combinaisons de matériaux, allant du cuivre, du cupronickel, du laiton à l'aluminium, ainsi que des matériaux entièrement inoxydables pour une excellente résistance à la corrosion. Les éléments de l'échangeur peuvent être construits jusqu'à une longueur de 8000 mm. [11]



Figure I.34: Type LBF [11]

I. 7. 5. 4. Type LBW

L'utilisation croissante de la récupération de chaleur à partir d'air déjà utilisé et vicié est devenue un enjeu majeur. La série LBW se concentre spécifiquement sur l'exploitation efficace de la chaleur perdue. Cela permet l'utilisation de grands volumes d'air vicié à des températures plus basses. [11]



Figure I.35: Type LBW [11]

I. 7. 5. 5. Type KKG

Les refroidisseurs à haute pression sont utilisés dans des applications spéciales où la compression de gaz naturels ou de gaz techniques atteint des pressions finales allant jusqu'à 800 bar. La série KKG offre une solution simple et sécurisée pour le refroidissement des gaz comprimés. [11].



Figure I.36: Type KKG [11]

I. 8. Revues bibliographiques

Plusieurs expériences ont été réalisées pour étudier le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur à ailettes. Une étude expérimentale réalisée par **Wang et al** [12] a examiné 15 modèles d'échangeurs de tubes à ailettes planes. Les chercheurs ont analysé et comparé l'impact des différents paramètres géométriques, tels que le nombre de rangées et l'espacement entre les tubes. Le choix d'un type spécifique d'ailette annulaire dépend principalement de sa géométrie. **Mokheimer** [13] a réalisé une étude portant sur l'effet de la variation du coefficient de transfert thermique local sur l'efficacité d'une ailette annulaire

utilisant différents profils : rectangulaire, triangulaire, concave parabolique et convexe parabolique.

Les résultats de l'étude ont montré que l'écart entre l'efficacité de l'ailette déterminée en utilisant un coefficient d'échange thermique constant et celle basée sur un coefficient d'échange variable augmente avec le rapport des rayons de l'ailette et une variable adimensionnelle m (qui dépend de la variation locale du coefficient de transfert thermique)., Dans une étude ultérieure, **Jang et al.** [14] ont mené des investigations numériques et expérimentales sur le comportement du fluide et le transfert thermique dans des ailettes elliptiques intégrées à un faisceau de tubes elliptiques comprenant quatre rangées. Les résultats obtenus pour les deux configurations de tubes ont révélé que le coefficient de transfert thermique moyen des tubes à ailette elliptique était de 35 à 50% supérieur à celui des tubes circulaires, tandis que la perte de pression pour les tubes elliptiques était inférieure de 25 à 30% par rapport à la configuration circulaire. En conclusion, les auteurs ont observé que le rapport entre le coefficient de transfert thermique et la perte de pression était 1,5 fois plus élevé pour la géométrie elliptique que pour la forme circulaire

Pour optimiser les performances thermiques et dynamiques des ailettes annulaires, des recherches ont été menées sur l'utilisation de géométries dentelées. Une étude théorique sur l'efficacité des ailettes dentelées a été réalisée par **Kenichi et al.** [15] en utilisant un modèle analytique simplifié qui suppose un coefficient d'échange thermique uniforme sur la surface des ailettes et une isolation thermique à l'extrémité de la section segmentée. **Ma et al.** [16] ont effectué une étude expérimentale afin de déterminer les caractéristiques de transfert thermique et de perte de charge des faisceaux de tubes à ailettes dentelées disposés en quinconce. Leurs résultats ont montré que l'espacement transversal entre les tubes avait un effet négligeable sur le transfert thermique. En revanche, la variation de l'espacement longitudinal entre les tubes avait un impact significatif sur le transfert thermique et la chute de pression.. Dans une autre étude portant sur le rôle des ailettes dans le transfert thermique, **Shua Guo et al.** [17] ont utilisé un modèle numérique d'optimisation des échangeurs de chaleur à tubes à ailettes en convection naturelle. Ils ont constaté que les performances de ces échangeurs de chaleur n'étaient pas optimales. Pour cette étude, deux configurations de bobines ont été testées : une avec une rangée d'ailettes et l'autre avec deux rangées, pour un système PDC avec un nombre d'ailettes de 8 à 10 par pouce (FPI). Les résultats ont montré que la bobine avec une seule rangée d'ailettes fonctionnait mieux que celle avec deux rangées, malgré une surface de transfert thermique plus petite.

Dans une étude menée par **Reza et al.** [8], une analyse approfondie a été réalisée sur un échangeur de chaleur horizontal installé sur une grande surface de terrain avec de longs tuyaux. Dans cette étude, des ailettes cylindriques ont été ajoutées afin d'améliorer le transfert de chaleur. Différents paramètres tels que la longueur, le diamètre, la position et le matériau des ailettes ont été pris en compte. Les chercheurs ont mesuré les variations du taux de transfert de chaleur avec et sans ailettes en mode de refroidissement, en utilisant un modèle 1D-3D basé sur le logiciel COMSOL.

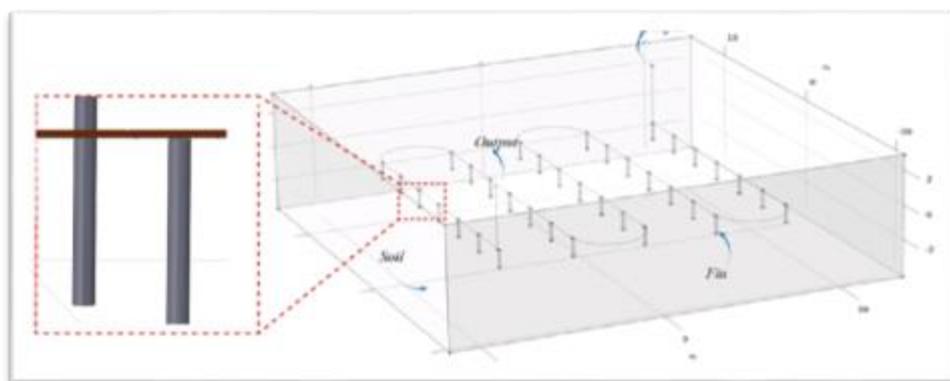


Figure I.37: Conception schématique de HGHE avec ailettes

Dans leur étude, **Jiuxin Ning et al** [18] ont entrepris une investigation expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur compact à plaques et ailettes fabriqué à l'aide de la technologie de fusion sur lit de poudre laser (LPBF).

Trois configurations d'échangeurs de chaleur compacts ont été réalisées, comprenant un PFHX (Plated Fin Heat Exchanger) à ailettes torsadées, un PFHX à ailettes rectangulaires améliorées et un PFHX à ailettes rectangulaires conventionnelles. Les performances thermiques ainsi que les pertes de charge de ces échangeurs de chaleur ont été évaluées.

Les résultats obtenus ont démontré que le PFHX à ailettes torsadées présentait les meilleures performances thermiques parmi les trois configurations d'échangeurs. Par ailleurs, le PFHX à ailettes rectangulaires améliorées a affiché le coefficient de performance expérimental (COP) le plus élevé, offrant ainsi des performances globales remarquables. De plus, l'étude a abordé l'impact de la précision de la technologie LPBF sur les performances de l'échangeur de chaleur, fournissant des recommandations pour les futures conceptions.

Depuis 1995, de nombreux chercheurs ont mené une série d'expérimentations numériques et expérimentales visant à étudier les phénomènes de convection, en tenant compte des différentes géométries des systèmes et des propriétés physico-chimiques des fluides impliqués. Les premiers travaux sur le transfert de chaleur avec l'utilisation de nanofluides ont été réalisés par **Bahram Jalili et al** [19]. Ils ont utilisé des nanofluides, tels que l'eau-oxyde d'aluminium et l'eau-titane dioxyde, à différentes concentrations (0,4 %, 2 %, 4 %, 6 %) en tant que fluides froids, tandis que l'eau était utilisée comme fluide chaud.

Ces expériences ont été réalisées dans un échangeur de chaleur à double tube à contre-courant, en utilisant une configuration innovante d'ailettes rectangulaires dans un écoulement turbulent. L'objectif était d'augmenter le coefficient de transfert de chaleur. Les chercheurs ont constaté que le nanofluide d'oxyde d'aluminium et d'eau présentait un coefficient de transfert de chaleur plus élevé que celui de l'eau pure. De plus, ils ont confirmé que les échangeurs de chaleur équipés d'ailettes rectangulaires et incurvées obtenaient une meilleure performance que les échangeurs de chaleur sans ailettes.

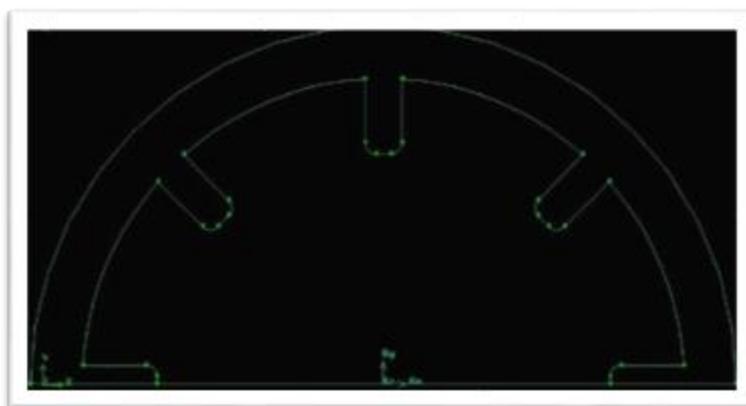


Figure I.38: Géométrie DPHE avec une ailette rectangulaire incurvée

Aliakbar et al [19] ont réalisé une étude sur les échangeurs de chaleur en utilisant différents agencements non linéaires d'ailettes, ainsi que deux types de nanofluides (Ag, Fe₃O₄) sous forme simple et hybride. L'objectif de leur recherche était d'exploiter énergétiquement les déchets d'un moteur diesel en utilisant le facteur de forme des nanoparticules.

Les chercheurs ont constaté que la disposition et le nombre d'ailettes avaient une influence plus significative sur l'augmentation du taux de transfert de chaleur que le facteur de forme des nanoparticules. Ils ont conclu que les paramètres tels que le nombre, la forme et la

disposition des ailettes, le type de nanofluide et le facteur de forme des nanoparticules étaient des facteurs efficaces pour réduire la température des gaz d'échappement d'un moteur diesel.

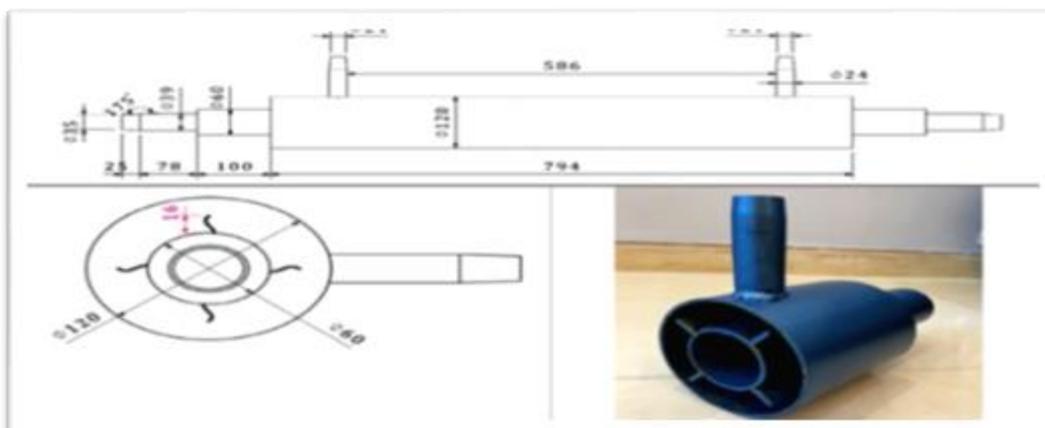


Figure I.39: Spécifications géométriques (à gauche) et une coupe transversale de l'échangeur de chaleur simple (à droite).

Yanru Wang et al [20] ont réalisé une étude numérique sur les performances thermo-hydrauliques des conduits annulaires à ailettes utilisant un nanofluide de nano-plaquettes de graphène/d'eau distillée (CGNP/DW) traité avec du clou de girofle à une concentration de 0,1 % en poids. Ils ont examiné différentes configurations de conduits avec un nombre variable de trous (0 à 16) et des ailettes courbes perforées.

À l'aide du logiciel ANSYS FLUENT, ils ont étudié les caractéristiques de l'écoulement pour des nombres de Reynolds allant de 611 à 10 389. Leurs résultats ont montré que la configuration avec huit trous présentait la valeur la plus élevée pour le critère d'évaluation de performance (PEC). Par conséquent, le conduit à ailettes courbes avec huit trous a été identifié comme le meilleur en termes de transfert de chaleur, avec un coefficient de transfert de chaleur inférieur à 2000 W/m²K.

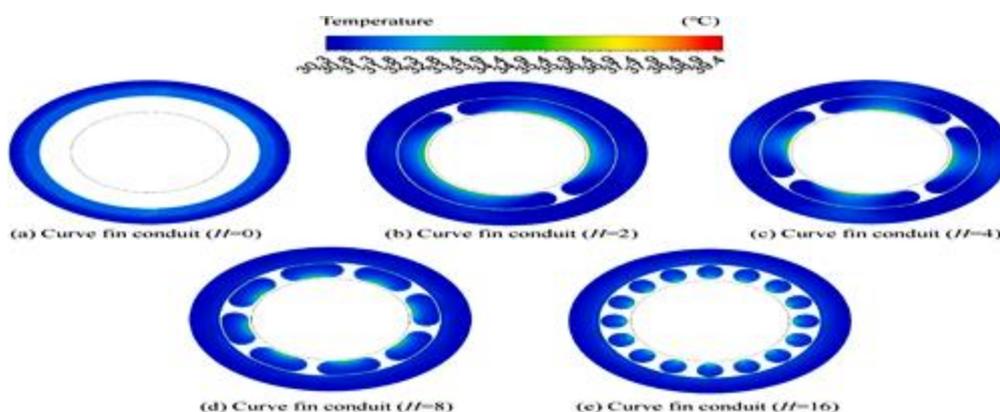


Figure I.40: Conduits annulaires à ailettes avec différents nombres de trous (0-16)

D'autres chercheurs se sont intéressés à l'application de différents nanofluides dans les échangeurs de chaleur. Par exemple, Bahiraei et ses collègues ont réalisé une analyse irréversible d'un écoulement de nanofluide hybride non newtonien contenant des nanoparticules CNT/Fe₃O₄ enrobées dans un échangeur de chaleur à mini-canaux. Dans cette étude, ils ont calculé les taux de génération d'entropie [21].

Zenbiner et Yurddas ont mené une analyse numérique du transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à contre-courant utilisant un nanofluide. Ils ont étudié l'eau et des nanofluides à base d'eau dans un échangeur de chaleur à double tuyau avec un tube ondulé à l'intérieur en utilisant la dynamique des fluides computationnelle [22]. Leurs résultats ont montré que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, tandis que l'augmentation du nombre de Reynolds du flux de travail diminue le transfert de chaleur.

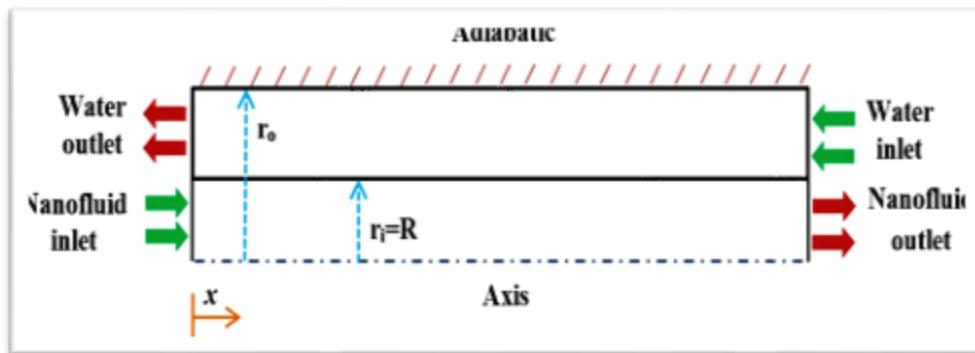


Figure I.41: Échangeur de chaleur à mini-canaux à l'étude.

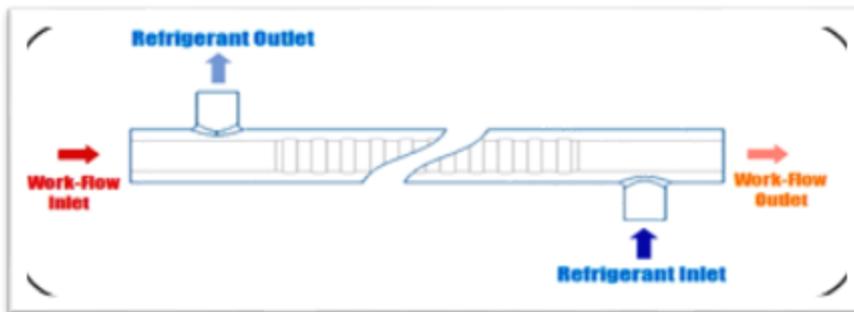


Figure I.42: Échangeur de chaleur à contre-courant à double tube.

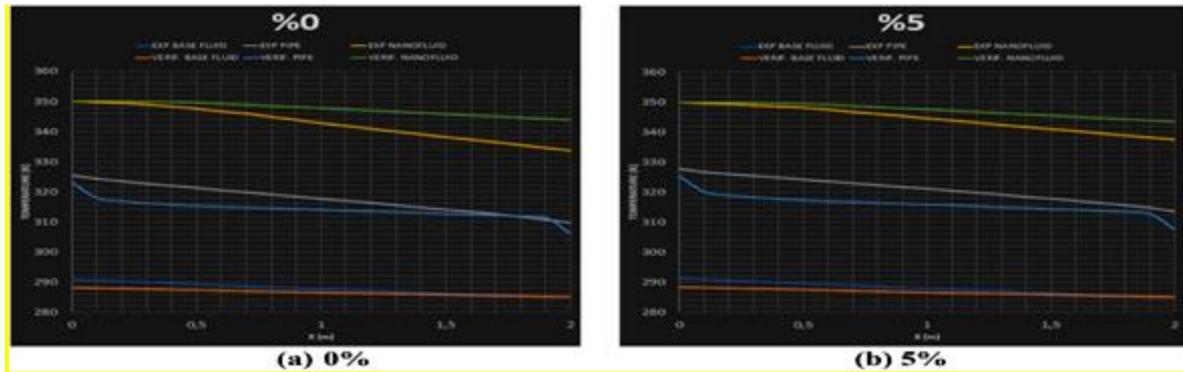


Figure I.43: Comparaison des résultats d'analyse expérimentale et de validation (a) %0 (b)%5.

Kumar et Vinod ont étudié le transfert de chaleur en utilisant trois types de nanofluides non newtoniens différents contenant des nanoparticules de Fe_2O_3 , Al_2O_3 et CuO dans une solution aqueuse de carboxyméthylcellulose (CMC) en tant que fluide de base. L'analyse thermique a été réalisée pour évaluer le coefficient global de transfert de chaleur et le nombre de Nusselt [23]. Les résultats obtenus indiquent que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de la concentration en nanofluides, la température du fluide du côté de l'enveloppe, le nombre de Dean (débit du fluide côté serpentin) et la vitesse de l'agitateur. Les performances de transfert de chaleur des nanofluides non newtoniens s'améliorent considérablement à des concentrations plus élevées de nanofluides.

Aghabozorg [24] et al. ont réalisé une étude expérimentale sur l'amélioration du transfert de chaleur en utilisant des nanofluides magnétiques $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-NTC/eau}$ dans un échangeur de chaleur horizontal à calandre et tube. Leur étude a porté sur différents régimes d'écoulement, notamment laminaire, transitoire et turbulent.

Saini et al [25]. ont réalisé une étude numérique pour évaluer les performances d'un échangeur de chaleur à contre-courant à tubes concentriques en utilisant différents nanofluides ($\text{SiO}_2/\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$, $\text{CNTs}/\text{H}_2\text{O}$) et des turbulateurs à bande torsadée. Ils ont calculé les principaux paramètres tels que le taux de transfert de chaleur (Q), le coefficient de transfert de chaleur global (U) et le nombre de Nusselt (Nu) sur une plage de nombre de Reynolds ($Re = 2000$ à 10000). Leur étude a montré une amélioration significative du coefficient de transfert de chaleur global (U) avec une concentration en volume de 3% pour chaque nanofluide étudié. De plus, les paramètres Q , U et Nu ont augmenté avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

Yanru Wang et al [20] ont mené une étude numérique pour évaluer les performances thermohydrauliques des conduits annulaires à ailettes avec différents nombres de trous (0-16) et configurations utilisant un nanofluide à base de nano plaquettes de graphène/d'eau distillée (CGNP/DW) traité au clou de girofle à une concentration de 0,1 % en poids. Ils ont utilisé le logiciel ANSYS FLUENT pour étudier les caractéristiques de l'écoulement dans une plage de nombres de Reynolds allant de 611 à 10 389. Les résultats ont montré que la configuration avec huit trous présentait la valeur la plus élevée pour les critères d'évaluation de performance (PEC). Par conséquent, le conduit à ailettes courbes avec huit trous s'est avéré être le meilleur en termes de transfert de chaleur, avec un coefficient de transfert de chaleur inférieur à 2000 W/m²K.

Les résultats des études expérimentales et numériques démontrent que l'incorporation de nanofluides dans les échangeurs de chaleur à ailettes offre des améliorations significatives en termes d'efficacité de transfert de chaleur par rapport aux fluides classiques. Cette amélioration se traduit par des avantages tels que l'optimisation de l'efficacité énergétique, la réduction de la taille des échangeurs de chaleur ou l'augmentation de leur capacité de transfert de chaleur. Dans la conception et l'optimisation des échangeurs de chaleur à ailettes utilisant des nanofluides, plusieurs paramètres clés doivent être pris en compte, notamment la concentration des nanoparticules, la configuration des ailettes, la géométrie de l'échangeur de chaleur, les débits des fluides et les conditions de fonctionnement.

I. 9. Conclusion :

L'utilisation de nanofluides dans les échangeurs de chaleur à ailettes présente des avantages significatifs en termes de transfert de chaleur amélioré et de performances accrues. Les ailettes augmentent la surface d'échange thermique, ce qui favorise une meilleure dissipation de la chaleur et une augmentation de l'efficacité globale de l'échangeur de chaleur.

Les nanofluides, qui sont des liquides de base contenant des nanoparticules en suspension, offrent des propriétés thermiques supérieures par rapport aux fluides traditionnels. Grâce à leur conductivité thermique plus élevée et à leur capacité de transfert de chaleur améliorée, les nanofluides permettent d'obtenir des performances accrues de l'échangeur de chaleur.

En combinant les ailettes avec les nanofluides, il est possible d'optimiser le transfert de chaleur dans les échangeurs, ce qui se traduit par une dissipation de chaleur plus efficace et une

meilleure régulation des températures. Cette combinaison présente un potentiel d'amélioration dans de nombreuses applications telles que les systèmes de refroidissement industriels, les systèmes de climatisation, les dispositifs électroniques, les moteurs automobiles, etc.

Cependant, il est important de souligner que des recherches supplémentaires et des études expérimentales sont nécessaires pour mieux comprendre les avantages, les limites et les considérations pratiques liées à l'utilisation d'échangeurs de chaleur à ailettes avec nanofluides. Ces études permettront de maximiser les avantages offerts par cette combinaison dans différentes applications industrielles et commerciales.

Chapitre II : Généralités sur les Nano fluides

II. 1. Introduction

La croissance actuelle des nanosciences est attribuable à l'attention portée aux caractéristiques particulières de la matière à l'échelle nanométrique. Cela a engendré l'émergence de nouveaux domaines de recherche dans de nombreux laboratoires, conduisant au développement de fluides novateurs connus sous le nom de nanofluides. [23]



Figure II.1: Photographie au microscope d'un nanofluide

Les nanofluides désignent des solutions colloïdales où des particules de taille nanométrique sont dispersées dans un fluide porteur. Ces solutions ont attiré beaucoup d'attention grâce à la découverte de leurs remarquables propriétés thermiques. En effet, les fluides classiques couramment utilisés pour le refroidissement ou le chauffage présentent une conductivité thermique très faible (comme illustré dans le Tableau II.1), ce qui limite leur capacité de transfert de chaleur. [26]

Les liquides de référence généralement employés pour la formulation des nanofluides correspondent aux liquides classiquement utilisés dans les applications de transfert de chaleur, tels que l'eau, l'éthylène glycol, l'huile moteur, et ainsi de suite. Les nanoparticules utilisées peuvent être composées de métaux, d'oxydes, de carbures, de nitrures ou de carbone. [26]

Table 1: Conductivité thermique de divers fluides de base et matériaux

Elément	Conductivité thermique (W/m.K)
Eau	0,599
50% eau + 50% éthylène glycol	0,41
Ethylène glycol	0,25
huile de moteur	0,14
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

La sélection du fluide de base revêt une importance primordiale pour les nanofluides, car il garantit la stabilité de la suspension dans le temps et prévient toute forme d'agrégation. Le choix du fluide dépend de la nature des nanoparticules, et parmi les solvants les plus fréquemment employés, on retrouve :

- L'eau,
- L'éthylène et le propylène glycol,
- Les huiles et autres lubrifiants, Le toluène: il se trouve généralement dans l'air, il est essentiel de rendre le composé explosif inflammable connu sous le nom de TNT ou trinitrotoluène.) [28]

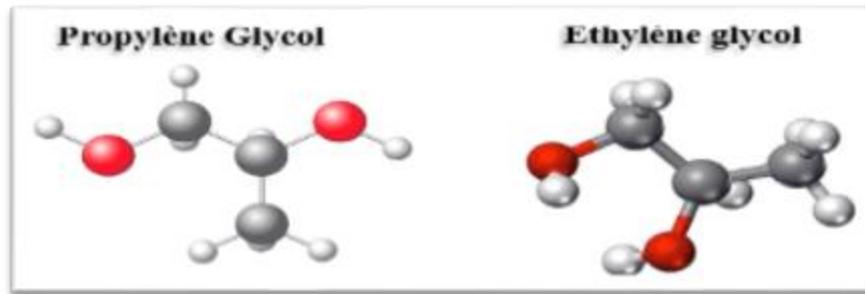


Figure II.2: Formulation chimique de L'éthylène et de propylène glycol [27]



Figure II.3: Toluène (C_7H_8) a sept atomes de carbone (C)

Les bio-fluides Certainement, Voici quelques exemples de bio-fluides couramment utilisés dans divers domaines :

- Les huiles végétales, telles que l'huile de soja, l'huile de tournesol et l'huile de colza, peuvent être utilisées comme fluides biologiques dans diverses applications telles que l'hydraulique, la lubrification et les fluides de transmission.
- La glycérine, qui est un sous-produit de la production de biodiesel, est fréquemment utilisée comme fluide hydraulique biodégradable.
- Les liquides caloporteurs à base de plantes sont utilisés dans les systèmes de chauffage et de refroidissement, et peuvent être formulés à partir d'extraits de plantes.
- Les fluides de coupe biologiques sont utilisés dans des opérations d'usinage telles que le perçage, le fraisage et le tournage.
- Les fluides frigorigènes naturels, tels que l'ammoniac (NH_3) ou le dioxyde de carbone (CO_2), sont utilisés dans les systèmes de réfrigération et de climatisation.

II. 2. Type des nanoparticules

La recherche sur les nouveaux nanomatériaux, tels que les nanoparticules, est un domaine en constante évolution. Dans ce contexte, nous aborderons brièvement les types de nanoparticules les plus fréquemment utilisées dans les applications liées au transfert de chaleur. De manière générale, on peut regrouper les différents types de nanomatériaux en quatre catégories. [23]

- Les nanoparticules métalliques comme l'aluminium Al, le cuivre Cu, le fer Fe et l'argent Ag.
- Les nanoparticules des oxydes céramiques comme le dioxyde de l'aluminium Al_2O_3 , l'oxyde de cuivre CuO , le dioxyde de Titanium TiO_2 , l'oxyde de zinc ZnO et le dioxyde de silicium SiO_2 .
- Les nanoparticules de carbures métalliques comme par exemple le carbure de silicium métallique SiC .
- Les nanoparticules non-métalliques comme le graphite et le nanotube de carbone CNT.

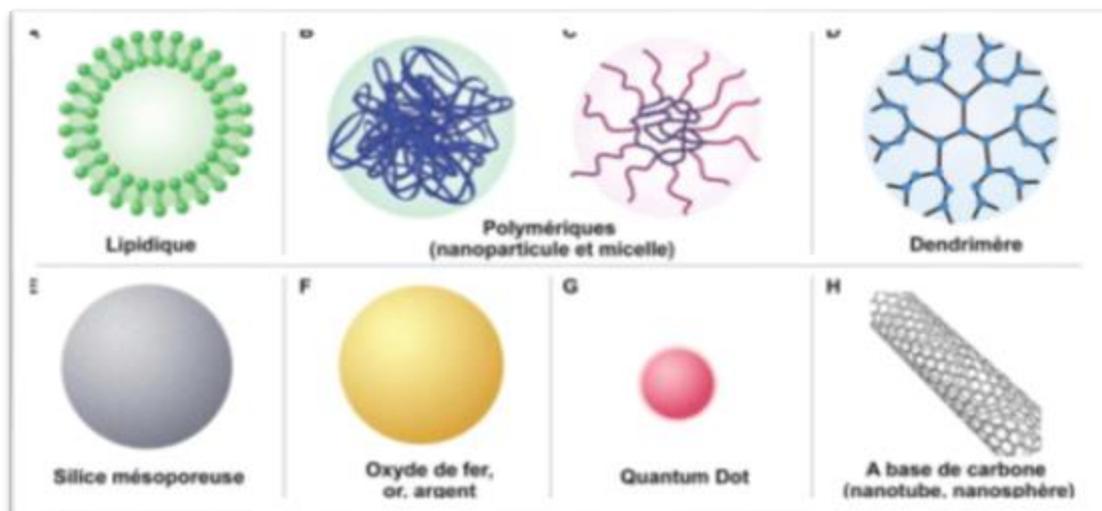


Figure II.4: Exemple de différentes nanoparticules étudiées en thérapeutique [26].

Les nanoparticules les plus connues sont de forme :

- Sphérique,
- Cylindrique,
- Agglomérat.

Le domaine des fractions volumiques étudié en général est :

- 0.1 – 1%
- 1 – 10%
- > 10%

II. 3. Propriétés thermo physiques des nano fluides

L'ajout de nanoparticules a un impact significatif sur les propriétés thermo physiques des solutions, telles que la densité, la chaleur spécifique, la dilatation thermique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique. Ces modifications sont influencées par divers facteurs, tels que le type de matériau, la taille et la forme des nanoparticules, la concentration volumique des particules en suspension et la conductivité du fluide de base.

De nombreux chercheurs s'attachent à comprendre les mécanismes sous-jacents de ces modifications. Toutefois, jusqu'à présent, aucune approche phénoménologique concise et satisfaisante n'a été formulée. Dans le cadre de cette étude, nous approximerons les propriétés thermo physiques effectives du nanofluide en utilisant différentes relations tirées de la littérature ou que nous établirons dans nos travaux ultérieurs. [26]

II. 3. 1. Masse volumique

Afin de calculer la densité, nous supposerons un nanofluide parfaitement homogène, avec une bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide. Nous utiliserons la fraction volumique pour décrire le rapport entre le volume des nanoparticules et le volume total du mélange à une température donnée. En se référant à la définition de la masse volumique de ce mélange, nous pourrions déterminer la densité (fluide + solide) [26].

$$\frac{\text{volume solide}}{\text{volume totale de nano fluides}} = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (2.1)$$

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (2.2)$$

ρ_{nf} : La masse volumique du nano fluide,

ρ_f : La masse volumique du fluide de base

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solides

Nous présentons dans le tableau 2.1 les valeurs des rapports de la masse volumique des nano fluides sur la masse volumique du fluide de base pour les cinq nano fluides (eau+Al₂O₃), (eau+CuO), (eau+Cu), (eau+Ag) et (eau+Au) en fonction de la fraction volumique (ϕ) qui varie entre 0% et 8%.

Table 2: Rapport des masses volumiques des différentes nanofluides en fonction de la

	$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}$				
%	Eau+Al ₂ O ₃	Eau+CuO	Eau+Cu	Eau+Ag	Eau+Au
0%	1	1	1	1	1
1%	1.0296	1.0546	1.0797	1.0951	1.1833
2%	1.0593	1.1092	1.1594	1.1903	1.3666
3%	1.0890	1.1638	1.2391	1.2855	1.5500
4%	1.1186	1.2184	1.3188	1.3807	1.7333
5%	1.1483	1.2730	1.3985	1.4759	1.9167
6%	1.1780	1.3276	1.4782	1.5711	2.1000
7%	1.2077	1.3823	1.5579	1.6663	2.2834
8%	1.2373	1.4369	1.6376	1.7615	2.4667

II. 3. 2. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est une grandeur qui évalue la capacité d'une substance ou d'un système homogène à absorber de la chaleur par unité de masse. Son calcul peut être réalisé à l'aide de l'expression suivante : $CP * dQ / mdT$, où CP représente la chaleur spécifique, dQ est la quantité de chaleur transférée, m est la masse de la substance et dT est le changement de température.

La chaleur spécifique représente la quantité de chaleur requise pour augmenter la température d'une unité de substance de 1 K lors d'une transition spécifique. Lors de l'analyse des nanofluides, différents auteurs ont utilisé deux relations distinctes pour déterminer leur chaleur spécifique.

$$Cp_{nf} = (1 - \varphi)Cp_f + \varphi(Cp_s) \quad (2.3)$$

Certains autres dont Xuan et Roetzel [33] ont utilisé :

$$(Cp_{nf}) = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (2.4)$$

II. 3. 3. Coefficient d'expansion thermique

Dans notre étude, nous nous concentrons sur un seul fluide porteur incompressible, ce qui signifie que sa densité est indépendante de la pression. Cependant, ce fluide est expansible, ce qui implique que sa densité varie en fonction de la température. Cette variation est quantifiée par le coefficient de dilatation thermique, également appelé coefficient de dilatation. La valeur de ce coefficient peut être calculée pour les nanofluides en utilisant une relation décrite par de nombreux auteurs. [26]

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (2.5)$$

On déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad (2.6)$$

Où β_f et β_s Les termes et désignent respectivement les coefficients de dilatation du fluide porteur et des nanoparticules.

II. 3. 4. viscosité dynamique

La plupart des études consacrées à la viscosité des nanofluides ont utilisé des calculs basés sur la viscosité du fluide de base et la fraction volumique des nanoparticules. Ces calculs

font référence aux relations de Stokes-Einstein ou de Brinkman. Il est toutefois important de noter que les nanoparticules utilisées dans ces expériences ne sont pas toutes de forme sphérique et de taille uniforme, notamment dans le cas des nanofluides contenant des nanotubes de carbone.

Pour les suspensions composées de nanoparticules sphériques, il existe plusieurs modèles et formules semi-empiriques permettant de décrire la variation de la viscosité relative en fonction de la fraction volumique. La viscosité relative est définie comme le rapport entre la viscosité du nanofluide et celle du fluide de base, soit $(\mu_{nf})/(\mu_f)$ [26].

Einstein [24] Le premier à étudier la viscosité dynamique d'un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides à faible concentration volumique (inférieure à 2%) a été. La relation associée à cette étude est présentée de la manière suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) \quad (2.7)$$

Batchelor [26] Dans une étude théorique, il a examiné la viscosité dynamique d'un nanofluide en prenant en compte l'effet de l'interaction hydrodynamique entre deux nanoparticules sphériques. Ses résultats ont démontré que la viscosité dynamique d'un nanofluide ne suit pas une relation linéaire avec la fraction volumique, contrairement aux relations d'"Einstein" et "Brinkman".

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2) \quad (2.8)$$

Brinkman [30] a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques. Sa relation conduit à la relation d'Einstein pour les faibles fractions volumiques.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (2.9)$$

Maïga et al. [31] dans leurs travaux expérimentaux, ont présenté les mesures de viscosité dynamique des nanoparticules d'alumine dispersées dans l'eau et l'éthylène glycol.

$$\mu_{nf} = (123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad \gamma Al_2O_3 - \text{eau} \quad (2.10)$$

$$\mu_{nf} = (306\varphi^2 - 0.19\varphi + 1) \quad \gamma Al_2O_3 \quad \text{éthylène glycool} \quad (2.11)$$

Song et al. [32] ont proposé une relation pour la viscosité dynamique du nanofluide (SWO₂- eau), sous forme d'une fonction linéaire de la fraction volumique.

$$\mu_{nf} = (1 + 56.5\varphi) \quad (2.12)$$

Koo et Kleinstreuer [32] dans leurs travaux, ils ont réalisé une étude expérimentale et théorique sur la viscosité dynamique d'un nanofluide composé d'oxyde de cuivre de 28,8 nm de diamètre dispersé dans l'eau. Leur analyse tient compte de l'effet de l'agitation brownienne et de l'épaisseur de la couche nanométrique.

$$\mu_{nf} = \mu_{statique} + \mu_{brownien} \quad (2.13)$$

$$\mu_{statique} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}$$

$$\mu_{brownien} = 5 \times 10^4 \beta \rho_f \varphi \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} [-134.63 + 1722.3\varphi] + (0.4705 - 6.04\varphi) \frac{T}{T_0}$$

Kulkarni et al. [33] dans leurs recherches, les auteurs ont examiné l'impact de la température sur la viscosité d'un nanofluide contenant des nanoparticules d'oxyde de cuivre dispersées dans l'eau. Ils ont formulé une relation valide dans une plage de température allant de 5 à 50 °C.

$$\mu_{nf} = [-(2.8751 + 53.548\varphi - 107.12\varphi^2) + (1078.3 + 15857\varphi + 20587\varphi^2)] \frac{1}{T} \quad (2.14)$$

Nguyen et al. [34] dans leur étude, les chercheurs ont analysé l'impact de la taille des nanoparticules sur la viscosité dynamique d'un nanofluide contenant de l'alumine dispersée dans l'eau, en faisant varier leurs diamètres (d_{np}). Les relations proposées tiennent compte de l'effet de la taille des nanoparticules sur la viscosité effective.

Pour $d_{np} = 47nm$

$$\mu_{nf} = \mu_f 0.904 e^{(0.1483\varphi)} \quad (2.15)$$

Pour $d_{np} = 36nm$

$$\mu_{nf} = (1 + 0.025\varphi + 0.015\varphi^2) \quad (2.16)$$

Et pour le nanofluide CuO-eau pour $d_{np} = 29nm$

$$\mu_{nf} = (1.475 - 0.319\varphi + 0.051\varphi^2 + 0.009\varphi^3) \quad (2.17)$$

II. 3. 5. Conductivité thermique des nanofluides

De nombreux travaux de recherche se sont penchés sur la quantification de l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides. L'objectif de ces études était de mesurer la conductivité thermique et de sélectionner les nanoparticules et le fluide porteur les plus appropriés afin d'obtenir le rapport le plus élevé possible entre la conductivité thermique du nanofluide et celle du fluide porteur.

Différentes techniques de mesure de la conductivité thermique des nanofluides ont été utilisées, la plus employée étant celle du fil chaud en régime transitoire [23].

II. 3. 5. 1. Exploration des modèles de conductivité thermique

En résolvant l'équation énergétique, plusieurs modèles ont été développés pour estimer la conductivité thermique des nanofluides. Parmi ces modèles, les suivants ont été retenus :

Li et Peterson : les chercheurs ont examiné l'effet de la variation de température et de la fraction volumique des nanoparticules en suspension sur la conductivité thermique de deux nanofluides, à savoir l'alumine (Al_2O_3) dans l'eau et le cuivre (CuO) dans l'eau. Les nanoparticules d'alumine ont un diamètre de 29 nm, tandis que les nanoparticules de cuivre ont un diamètre de 36 nm. Les fractions volumiques des nanoparticules étudiées étaient de 2%, 4%, 6% et 10%. Les chercheurs ont ensuite proposé deux formules distinctes pour chaque nanofluide afin de décrire les variations observées.

Al_2O_3 / eau :

$$\lambda_{nf} = f[0.674\varphi + 0.0187(T - 273.15) - 0.462] + \lambda_f \quad (2.18)$$

• CuO / eau :

$$\lambda_{nf} = f[3.761\varphi + 0.0179(T - 273.15) - 0.307] + \lambda_f \quad (2.19)$$

Timofeeva et al. [40] ont réalisé une étude expérimentale et théorique sur la conductivité thermique de l'alumine (Al_2O_3) dans l'eau et l'alumine dans l'éthylène glycol. Ils ont développé une corrélation qui dépend uniquement de la conductivité thermique du fluide de base et de la concentration volumique des particules d'alumine en suspension. Cette corrélation permet de prédire la conductivité thermique du nanofluide en fonction de ces deux paramètres.

$$\lambda_{nf} = f(1 + 3\varphi) \quad (2.20)$$

Duangthongsu et Wongwises [41] ont analysé dans un travail expérimental, l'effet de la température sur la conductivité thermique des nanoparticules de dioxyde de titane de forme sphérique, ayant un diamètre de $d_p = 21$ nm, dispersées dans l'eau. Ils ont proposé une relation simple reliant la conductivité thermique à la fraction volumique, avec des coefficients variables dépendant de la température. Les valeurs spécifiques de ces coefficients en fonction de la température :

$$\lambda_{nf} = \lambda_f(\alpha + b\varphi) \quad (2.21)$$

Modèle de Maxwell [35] : Ce modèle considère les nanoparticules comme des inclusions dispersées dans le fluide de base. La conductivité thermique effective du nanofluide est calculée en utilisant une formule basée sur la loi de mélange de Maxwell. La formule de Maxwell est donnée par :

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s + 2\lambda_f + 2(\lambda_s - \lambda_f)\varphi}{\lambda_s + 2\lambda_f - 2(\lambda_s - \lambda_f)\varphi} \quad (2.22)$$

λ_{nf} , λ_s , λ_f désignent respectivement les conductivités thermique ds nanofluides, des fluide de base ,et des particule solide .

Modèle de Hamilton-Crosser [36]: Le modèle de Hamilton-Crosser est largement utilisé pour prédire la conductivité thermique des nanofluides. Ce modèle repose sur l'hypothèse que la conductivité thermique d'un nanofluide est influencée à la fois par la conductivité du liquide de base et par le facteur de chargement des nanoparticules. L'équation correspondant au modèle de Hamilton-Crosser est la suivante :

$$\lambda_{nf} = \lambda_f * (1 + 2.5 * \varphi + 1.17 * \varphi^2) \quad (2.23)$$

Où λ_{nf} est la conductivité thermique effective du nanofluide, λ_f est la conductivité thermique du liquide de base, et phi est le facteur de chargement des nanoparticules.

Modèle de Yu et Choi [37] : Les chercheurs ont proposé un modèle dans lequel les nanofluides sont considérés comme des particules principalement liquides et solides, séparées par une nanocouche qui joue le rôle de pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. Ils ont également fait l'hypothèse que la conductivité thermique de la nanocouche est supérieure à celle du liquide.

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s + 2\lambda_f + 2(\lambda_s - \lambda_f)(1 + \beta)3\varphi}{\lambda_s + 2\lambda_f - 2(\lambda_s - \lambda_f)(1 + \beta)3\varphi} \quad (2.24)$$

Où β est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

Modèle de Bruggeman : Le modèle développé par Bruggeman [38] s'est avéré être une meilleure approximation de certains résultats expérimentaux par rapport aux autres modèles, en particulier pour les nanoparticules sphériques, sans limitation quant aux concentrations des nanoparticules.

Récemment, Keblinski et al. ont examiné plusieurs mécanismes qui pourraient contribuer à l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides. Parmi ces mécanismes, le mouvement Brownien a été discuté. Il a été constaté que le mouvement Brownien des

nanoparticules est généralement trop lent pour transporter une quantité de chaleur significative à travers un nanofluide. Cependant, ce mouvement peut jouer un rôle indirect en générant une convection autour des nanoparticules, ce qui contribue à améliorer le transfert de chaleur.

$$\lambda_{nf} = \frac{1}{4} [(3\varphi - 1)\lambda_{np} + (2 - 3\varphi)\lambda_f] \frac{\lambda_f^2}{4} \sqrt{\Delta} \quad (2.25)$$

Ou

$$\Delta = (3\varphi - 1)^2 \left(\frac{\lambda_{np}}{\lambda_f}\right)^2 + (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi - 9\varphi^2) \frac{\lambda_{np}}{\lambda_f}$$

Modèle de Chung : Ce modèle est basé sur la théorie de percolation et considère les nanoparticules comme un réseau tridimensionnel. Il utilise des paramètres de percolation pour décrire l'effet des nanoparticules sur la conductivité thermique du nano fluide.

Il convient de noter que chaque modèle a ses propres hypothèses et limites d'applicabilité. Le choix du modèle approprié dépend des caractéristiques spécifiques du nanofluide étudié et des objectifs de la recherche.

$$\lambda_{nf} = \lambda_f(1 + \beta * \varphi) + \lambda_{np} * \varphi \quad (2.26)$$

Modèle de Lu et Lin : Ils proposé une nouvelle formule pour n'importe quelle forme de nanoparticules en introduisant des coefficients a et b dépendant de la nature desnanoparticules dispersées [39].

$$\lambda_{nf} = [1 + a\varphi + b\varphi^2] \quad (2.27)$$

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

Modèle de Bhattacharya [46] Ce modèle propose une approche novatrice pour estimer la conductivité thermique effective d'un nanofluide en utilisant la simulation de la dynamique brownienne.

$$\lambda_{nf} = \lambda_{np}\varphi + (1 - \varphi) \quad (2.28)$$

Où λ_{np} est la conductivité due aux positions et aux mouvements browniens des particules à l'intérieur du fluide.

Modèle de Xue [47] : Cette étude se concentre sur la conductivité thermique d'un nanofluide contenant des nanotubes de carbone, en examinant spécifiquement l'influence du diamètre des nanoparticules. Les résultats indiquent que la taille des nanoparticules a peu d'impact sur l'augmentation de la conductivité thermique. En conséquence, une formule classique a été établie, dépendant uniquement de trois variables fondamentales : les conductivités thermiques des nanoparticules, du fluide de base et la fraction volumique.

$$\lambda_{nf} = \frac{1-\varphi + 2\varphi \frac{\lambda_p}{\lambda_{np}-\lambda_f} \ln \frac{\lambda_{np}+\lambda_f}{2\lambda_f}}{1-\varphi + 2\varphi \frac{\lambda_f}{\lambda_{np}-\lambda_f} \ln \frac{\lambda_{np}+\lambda_f}{2\lambda_f}} \lambda_f \quad (2.29)$$

Modèle de Timofeeva [48] : Dans leur étude, les chercheurs ont examiné de manière expérimentale et théorique la conductivité thermique de l'alumine (Al₂O₃) dans l'eau et dans l'éthylène glycol. Ils ont découvert une corrélation reliant cette conductivité thermique uniquement à la conductivité thermique du fluide de base et à la concentration volumique de l'alumine en suspension.

$$\lambda_{nf} = (1 + 3\varphi) \quad (2.30)$$

II. 3. 6. Fraction volumique

La relation de la fraction volumique, également connue sous le nom de rapport de volume, est une mesure utilisée pour comparer les volumes des différents composants d'un mélange ou d'un matériau composite. Elle est souvent exprimée sous forme de pourcentage ou de fraction décimale.

La relation de la fraction volumique est définie comme le rapport du volume d'un composant particulier au volume total du mélange. Elle peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Fraction volumique} = \frac{\text{Volume du composant}}{\text{volume totale du mélange}} \quad (2.31)$$

II. 3. 7. masse volumique et capacité thermique

On suppose que la masse volumique et la capacité thermique des nanofluides varient linéairement en fonction de la fraction volumique à une température spécifique.

La masse volumique est calculée par la relation classique de Xuan et Roetzel [33] :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) + \varphi\rho_p \quad (2.32)$$

En outre, la chaleur spécifique est définie par deux relations : Celle de Roetzel et Xuan [33] relative à la chaleur massique :

$$\rho c_p n_f = (1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p p) \quad (2.33)$$

Celle de Pak et Cho [34] relative à la chaleur spécifique :

$$Cp_{nf} = (1 - \varphi)c_{p_f} + \varphi c_p \quad (2.34)$$

II. 3. 8. Coefficient d'expansion thermique

Le coefficient d'expansion thermique, également connu sous le nom de coefficient de dilatation, quantifie la variation de la masse volumique d'une substance en fonction de la température. Plusieurs chercheurs utilisent une analogie avec la formule (2.1) pour estimer le coefficient d'expansion thermique. Soit :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)_f + \varphi\beta_p \quad (2.35)$$

En revanche, Kim et al. [35] ont proposé une simplification de la relation (1.6) en supposant que le coefficient d'expansion thermique des nanoparticules est largement inférieur à celui du fluide de base, soit :

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)_f \quad (2.36)$$

Pour la masse volumique, on peut utiliser une variation linéaire en fonction de la température si le domaine opératoire est relativement élevé :

$$\rho n_f = \rho_0(1 - \beta n_f(T - T_0)) \quad (2.37)$$

$$\rho_f = \rho_0(1 - \beta_f(T - T_0)) \quad (2.38)$$

Et par suite :

$$\beta_{nf}\rho_0 = (1 - \varphi)f\rho_f + \varphi\beta_p\rho_0 \quad (2.39)$$

D'après Kim et al. Si on néglige la dilatabilité des nanoparticules devant celle de fluide

De base, on obtient :

$$\beta_{nf}\rho_0 = (1 - \varphi)f\rho_f \quad (2.40)$$

II. 4. Processus de production des nanoparticules

Les techniques de fabrication sont généralement classées en deux catégories principales : les méthodes physiques et les méthodes chimiques.

Ces méthodes sont l'objet de nombreuses recherches visant à améliorer leur efficacité, car leur mise en œuvre peut être complexe, et à obtenir des nanoparticules de la taille désirée. Il existe donc différentes techniques chimiques et physiques disponibles pour la fabrication de nanoparticules. Ces méthodes permettent d'obtenir des nanoparticules soit individuelles, soit enrobées et encapsulées dans une matrice hôte. [26].

II. 4. 1. Méthodes physiques

La méthode la plus basique pour obtenir des nanoparticules est de réduire la taille d'un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Cependant, cette méthode présente des limitations majeures car elle ne permet pas un contrôle précis de la distribution des tailles des particules. Pour obtenir un contrôle amélioré de la taille et de la morphologie des nanoparticules, il est possible d'utiliser des méthodes physiques plus sophistiquées.

Sakuma et al [44] Des nanoparticules ont été fabriquées en utilisant la technique de pulvérisation d'un matériau cible GFS (Gas Flow Sputtering), qui peut être réalisée à l'aide de méthodes telles que la pulvérisation cathodique utilisant un plasma ou l'ablation laser utilisant

un faisceau laser intense.

Un inconvénient notable des méthodes physiques réside dans leur nécessité d'utiliser un équipement coûteux, ce qui limite souvent le rendement en nanoparticules obtenu. De plus, les nanoparticules synthétisées par ces méthodes sont généralement déposées ou liées à un substrat spécifique.

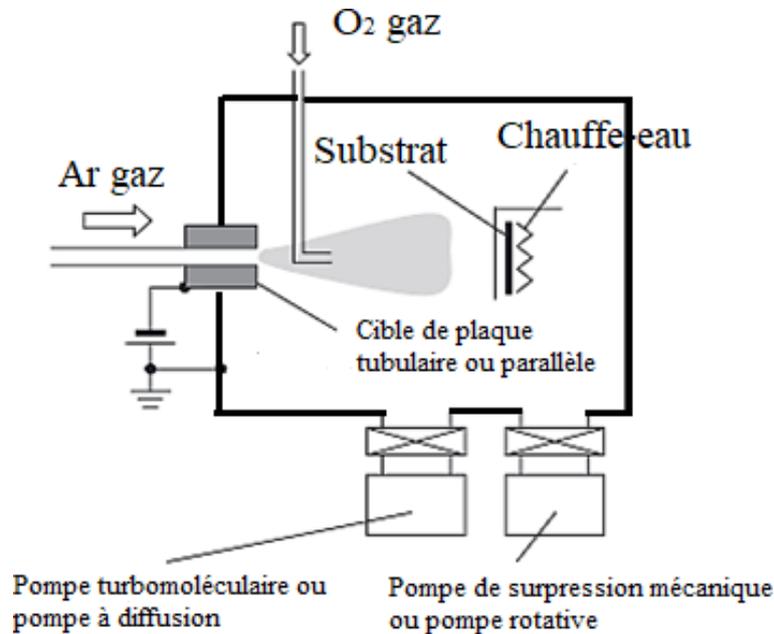


Figure II.5: Schéma du système GFS [44].

II. 4. 2. Méthodes chimiques

À l'heure actuelle, il existe de nombreuses méthodes de synthèse chimique qui offrent des avantages tels que leur simplicité de mise en œuvre, leur aspect quantitatif et leur faible coût. Comparées aux méthodes physiques, ces méthodes chimiques présentent un rendement supérieur, permettant d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relativement étroite et des morphologies variées. De manière similaire aux méthodes physiques, les nanoparticules peuvent être synthétisées sous deux formes : soit sous forme libre, sous la forme d'une poudre facilement dispersible dans un liquide ou un gel hôte, soit sous forme enrobée, intégrées dans une matrice solide ou un polymère. Cette diversité de méthodes de synthèse offre une flexibilité pour obtenir les caractéristiques souhaitées des nanoparticules [45].

$$c_p n_f = (1 - \varphi) f + \varphi c_p \quad (2.27)$$

II. 5. Domaines d'utilisation

Les nanofluides sont des mélanges de nanoparticules dispersées dans des fluides, et même à de faibles concentrations de nanoparticules, ils présentent des améliorations significatives de leurs propriétés. De nombreuses recherches se concentrent sur l'étude du comportement des nanofluides afin de les exploiter dans divers domaines où une amélioration directe du transfert de chaleur est essentielle. Ces domaines comprennent les applications industrielles, les réacteurs nucléaires, le transport, l'électronique, la biomédecine et l'industrie alimentaire. En outre, les nanofluides sont considérés comme des fluides intelligents, offrant la possibilité de contrôler et de modifier le transfert de chaleur en fonction des besoins spécifiques [45].

II. 5. 1. Applications de refroidissement industriel

L'adoption des nanofluides à la place de l'eau de refroidissement et de chauffage présente un potentiel considérable pour l'industrie américaine en termes d'économies d'énergie.

Selon les estimations, cette transition pourrait permettre d'économiser jusqu'à 1000 milliards de British Thermal Units (Btu). Dans le secteur de l'énergie électrique, l'intégration des nanofluides dans les cycles de refroidissement en boucle fermée pourrait entraîner des économies annuelles estimées entre 10 000 et 30 000 milliards de Btu, ce qui équivaut à la consommation énergétique annuelle de 50 000 à 150 000 foyers.

Ces économies d'énergie auraient également un impact positif sur l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, notamment environ 5,6 millions de tonnes métriques de dioxyde de carbone, 8600 tonnes d'oxydes d'azote et 21 000 tonnes métriques d'anhydride sulfureux.

Un exemple concret de l'application des nanofluides se trouve dans les usines de pneumatiques de Michelin en Amérique du Nord. Actuellement, l'efficacité du refroidissement du caoutchouc pendant le processus de traitement limite la productivité des opérations industrielles. Pour pallier cette limitation, plus de 2 millions de gallons de fluides caloporteurs sont utilisés dans les usines de Michelin en Amérique du Nord. Dans le cadre d'un projet spécifique, Michelin vise à augmenter la productivité de ses usines de traitement du caoutchouc de 10 %. Pour y parvenir, ils développent et produisent de manière rentable des nanofluides à base d'eau adaptés à leurs besoins spécifiques [45].

II. 5. 2. Smart Fluides

À l'heure actuelle, la sensibilisation croissante à l'énergie et la nécessité de sources d'énergie propres limitées, combinées à la popularité croissante des appareils alimentés par batterie tels que les téléphones portables et les ordinateurs portables, exigent une gestion efficace des ressources énergétiques grâce à des technologies intelligentes. Dans ce contexte, les nanofluides ont émergé comme une solution prometteuse en tant que fluides intelligents.

Une étude récente publiée dans la revue "Physicien Review Letters" en mars 2009 par Donzelli et al. a mis en évidence une classe spécifique de nanofluides qui agissent comme des matériaux intelligents, agissant comme des valves thermiques pour réguler le flux de chaleur. Ces nanofluides peuvent être configurés pour être dans un état "bas" avec une faible conductivité thermique ou dans un état "élevé" avec une dissipation de chaleur plus efficace. Cette propriété permet d'améliorer les technologies de chauffage et de refroidissement, et les chercheurs doivent maintenant démontrer la stabilité d'un système d'exploitation capable de répondre à une gamme plus large de flux de chaleur pour faire progresser davantage ces domaines.

II. 5. 3. Réacteurs nucléaires

Des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) ont réalisé une étude visant à évaluer l'applicabilité des nanofluides dans le domaine nucléaire, notamment pour améliorer les performances des systèmes de refroidissement par eau utilisés dans les centrales nucléaires à réacteur à eau pressurisée (REP) lorsqu'ils sont limités par la dissipation de chaleur. Ces applications englobent le liquide de refroidissement primaire du REP.

Les systèmes de sécurité en veille, les cibles d'accélérateur, les déviateurs de plasma, et autres.

Dans ces systèmes, le flux de chaleur critique entre les barres de combustible et l'eau est le principal processus limitant la production de vapeur. La formation de bulles de vapeur finit par recouvrir la surface des barres de combustible, ce qui réduit considérablement le transfert de chaleur par rapport à l'eau liquide. Pour remédier à cela, les chercheurs ont proposé l'utilisation de nanofluides, où les barres de combustible sont revêtues de nanoparticules telles que l'alumine. Ces nanoparticules ont la propriété de repousser les bulles nouvellement formées, empêchant ainsi la formation d'une couche de vapeur autour des barres de combustible. En conséquence, le coefficient de transfert de chaleur critique (CHF) est considérablement augmenté, améliorant ainsi l'efficacité du refroidissement.

II. 5. 4. Extraction de l'énergie géothermique et d'autres sources d'énergie

Lors de l'exploitation de l'énergie géothermique provenant de la croûte terrestre, qui se trouve à des profondeurs de 5 à 10 km et à des températures allant de 500°C à 1000°C, les nanofluides peuvent jouer un rôle important dans le refroidissement des tuyaux exposés à de telles températures élevées. Ils peuvent également contribuer au refroidissement des machines et des équipements utilisés lors des opérations de forage dans des environnements à haute température et à forte friction.

Les nanofluides ont la particularité d'être des "fluides supraconducteurs", ce qui signifie qu'ils peuvent être utilisés comme fluides de travail pour exploiter l'énergie provenant du noyau terrestre. Ils pourraient être intégrés dans des systèmes de centrales électriques à réacteur à eau pressurisée (REP) qui nécessitent une quantité considérable d'énergie de travail.

Dans le domaine de la technologie de conversion de puissance, l'amélioration des performances de transfert de chaleur des nanofluides à basse température et le développement de conceptions d'installations adaptées aux températures de ressources plus élevées, notamment dans la région de l'eau supercritique, pourraient entraîner des améliorations significatives, voire un gain d'un ordre de grandeur, en termes d'efficacité de conversion de chaleur en énergie et de performances des réservoirs géothermiques .

II. 6. Comment un nanofluide peut-il améliorer le transfert thermique ?

Pour améliorer les performances, plusieurs approches peuvent être utilisées pour minimiser l'épaisseur de la couche limite et en assurer un contrôle actif.

L'une de ces approches consiste à augmenter la vitesse du fluide à travers des passages étroits ou des jets d'eau, ou à introduire de petits obstacles tels que des picots ou des aspérités pour favoriser le mélange près de la paroi. L'objectif est de rapprocher le fluide froid le plus près possible de la paroi chaude, ce qui favorise les échanges thermiques et réduit l'épaisseur de la couche limite.

L'utilisation de nanofluides offre une solution prometteuse grâce à leur conductivité thermique accrue. Cette caractéristique facilite le transfert d'énergie thermique à travers la sous-couche visqueuse. De plus, la présence de nanoparticules dans la suspension peut modifier les propriétés rhéologiques du fluide, créant une structure spécifique au niveau de la couche limite. Selon la nature et la forme des nanoparticules, les nanofluides peuvent présenter un

comportement rhé fluidifiant, c'est-à-dire une diminution de la viscosité avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement. Cette propriété réduit la viscosité apparente près de la paroi, agissant ainsi comme un lubrifiant.

La diminution de la viscosité entraîne une réduction de l'épaisseur de la couche limite dynamique, ce qui se traduit par une amélioration directe du coefficient d'échange thermique à la paroi. Ces effets combinés permettent d'améliorer considérablement les performances du transfert thermique dans les applications utilisant des nanofluides.

II. 7. Avantages des nanofluides

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides, ce qui permet une amélioration significative de l'efficacité du transfert thermique
- Une dispersion élevée et une stabilité des particules grâce au mouvement brownien prédominant, assurant ainsi une distribution homogène des nanoparticules dans le fluide.
- Une intensification du transfert de chaleur équivalente ou supérieure à celle des liquides purs, malgré des concentrations réduites de nanoparticules.
- Une réduction des risques de colmatage par rapport aux boues conventionnelles, favorisant ainsi la miniaturisation des systèmes.
- Des propriétés ajustables, telles que la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en modifiant les concentrations de nanoparticules en fonction des besoins spécifiques des différentes applications.

Ces avantages font des nanofluides des candidats prometteurs pour améliorer les performances des échangeurs de chaleur et d'autres applications liées au transfert thermique.

II. 8. Inconvénients des nanofluides

- Manque d'accord entre les résultats obtenus par différents chercheurs.
- Manque de compréhension théorique des mécanismes responsables des changements de propriétés.

- Mauvaise caractérisation des suspensions de nanoparticules.
- Instabilité des dispersions de nanoparticules.
- Augmentation de la chute de pression et de la puissance de pompage.
- Augmentation de la viscosité et diminution de la chaleur spécifique.
- Coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.

Ces limitations et défis doivent être pris en compte lors de la recherche et de l'utilisation des nanofluides, afin de développer des solutions et des améliorations pour surmonter ces obstacles.

II. 9. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons d'abord fourni une description générale des nanofluides. L'utilisation des nanofluides en tant que fluide caloporteur constitue un domaine émergent encore en cours de recherche. Les nanofluides présentent un potentiel d'amélioration significatif du transfert thermique, avec des augmentations pouvant atteindre plusieurs dizaines de pour-cent. Cette amélioration du transfert thermique est directement liée aux propriétés des nanoparticules utilisées, telles que leur taille et leur concentration volumique.

Il est important de prendre en compte plusieurs paramètres lors de la sélection d'un échangeur de chaleur approprié pour une application donnée en tant qu'énergéticien. Ces paramètres incluent les propriétés thermophysiques des fluides utilisés, leur compatibilité, ainsi que les conditions de température et de pression requises. En considérant ces facteurs, il est possible de choisir efficacement l'échangeur de chaleur le mieux adapté à chaque situation.

Chapitre III : Formulation Mathématique

III. 1. Introduction

L'échange de chaleur est un aspect fondamental de nombreux processus industriels et systèmes de refroidissement. Les échangeurs de chaleur à ailettes sont largement utilisés pour améliorer l'efficacité du transfert thermique en augmentant la surface de contact entre les fluides chauds et froids. La modélisation mathématique de ces échangeurs permet de prédire leur performance et d'optimiser leur conception avant leur réalisation physique.

Dans ce chapitre, nous aborderons la modélisation mathématique d'un échangeur de chaleur à ailettes à l'aide des outils de simulation Gambit et Fluent.

L'objectif de cette modélisation est de comprendre le comportement thermique de l'échangeur de chaleur à ailettes en utilisant les équations de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la conduction thermique. En prenant en compte les propriétés thermiques des matériaux, les conditions aux limites et la géométrie détaillée de l'échangeur, nous pourrions obtenir des prédictions précises et fiables de la distribution de température et du transfert de chaleur à travers les ailettes. Ensuite nous expliquerons comment construire le maillage, définir les propriétés des matériaux, spécifier les conditions aux limites et configurer les paramètres de simulation pour obtenir des résultats précis.

Nous aborderons également les différentes méthodes et approches pour l'analyse des résultats de simulation, telles que l'évaluation des coefficients de transfert de chaleur, l'optimisation de la conception de l'échangeur de chaleur et la comparaison avec des données expérimentales ou des modèles analytiques existants.

L'organigramme présenté sur la figure (III.1) nous explique les étapes d'un calcul CFD

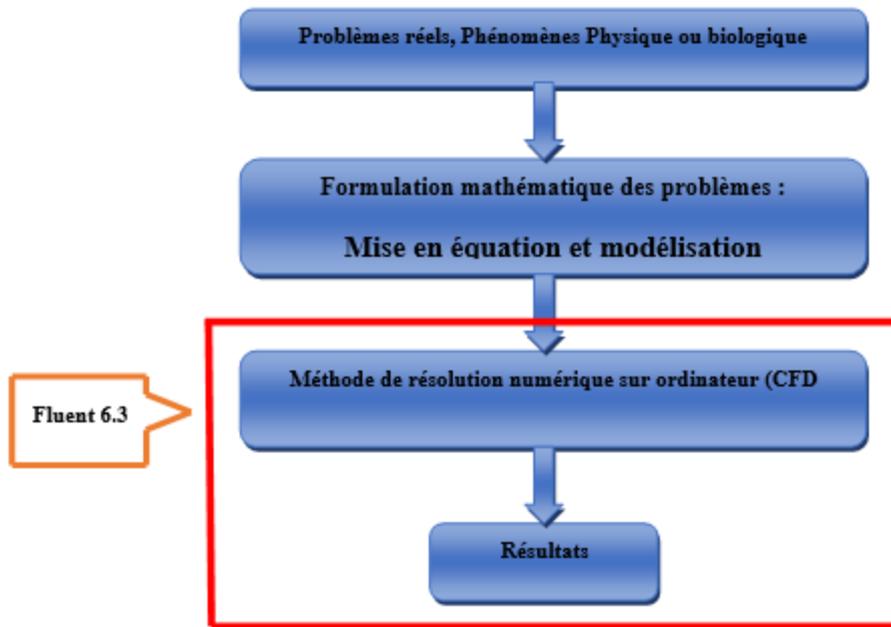


Figure III.1: les étapes de calcul à l'aide d'un code CFD.

III. 2. Description du modèle physique

Le modèle physique considéré est schématisé sur la figure (III.2), il s'agit d'un échangeur de chaleur à tube concentrique à contre -courant, le fluide froid (l'eau) s'écoule dans l'espace interne. Le fluide chaud (eau) circule dans le tube externe, avec une vitesse constante. Cette géométrie est réaliser pour faire une teste initiale pour un écoulement dans une paroi lisse sans ailettes et sans nanofluide.

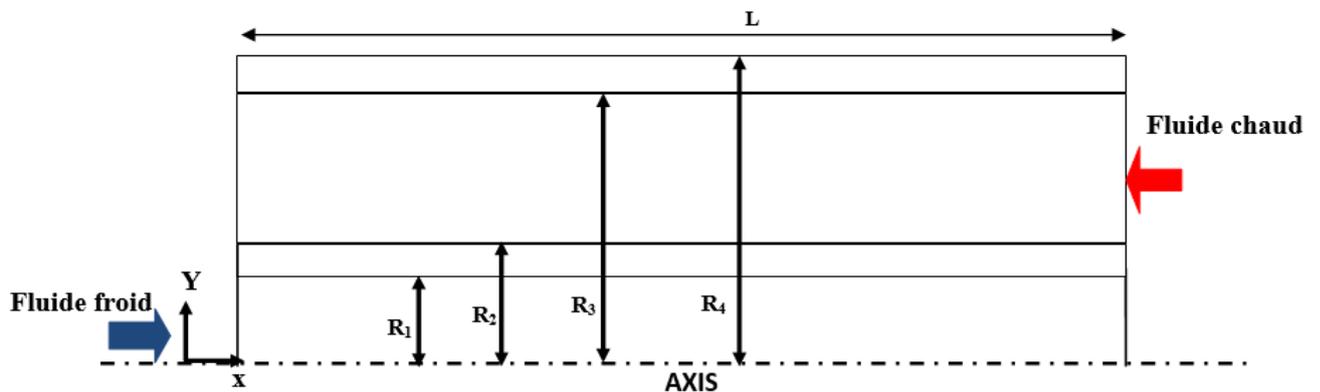


Figure III.2: Géométrie d'échangeur de chaleur sans ailettes

En suite en va ajouter des ailettes dans la géométrie précédente avec les mêmes dimensions quand a appliqué dans la géométrie sans ailettes.

la figure (III.3) présente la géométrie avec ailettes, il s'agit aussi d'un échangeur de chaleur a tube concentrique à contre-courant le fluide chaud (l'eau)) s'écoule dans l'espace externe et le fluide froid (nanofluide) s'écoule dans l'espace interne .

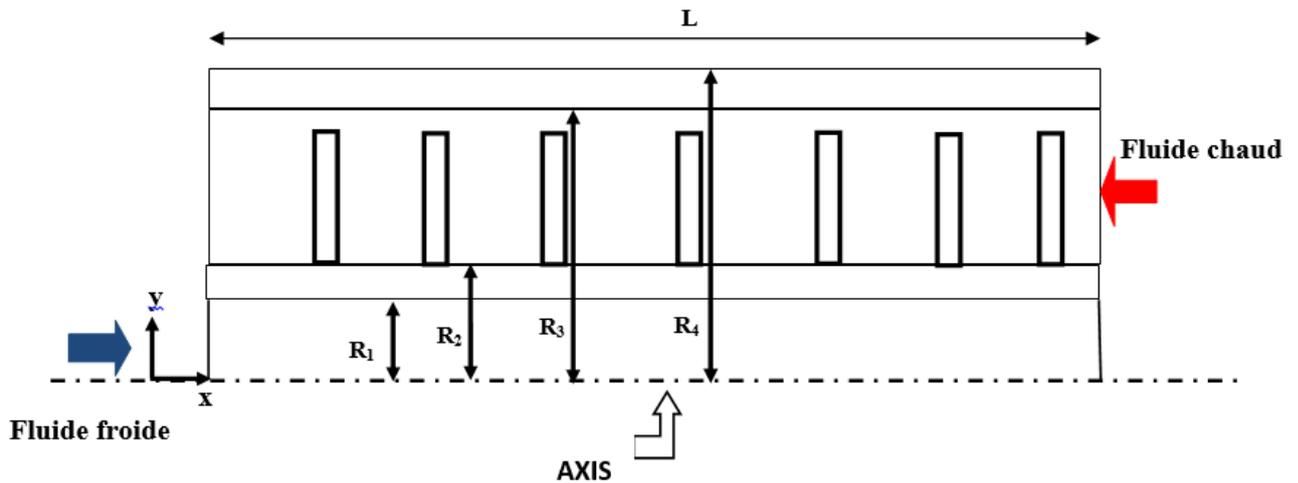


Figure III.3: Géométrie d'échangeur de chaleur avec ailettes

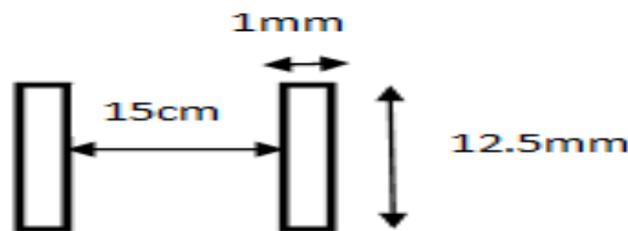


Figure III.4: les dimensions des ailettes

Le tableau III.1 présente les dimensions géométriques détaillées de l'échangeur de chaleur sans ailettes et le tableau III.2 présente les dimensions géométriques détaillées de l'échangeur de chaleur avec ailettes. Les fluides caloporteurs utilisés sont : l'eau et le nanofluide Oxyde d'Aluminium (Al_2O_3/eau).

Les nombres de Reynolds considérés varient de 5800 à 14000.

Table 3: Dimensions géométriques détaillées de l'échangeur de chaleur sans ailettes

Dimension	L	R_1	R_2	R_3	R_4
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Valeur	2000	11	12.5	26.5	30.5

Table 4: Dimensions géométriques détaillées de l'échangeur de chaleur avec ailettes

Dimension	(L)	(R_1)	(R_2)	(R_3)	(R_4)	(e)	(l)	(h)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)
Valeur	2000	11	12.5	26.5	30.5	1	12.5	15

III. 3. Formulation mathématique

III. 3. 1. Hypothèses

Les hypothèses simplificatrices suivantes ont été prises en compte lors de l'incorporation des équations décrivant les caractéristiques du transfert de chaleur et de l'écoulement à l'intérieur du tube :

- L'écoulement est supposé turbulent
- L'écoulement est permanent et bidimensionnel.
- Le fluide froid dans le tube interne (nanofluide) est supposé incompressible.
- Le fluide chaud dans le tube externe (l'eau) est aussi supposé incompressible.
- Les propriétés thermo physiques des fluides (chaud et froid) sont supposées constantes.

III. 3. 2. Équations Gouvernantes dans le régime turbulent

Si l'on considère un écoulement laminaire ou turbulent, les problèmes liés à l'écoulement de fluide peuvent être résolus en utilisant l'équation de quantité de mouvement, l'équation de continuité et l'équation de l'énergie. La modélisation de la turbulence est une branche de la dynamique des fluides qui se concentre sur la représentation de l'influence de la turbulence sur l'écoulement de fluide, dans le cadre de simulations numériques d'écoulements turbulents.

Pour le fluide chaud

III. 3. 2. 1. Continuité

C'est l'équation qui s'exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivant :

$$\frac{\partial u_c}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_c)}{\partial r} = 0 \quad (3.1)$$

III. 3. 2. 2. Conservation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenue dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquée. Il s'écrit sous la forme suivant :

Suivant l'axe Ox :

$$u_c = \frac{\partial u_c}{\partial x} + v_c \frac{\partial u_c}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_c}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_c}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \left(r \frac{\partial^2 u_c}{\partial r} \right) \right) \quad (3.2)$$

Suivant l'axe Or :

$$v_c = \frac{\partial v_c}{\partial x} + v_c \frac{\partial v_c}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_c}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_c}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \left(r \frac{\partial^2 v_c}{\partial r} \right) \right) \quad (3.3)$$

III. 3. 2. 3. Conservation d'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$u_c \frac{\partial T_c}{\partial x} + v_c \frac{\partial T_c}{\partial r} = \alpha_c \left(\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \frac{\partial T_c}{\partial r})}{\partial r} \right) \quad (3.4)$$

- *Pour le fluide froid*

III. 3. 2. 4. Continuité

$$\frac{\partial u_{nf}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_{nf})}{\partial r} = 0 \quad (3.5)$$

III. 3. 2. 5. Conservation de la quantité de mouvement

Suivant l'axe Ox :

$$u_{nf} = \frac{\partial u_{nf}}{\partial x} + v_{nf} \frac{\partial u_{nf}}{\partial r} \quad (3.6)$$

Suivant l'axe Or :

$$u_{nf} = \frac{\partial v_{nf}}{\partial x} + v_{nf} \frac{\partial v_{nf}}{\partial r} \quad (3.7)$$

III. 3. 2. 6. Conservation d'énergie

$$u_{nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial x} + v_{nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial r} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T_{nf}}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{nf}}{\partial r} \right) \quad (3.8)$$

III. 3. 2. 7. Equations de turbulence k- ϵ

Il s'agit d'un modèle semi-empirique de l'équation de transport basé sur l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation ϵ . L'équation de transport du modèle pour k est dérivée de l'équation exacte, tandis que l'équation de transport du modèle pour ϵ est obtenue par un raisonnement physique et ressemble peu à la contrepartie mathématiquement exacte

Les deux équations de turbulence proposées sont données comme suit :

Equations d'énergie cinétique k :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho k u_{i1}] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3.9)$$

Equation de la dissipation pour ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho \epsilon u_{i1}] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \left(\frac{\epsilon}{K} \right) G_k + C_{2\epsilon} \rho \left(\frac{\epsilon^2}{K} \right) \quad (3.10)$$

Où :

- k est l'énergie cinétique turbulente par unité de masse
- ϵ est la dissipation de l'énergie turbulente par unité de masse

- u est la vitesse du fluide
- μ_t est la viscosité turbulente
- C_{ε_1} et C_{ε_2} sont des coefficients de modèle constants
- ρ est la masse volumique du fluide
- t est le temps

On peut modéliser la viscosité turbulente μ_t comme suit.

$$\mu_t = \frac{(\rho c - (pk^2))}{\epsilon} \quad (3.11)$$

III. 4. Propriétés thermo- physiques

Un nanofluide est formé par la préparation d'un mélange de nanoparticules et d'un fluide de base. Les propriétés des nanofluides résultent de l'effet combiné des propriétés des nanoparticules, du fluide de base, de la taille des nanoparticules et de leur concentration volumique. Plusieurs modèles ont été développés pour estimer les propriétés du nanofluide considéré, afin de décrire de manière adéquate les problèmes de convection forcée dans des géométries similaires à celle étudiée ici. Le tableau III.3 répertorie les propriétés du fluide de base et des nanoparticules utilisés dans cette étude.

La densité et la capacité calorifique du nanofluide sont déterminées à partir des équations suivantes :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_{np} \quad (3.12)$$

$$C_{p_{nf}} = (1 - \varphi)C_{p_f} + \varphi C_{p_{np}} \quad (3.13)$$

Où

$(\rho C_p)_f$ et $(\rho C_p)_{np}$ représentent respectivement le produit de la masse volumique et de la capacité calorifique du fluide de base et des nanoparticules solides.

De nombreuses expressions, basées sur des études expérimentales et théoriques, ont été proposées pour la conductivité thermique et la viscosité des nanofluides.

Pour la conductivité, nous avons retenu le modèle proposé par Hamilton crosser [36].

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_f - \varphi(n-1)(\lambda_f - \lambda_{np})}{\lambda_p + (n-1)\lambda_f + \varphi(\lambda_f - \lambda_p)} \lambda_f \quad (3.14)$$

Pour la viscosité dynamique, nous avons retenu le modèle proposé par Brinkman [31]

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (3.15)$$

Les propriétés thermo physiques du fluide de base (eau) et des nanoparticules solides AL_2O_3 utilisées dans la présente étude sont spécifiées dans le tableau III.3

Table 5: propriétés du fluide de base et de nanoparticule utilisée dans cette recherche

Matériaux	Conductivité thermique (W/mK)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Viscosité (Pa S)
Eau	0.6103	998.2	4182	0.001003
AL_2O_3	36	3600	765	NA

En utilisant toutes ces corrélations et propriétés du fluide de base et de la nanoparticule comme mentionné dans le tableau III.3, et les propriétés déterminées pour le nanofluide AL_2O_3 sont présentées dans le tableau III.4..

Table 6: Propriétés du nanofluide à différentes concentrations volumiques

Nanofluide	Concentration volumique %	Conductivité thermique (W/mK)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Viscosité (Pa.s)
	0(eau)	0.6103	998.2	4182	0.001003
AL_2O_3	1	0.63298	1024.218	4147.83	0.001028
	3	0.70077	1076.254	4079.49	0.001082
	5	0.77115	1128.29	4011.15	0.001140

III. 5. Conditions aux limites

Pour la résolution du système d'équations précédemment obtenu. Les conditions aux limites doivent être combinées pour chaque variable dépendante. Pour notre problème, ces conditions sont les suivantes :

- La température de fluide chaud (eau) à l'entrée du canal $T_{cin} = 333$
- La température de fluide froid (nanofluide) à l'entrée du canal $T_{fin} = 293K$
- La vitesse à l'entrée du tube interne est constante et correspond à un nombre de Reynolds fixe.

Cette vitesse s'exprime par l'équation suivante

$$u_{in} = \frac{Re \mu}{\rho D_h}$$

Table 7: Valeurs de vitesses correspondantes aux nombres de Reynolds choisis.

Reynolds	Vitesse correspondante fluide chaud (m/s)	Vitesse correspondante fluide froid (m/s)
5800	0.208	0.265
7000	0.251	0.320
8500	0.305	0.388
10000	0.359	0.457
14000	0.502	0.639

Table 8: Conditions aux limites.

	Limite	Condition thermique
Fluide chaud	Entrée du fluide chaud	
	$x=2m ;$ $R_2 < r < R_3$	$T=333k$ $u_{in,c} = 0.208 \text{ m/s}$
	Sortie du fluide chaud	
	$x=0 ;$ $R_2 < r < R_3$	$P_c = P_{atm}$ $\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad \phi = (u, v, T, \varepsilon)$
Fluide froide (nanofluide)	Entrée du fluide froide	
	$x=0 ; \quad 0 < r < R_1$	$U = u_{in, f}$ $v_{in, f} = 0$ $T_{in, f} = 300k$
	Sortie du fluide froide	
	$X=2m ; \quad 0 < r < R_1$	$P_f = P_{atm}$ $\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad ; \phi = (u, v, T, \varepsilon)$

$$X=0 \quad \text{et} \quad x=L : \quad \frac{\partial T_s}{\partial r} = 0$$

Interface fluide froid -paroi interne : $r = R_1$ $T_f = T_s$ et $\lambda_f \frac{\partial T_c}{\partial r} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r}$

Interface fluide chaud -paroi interne : $r = R_2$ $T_c = T_s$ et $\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial r} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r}$

Interface fluide chaud -paroi externe : $r = R_3$ $T_c = T_s$ et $\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial r} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r}$

Paroi adiabatique : $r = R_4$: $\frac{\partial T_s}{\partial r} = 0$

III. 6. Paramètres caractéristiques

On utilise des équations adimensionnelles pour simplifier et trouver des solutions générales aux problèmes physiques.

III. 6. 1. Nombre de Reynolds (Re)

Est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides, il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime par exemple dans notre cas turbulent. Le nombre de Reynolds est lié à la viscosité, densité, et une longueur de référence, il est défini de la manière suivante :

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (3.15)$$

u : La vitesse moyenne à l'entrée du canal a été calculée à partir du nombre de Reynolds

$$\mu = \frac{Re \nu}{D_h} \quad (3.16)$$

Le diamètre hydraulique D_h est défini par la relation :

$$D_h = \frac{4S_p}{p} = 2H_{moy} \quad (3.17)$$

III. 6. 2. Nombre de Prandtl (Pr)

Pr représente l'efficacité relative de transport de quantité de mouvement et de chaleur par diffusion.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (3.18)$$

III. 6. 3. Nombre de Nusselt (Nu)

Est un nombre adimensionnel du coefficient h , utilisé dans les opérations de transfert

thermique.

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda} \quad (3.19)$$

III. 6. 4. Coefficient de frottement f

Le coefficient de frottement local à la paroi $C_{f,est}$ donné par :

$$C_f = \frac{2r_w}{\rho u^2} \quad (3.20)$$

Le coefficient de frottement moyen est donné par :

$$f = \frac{(\Delta p/L)D_h}{\frac{1}{2}\rho u^2} \quad (3.21)$$

Δp représente la chute de pression entre l'entrée et la sortie du canal ondulé

$$\Delta p = p_{moy,e} - p_{moy,s}$$

Le coefficient de transfert de chaleur local $h(x)$ est calculé à partir de la relation :

$$h(x) = \frac{Q_w(x)}{T_w(x) - T_b(x)} \quad (3.22)$$

Q_w est la densité du flux thermique à la paroi, $T_w(x)$ et $T_b(x)$ représentent respectivement

Les températures moyennes de la paroi et du fluide calculées sur une section d'abscisse x .

Le coefficient de transfert thermique moyen sur une longueur L du canal est calculé par :

$$h = \frac{1}{L} \int_0^L h(x) dx \quad (3.23)$$

Les nombres du Nusselt local et moyen sont donnés par les relations :

$$N(x) = \frac{D_h}{\lambda} h(x) \quad (3.24)$$

$$Nu(x) = \frac{1}{L} \int_0^L Nu(x) dx \quad (3.25)$$

III. 6. 5. Indice de performance thermo hydraulique

Le facteur de performance thermo hydraulique est donné par la relation :

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (3.26)$$

Avec u_0 et f_0 sont des grandeurs relatives a un écoulement d'eau pure.

III. 7. Présentation de GAMBIT et de FLUNET :

La résolution par le logiciel de simulation numérique de l'écoulement FLUNET nécessite la présence de logiciel GAMBIT.

III. 7. 1. GAMBIT :

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage.

GAMBIT est un préprocesseur intègre pour l'analyse en CFD (Computational Fluid Dynamics), il permet de générer un maillage structure ou non structure en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Les options de génération de Gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structure.

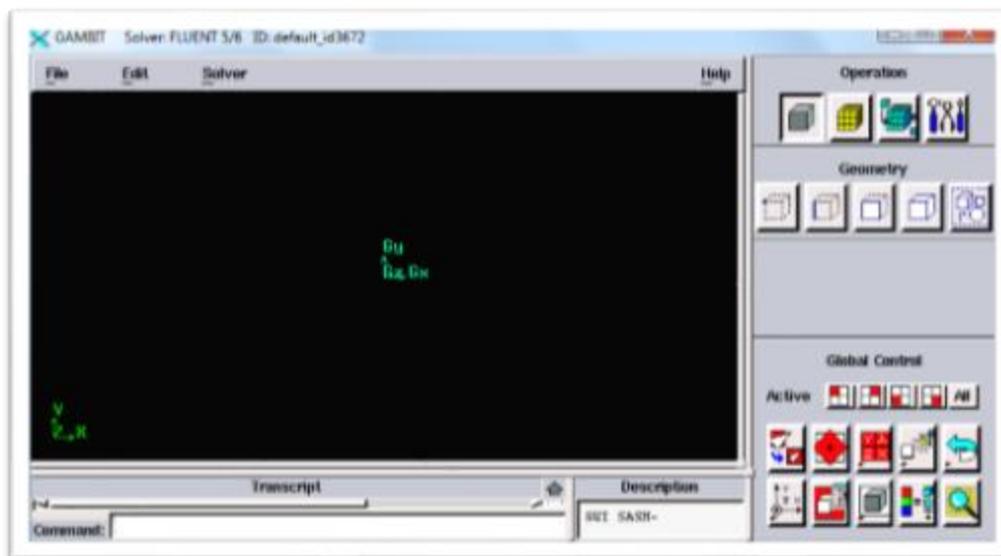


Figure III.5: l'interface de Gambit

III. 7. 1. 1. Choix de maillage

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie

demaillage qui réponde à nos objectifs, parmi ces paramètres, on peut citer :

- Le nombre de mailles.
- La distance entre les mailles (concentration des mailles).
- La forme de la maille.
- Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

III. 7. 1. 2. Choix du solveur

Le maillage à être créé est destiné à être utilisé avec FLUENT 6.3 :

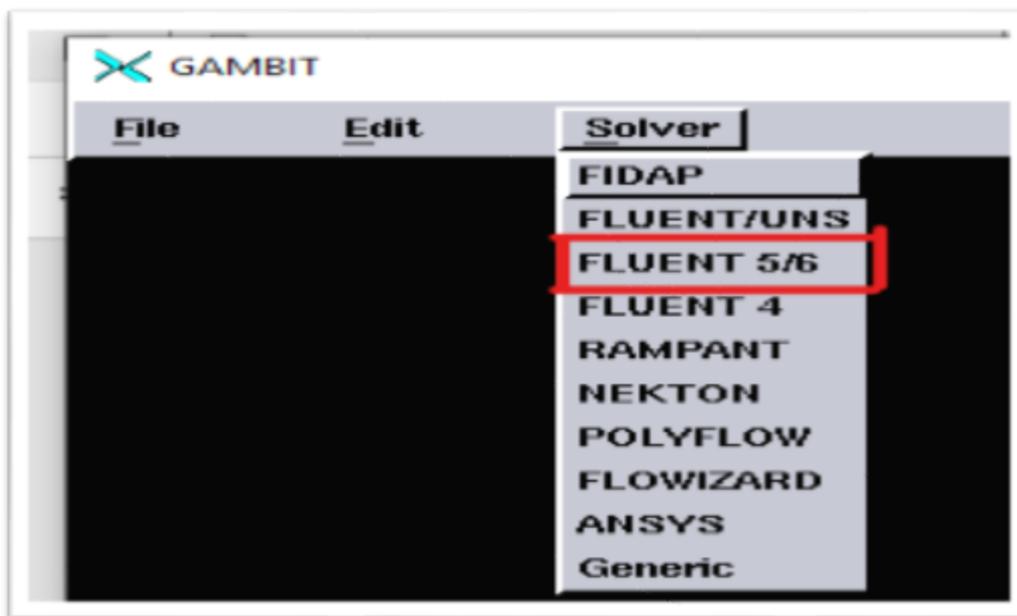


Figure III.6: Choix du solveur

III. 7. 1. 3. Création de la géométrie

Figure III.7: Création de la géométrie

III. 7. 1. 4. Maillage de la géométrie

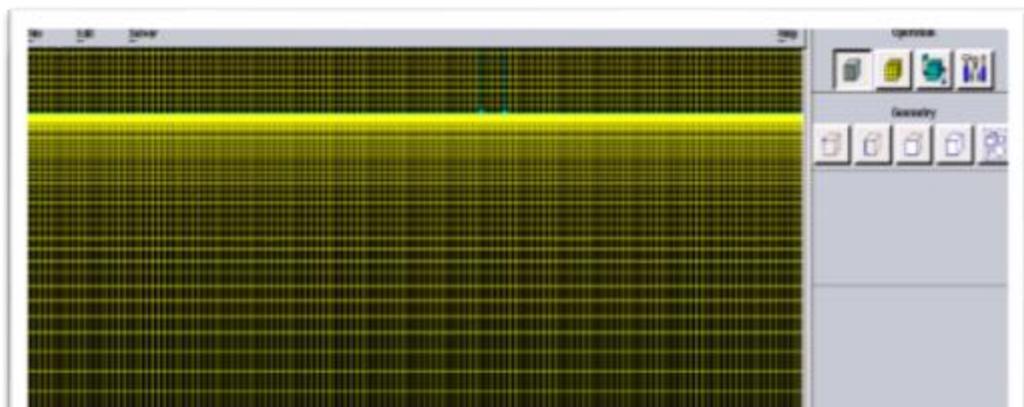
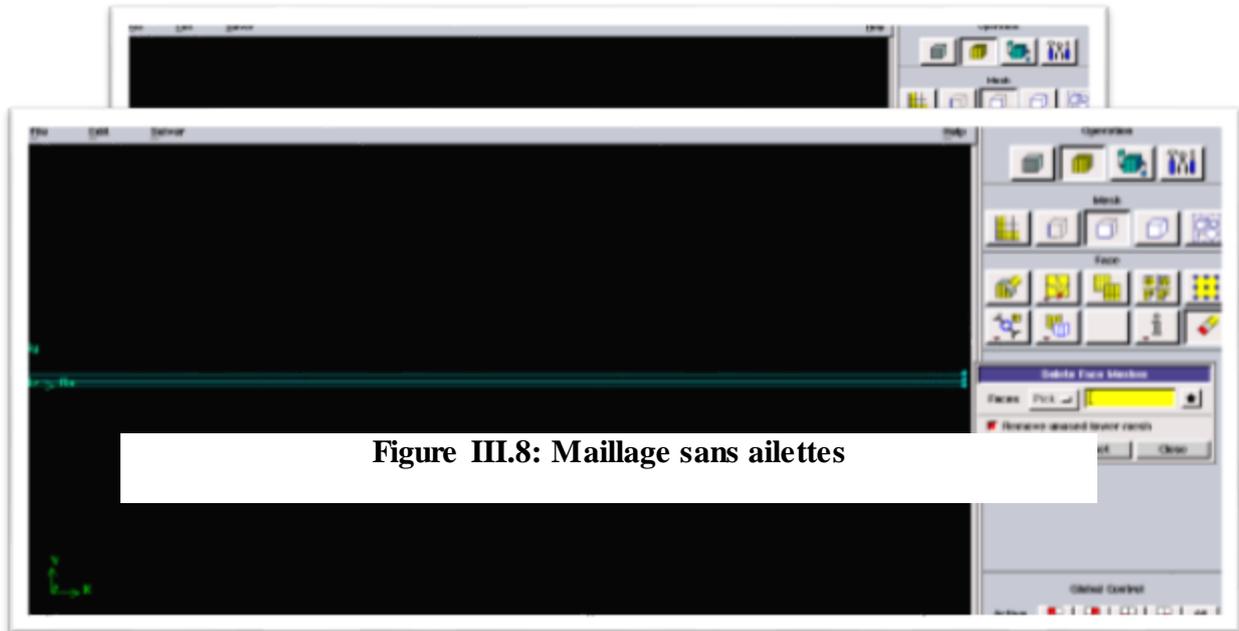


Figure III.9: Maillage avec ailettes

III. 7. 1. 5. Conditions aux limites

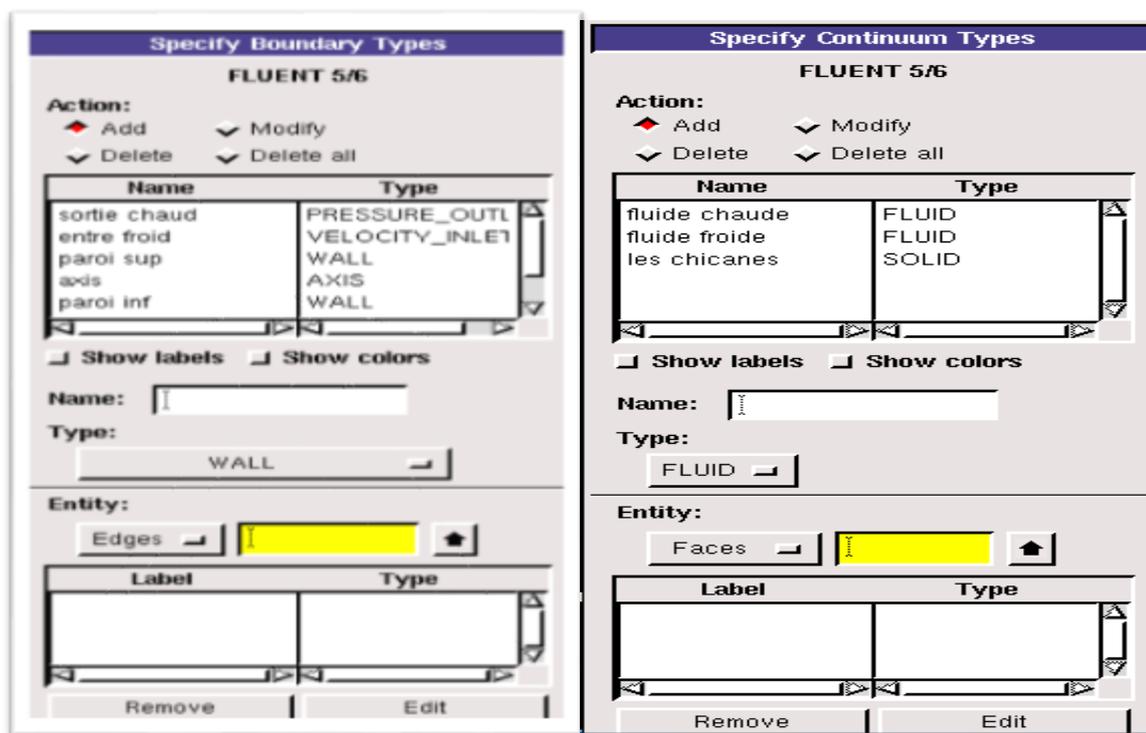


Figure III.10: Les conditions aux limites des systèmes étudiés

III. 7. 1. 6. Enregistrement du fichier (.mesh)

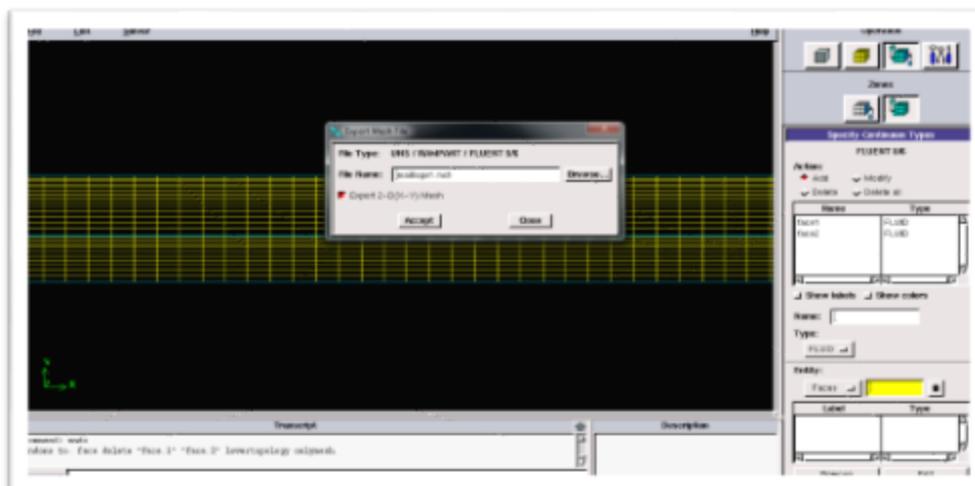


Figure III.11: Exportation du maillage.

III. 7. 2. FLUENT :

FLUENT est un code de calcul pour modéliser l'écoulement des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des maillages non structurés, qui peuvent être produits pour des géométries complexes, avec une facilité relative. Les types de mailles supportées sont :

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

Fluent est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage. En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur la même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace.

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



Figure III.12: Interface du fluent

III. 7. 2. 1. Choisir le type de résolution

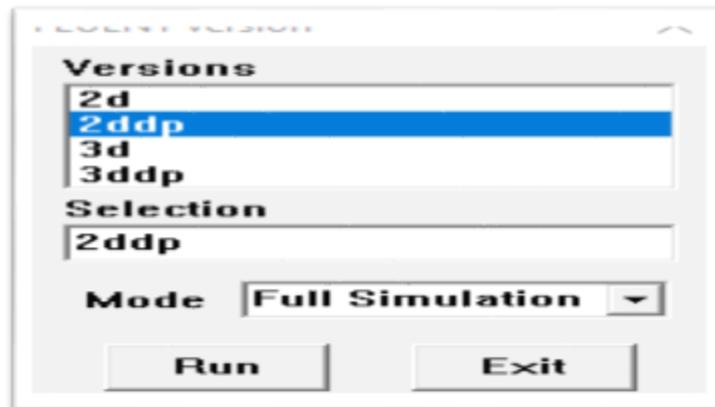


Figure III.13: Type de résolution

III. 7. 2. 2. Importation de la géométrie (*.msh) :

File → Read → Case...

III. 7. 2. 3. Vérification du maillage :

Grid → Check

III. 7. 2. 4. Contrôler la taille :

Grid → Info → Size

III. 7. 2. 5. Afficher le maillage :

Display → Grid

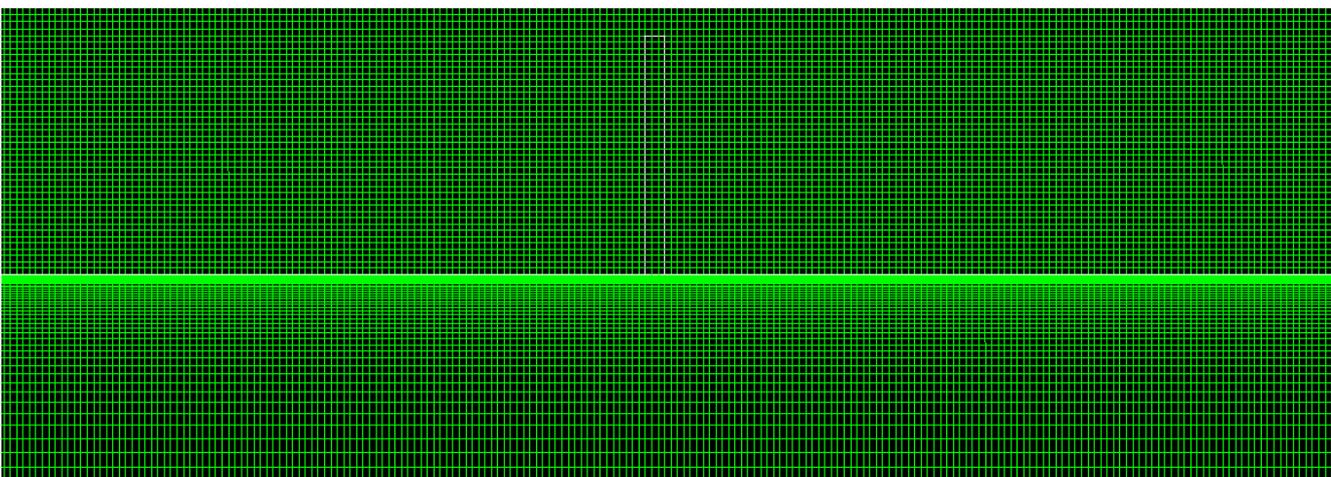


Figure III.14: Affichage du maillage.

III. 7. 2. 6. Préciser le solveur de propriétés :

Define → Models → Solver

Pour notre cas, c'est un solveur découplé avec une formulation implicite pour un cas 2D.

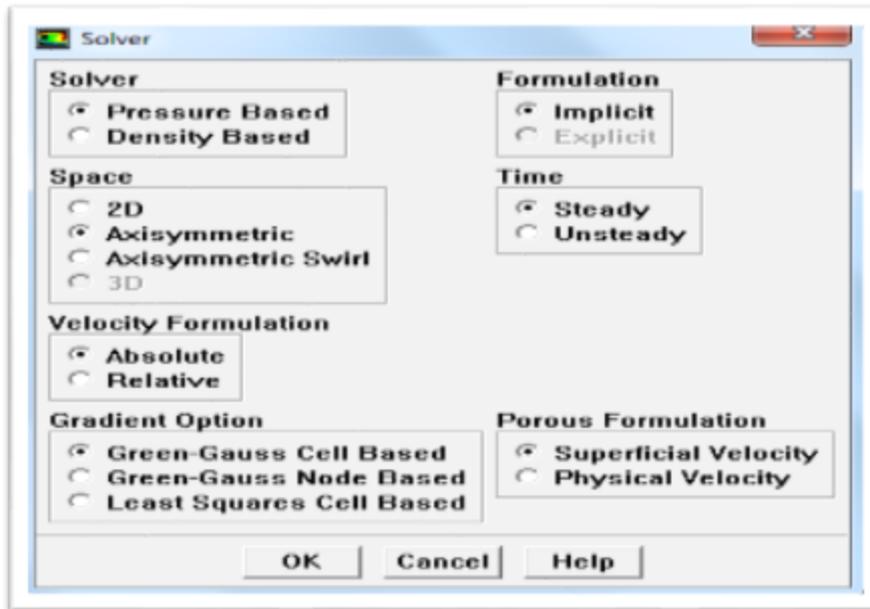


Figure III.15: Définition du modèle.

III. 7. 2. 7. Introduire l'équation d'énergie :

Define → Models → Energy

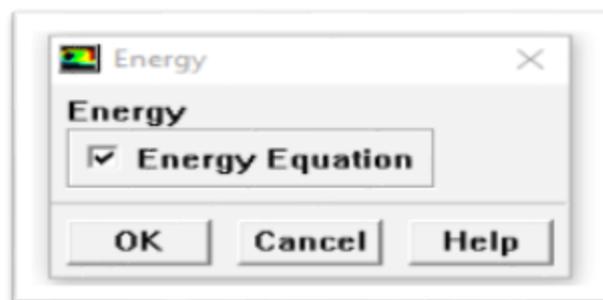


Figure III.16: Equation d'énergie

III. 7. 2. 8. Définir les propriétés des matériaux :

Pour l'eau

Define → Materials

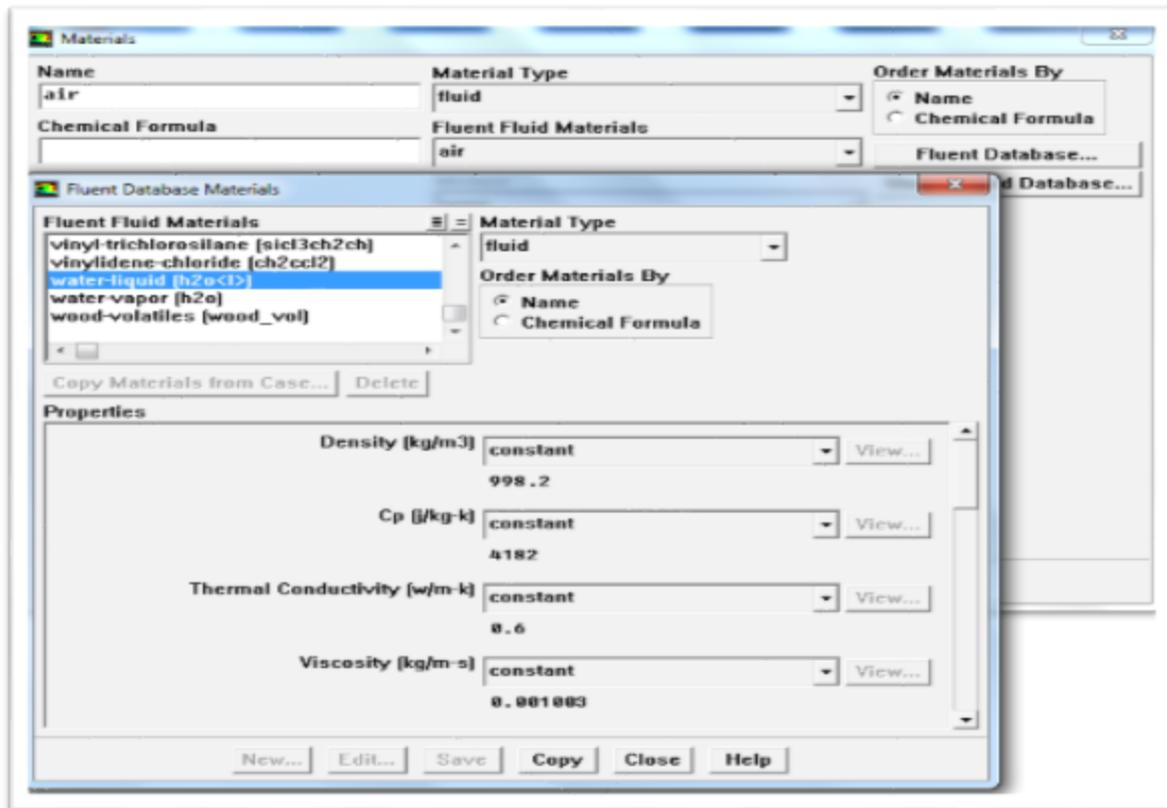


Figure III.17: Interface de la liste des fluides.

Pour le nanofluide

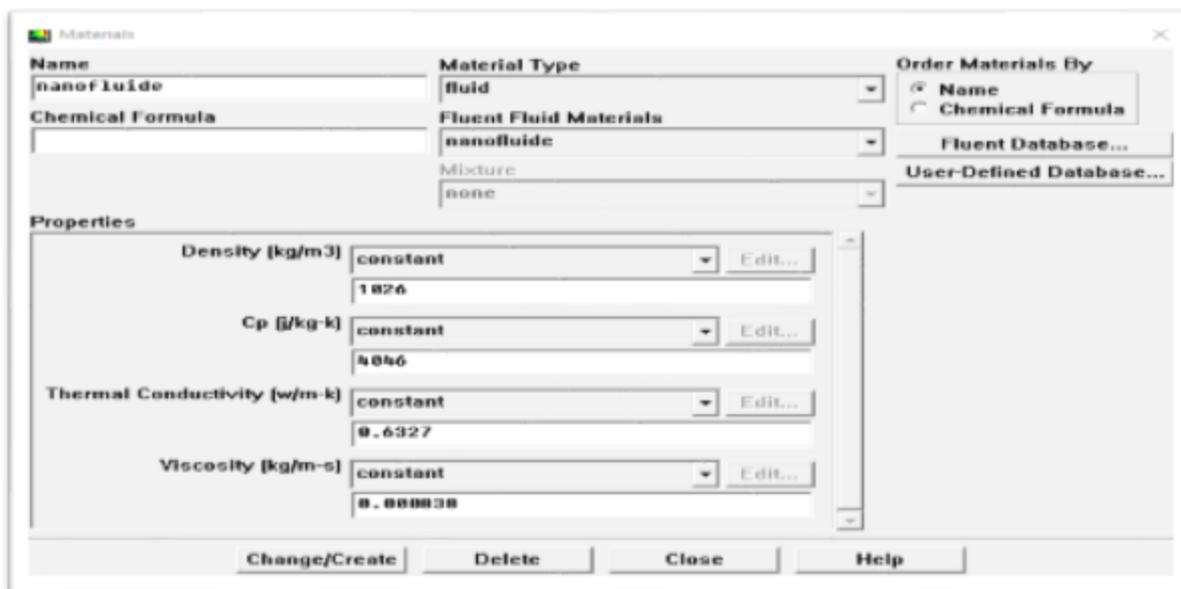


Figure III.18: les propriétés de nanofluide.

III. 7. 2. 9. Définir les conditions aux limites :

Define→Boundary Conditions

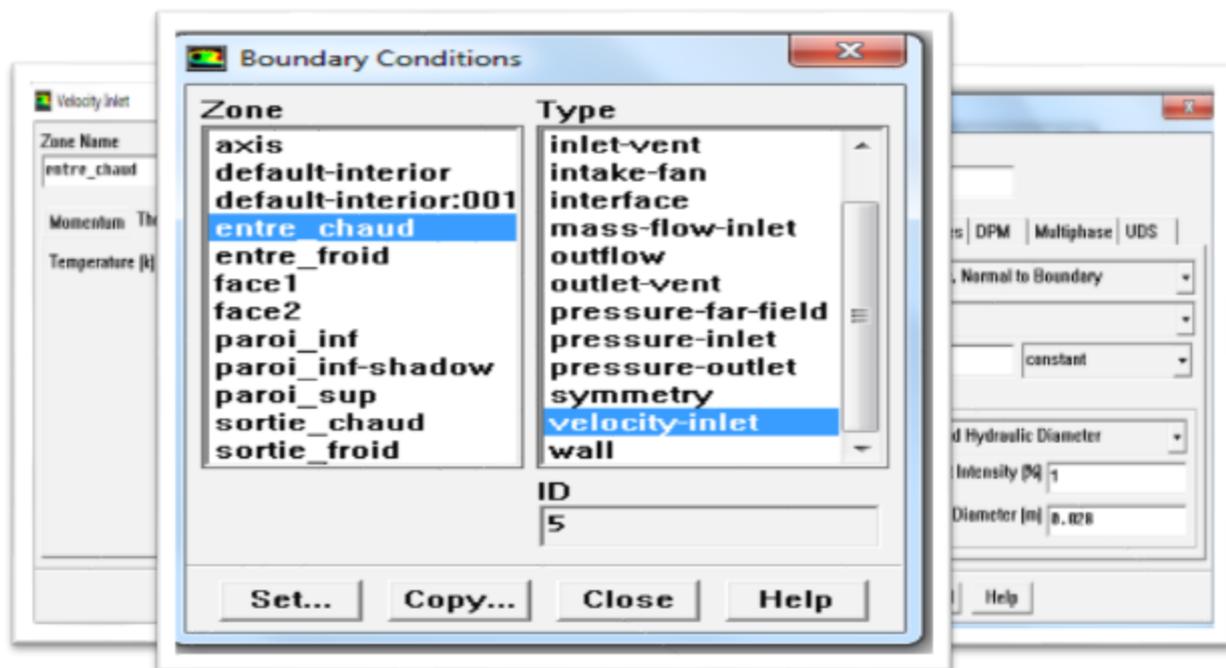


Figure III.19: Définition des conditions aux limites

III. 7. 2. 10. Solution

Solve → Controls → Solution.

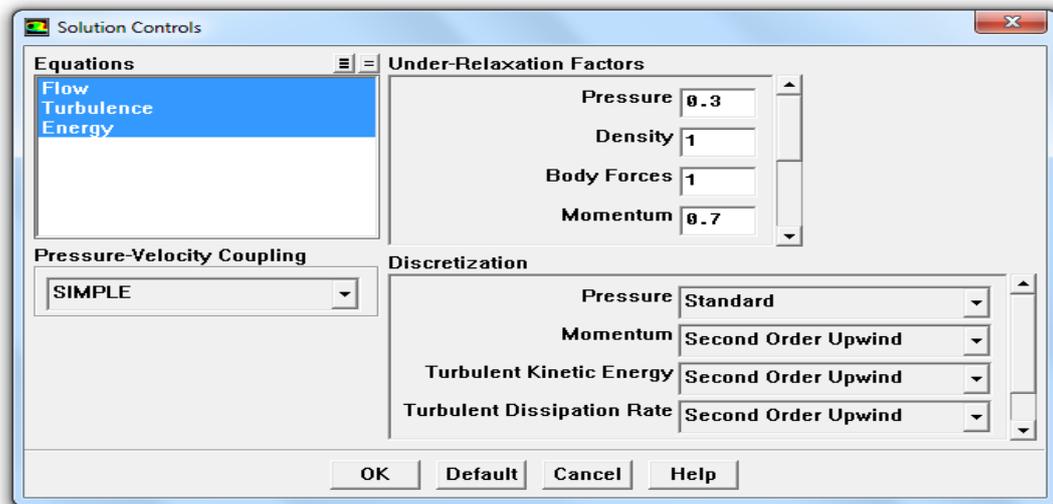


Figure III.20: Control de solution

Solve → Initialize → Initialize.

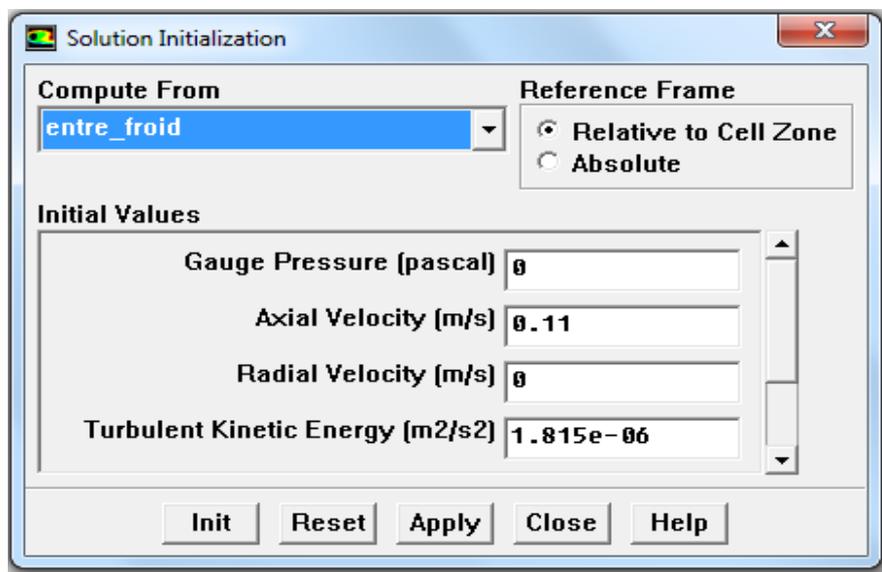


Figure III.21: Initialisation de la vitesse et la température à l'entrée

Solve → Monitors → Residual.

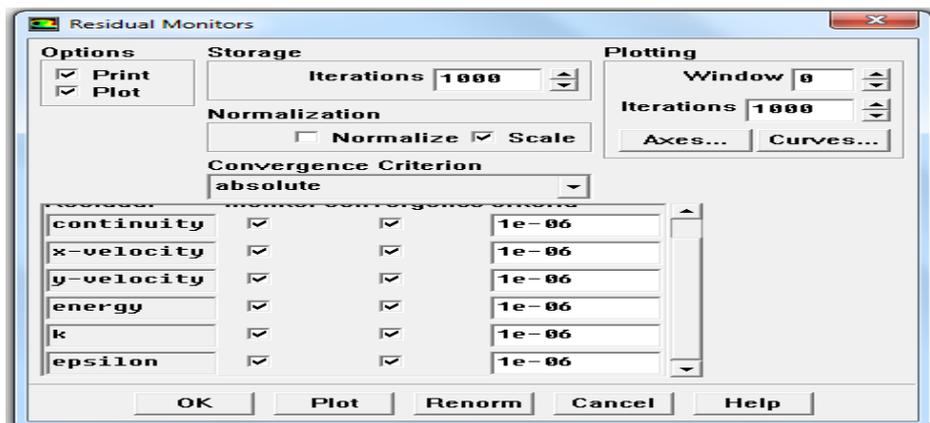


Figure III.22: Résidus des calculs.

Solve → Iterate

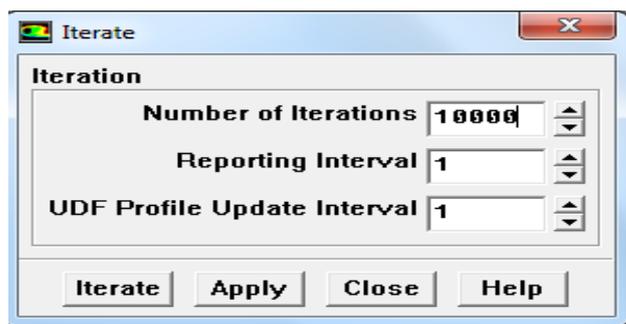


Figure III.23: Choix du nombre des itérations.

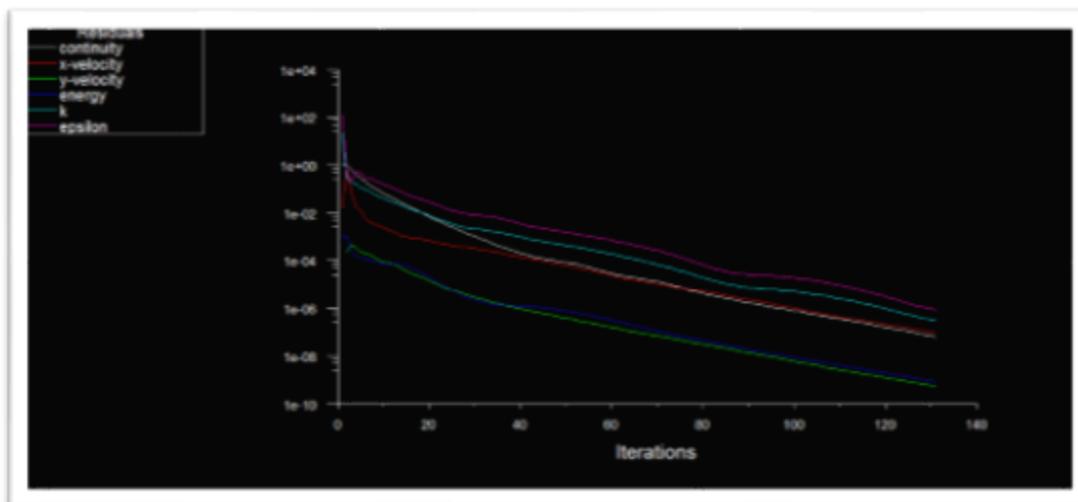


Figure III.24: Fenêtre des itérations.

III. 8. Test de maillage

Le maillage sert à faire une représentation discrète d'une variable continue sur un domaine de calcul, il joue un rôle très important dans la modélisation numérique d'un problème physique. La solution numérique dépend du type de maillage, donc une étude préliminaire est nécessaire pour valider les résultats.

Dans le présent travail, un maillage structuré est utilisé pour analyser l'indépendance de la solution. Plusieurs grilles ont été étudiées, cinq grilles ont été choisies : 10829, 16000, 21109, 25000, 32867.

Les résultats présentés sur la figure 3.32 montrent le profil radial de vitesse. On conclut que la grille de 21109 cellules permet d'obtenir une solution satisfaisante.

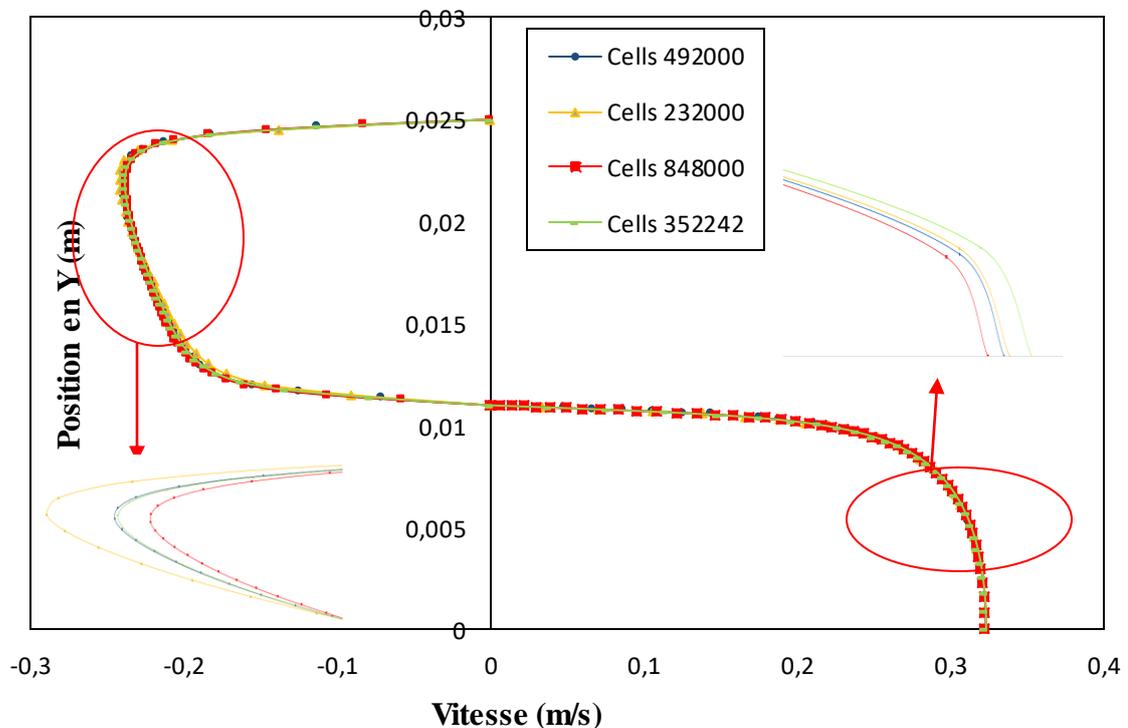


Figure III.25 : Test de maillage.

III. 9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les équations gouvernantes du transport et de transfert de chaleur utilisées dans notre étude pour résoudre le problème dynamique et thermique d'un écoulement de nanofluide à travers un échangeur de chaleur avec ailettes ainsi qu'une description succincte des méthodes numériques utilisées pour la simulation

numérique.

L'écoulement est décrit par les équations de Navier–Stokes associées aux conditions classiques de continuité de quantité de mouvement et d'énergie. Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement telles que le coefficient de transfert de chaleur par convection, le facteur de frottement, ont été présentés afin d'évaluer les performances thermiques et hydrauliques du système.

Chapitre IV Résultats et interprétations

IV. 1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats de la simulation numérique d'un écoulement de nanofluide à travers un échangeur de chaleur avec des ailettes. Les résultats obtenus ont été validés en comparaison avec l'étude expérimentale menée par Samad A. et al [49]. Nous avons analysé l'impact de la vitesse de l'écoulement et de la concentration volumique des nanoparticules à différentes concentrations (1%, 3% et 5%), ainsi que l'effet des ailettes sur le transfert thermique. Les résultats de cette étude seront interprétés et discutés en termes de variation du nombre de Nusselt, du facteur de frottement, et d'indice de performance thermo hydraulique.

IV. 2. Validation

La validation et la vérification de l'exactitude des résultats obtenus sont cruciales lors d'une étude numérique. Pour ce faire, la meilleure approche consiste à confronter les résultats des calculs numériques avec ceux issus des essais expérimentaux. Dans cette optique, nous avons utilisé les données expérimentales de Samad A. et al [49] afin de comparer le nombre de Nusselt moyen d'un écoulement de nanofluide d'oxyde d'aluminium (AL_2O_3 / eau) à travers un échangeur de chaleur sans et avec ailettes, pour un nombre de Reynold allant de 5800 à 14000. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure IV.1. Nous observons que les résultats sont très similaires par rapport les résultats expérimentaux.

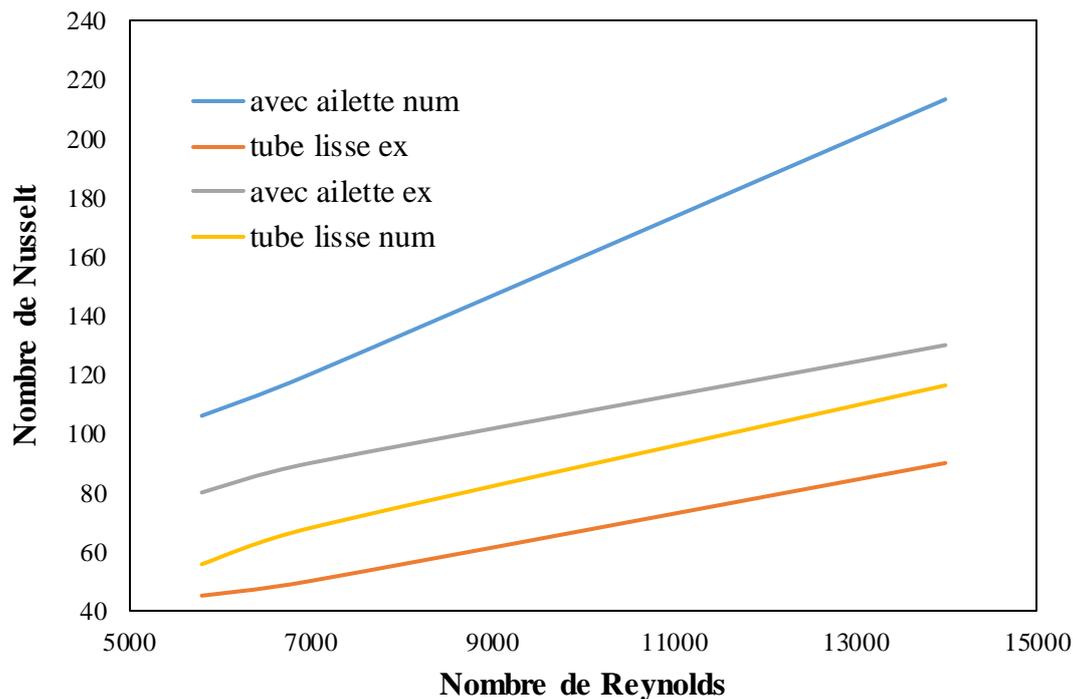


Figure IV.1 Comparaison avec les travaux expérimentaux de Samad A. et al [49] dans un échangeur de chaleur sans et avec ailette pour le nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Reynolds.

IV. 3. Résultats et discussions

IV. 3. 1. Profil de vitesse

➤ Pour $x=0.944$

La figure IV.2 présente le profil de vitesses à travers l'échangeur de chaleur à ailette pour le nanofluide AL_2O_3 /eau à une concentration volumique de 5 % pour un nombre de Reynolds de 8500.

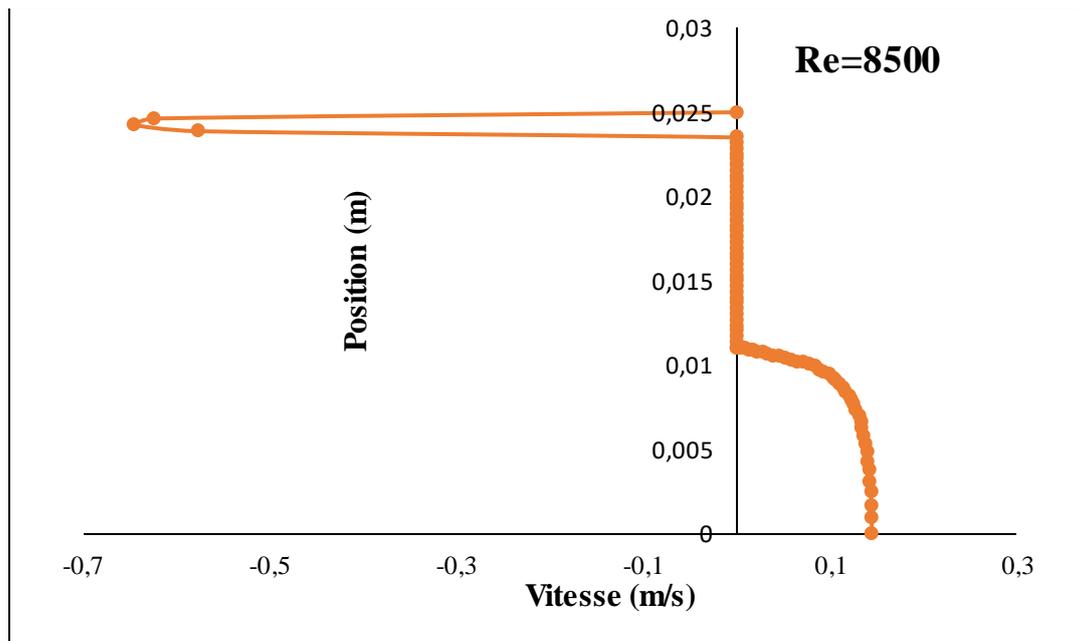


Figure IV.2 Profil de vitesse à $x= 0.944$ de l'échangeur de chaleur à ailette pour le nanofluide $[[AL]]_2O_3/$ eau à 5%.

➤ Pour $x=L/2$

La figure IV.3 montre la distribution de la vitesse a la section médiane de l'échangeur de chaleur pour trois concentrations volumique (1%,3%,5%) a trois nombre de Reynolds (5800, 8500,10000). On remarque que la vitesse augmente progressivement lorsque le nombre de Reynolds et la concentration volumique augmentent.

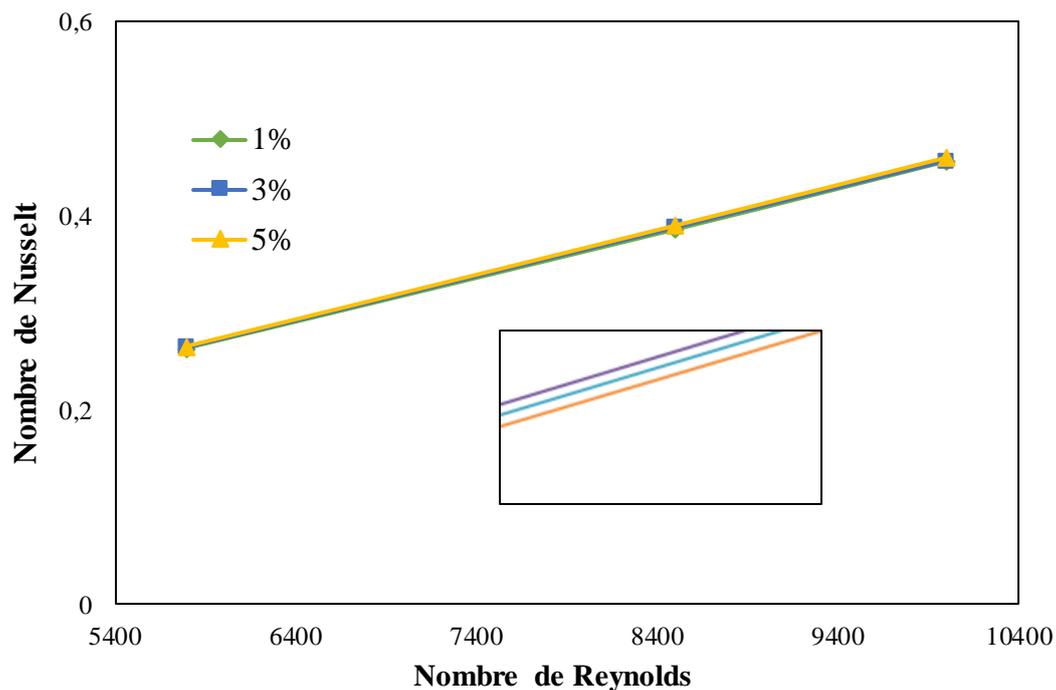


Figure IV.3 La variation de vitesse au milieu de l'échangeur pour le nanofluide $[[AL]]_2O_3$ / eau à (1%, 3%, 5%) et pour nombre de Reynolds (5800,8500 ,10000).

La figure IV.4 présente le profil de vitesses à travers l'échangeur de chaleur à ailette pour le nanofluide AL_2O_3 /eau à une concentration volumique de 5 % pour deux nombre de Reynolds 5800 et 14000. Nous remarquons que les vitesses sont en sens contraire entre eux parce que l'échangeur de chaleur est (contre-courant), pour la partie froid la vitesse augmente avec l'augmentation de nombre de Reynolds et pour la partie chaud la vitesse elle reste les mêmes pour les deux Reynolds.

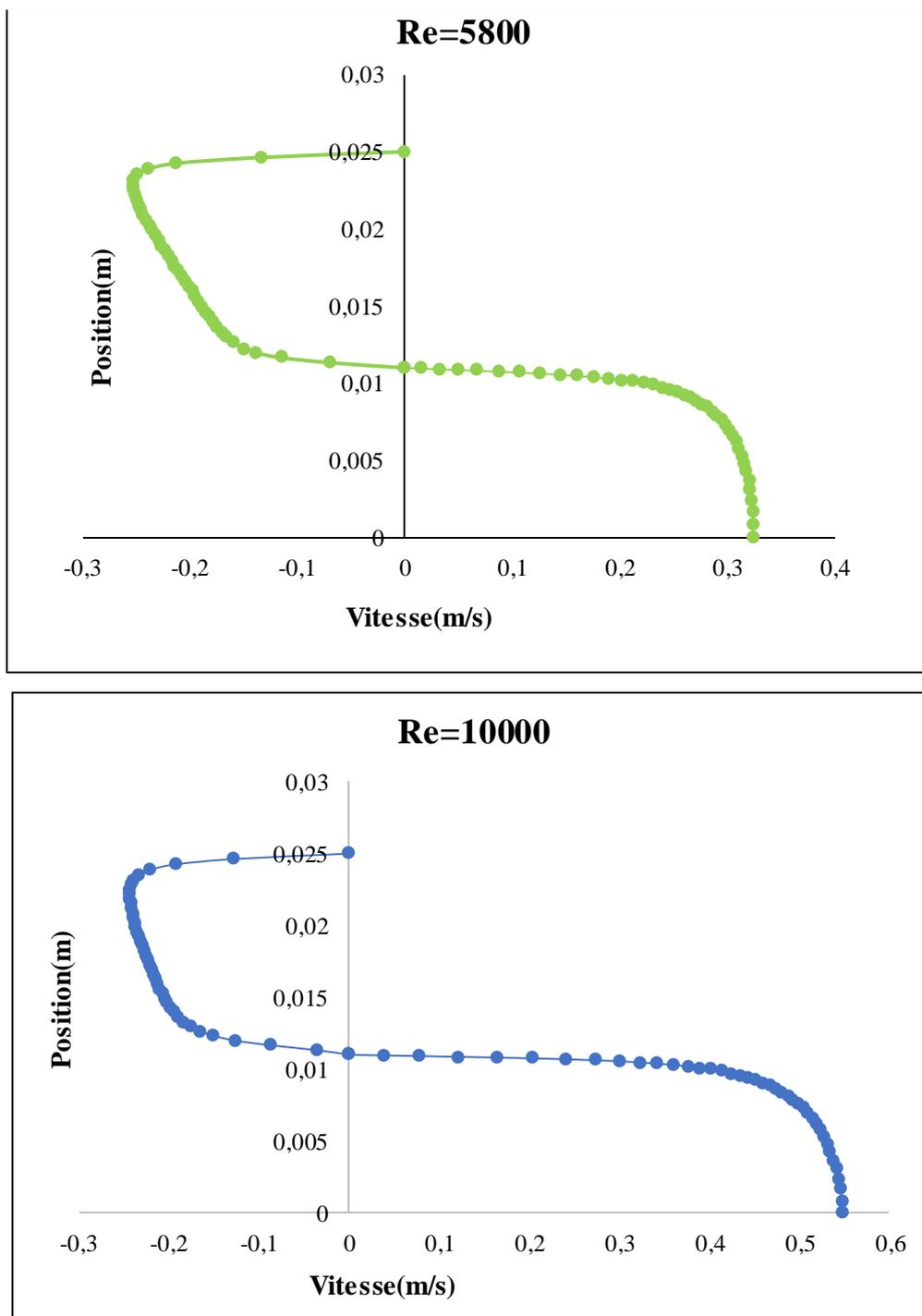


Figure IV.4 Profil de vitesse au milieu de l'échangeur de chaleur à ailette pour le nanofluide $[\text{AL}]_2\text{O}_3/\text{eau}$ à 5% pour deux nombre de Reynolds.

➤ **Pour $x=L$:**

La figure IV.5 montre la distribution de la vitesse de l'écoulement de nanofluid $\text{AL}_2\text{O}_3/\text{eau}$ à la sortie de l'échangeur de chaleur à ailettes pour trois concentrations volumique (1%,3%,5%)

et trois nombre de Reynolds (5800, 8500, 10000). Nous remarquons, lorsque le nombre de Reynolds et la concentration volumique augmentent la vitesse augmente progressivement.

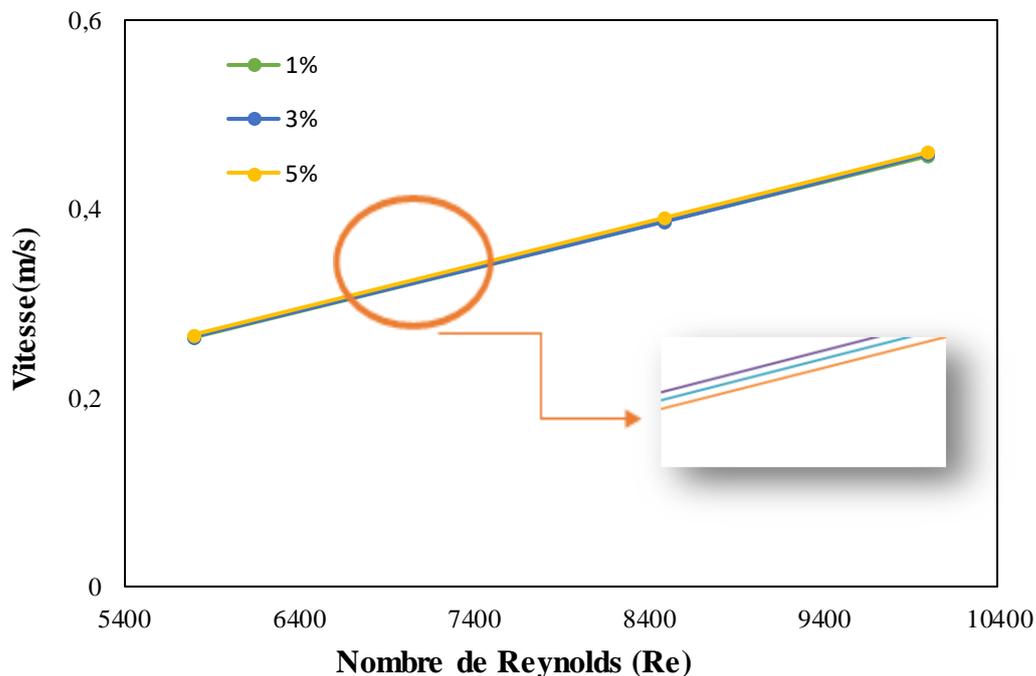


Figure IV.5 la distribution de la vitesse à la sortie de l'échangeur de chaleur pour le nanofluide $[\text{AL}]_2\text{O}_3/\text{eau}$.

La figure IV.6 présente le profil de vitesses de l'écoulement de nanofluide $\text{AL}_2\text{O}_3/\text{eau}$ à la sortie de l'échangeur de chaleur pour le nanofluide $\text{AL}_2\text{O}_3/\text{eau}$ à trois concentrations volumiques de (1%, 3%, 5%) pour un nombre de Reynolds de 8500. Nous remarquons que l'augmentation de la concentration volumique de nanofluide $\text{AL}_2\text{O}_3/\text{eau}$ dans le tube interne augmente la vitesse d'écoulement.

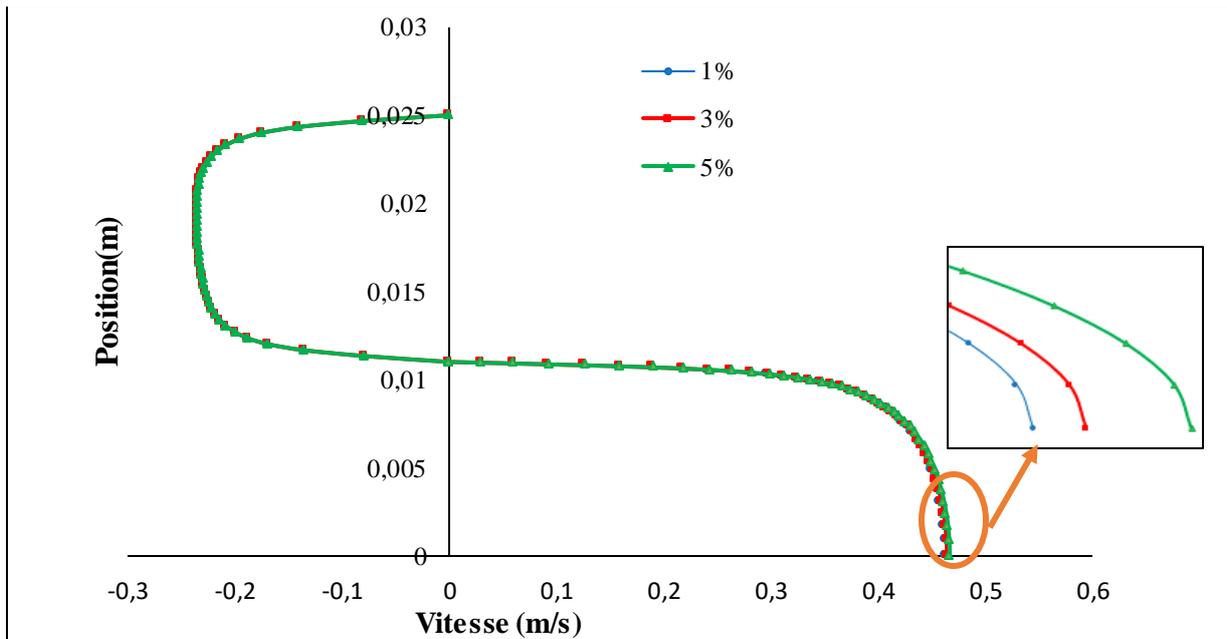
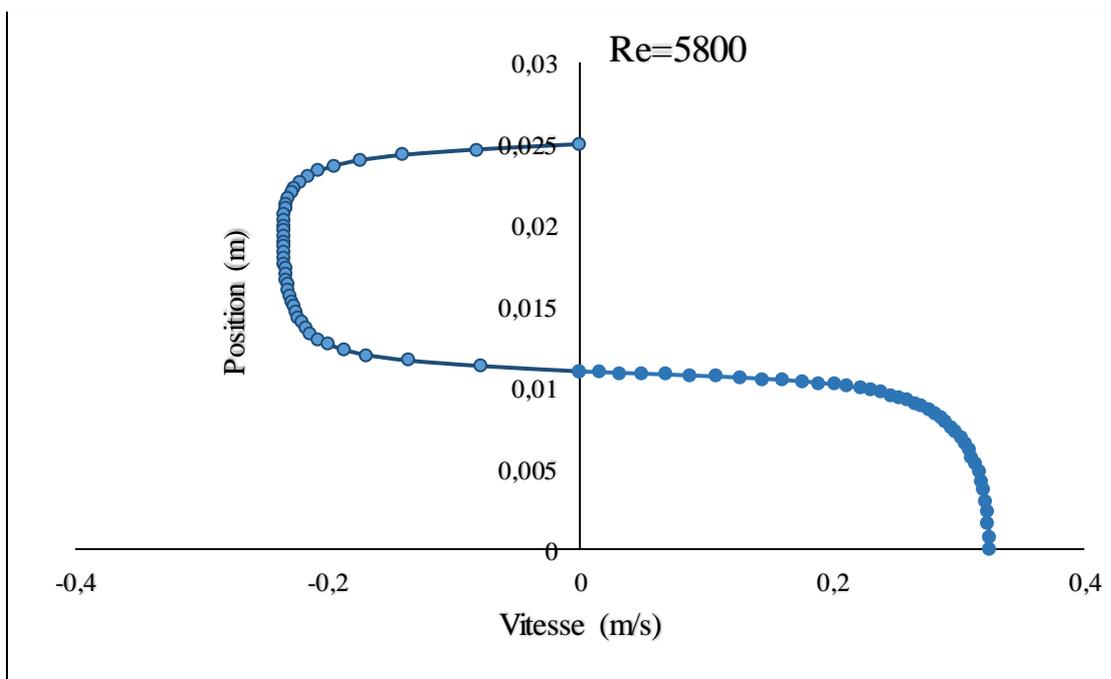


Figure IV.6 Profil de vitesse à la sortie de l'échangeur de chaleur pour le nanofluid $[[AL]]_2O_3$ /eau à Trois concentrations volumiques (1%,3%, 5%) pour un nombre de Reynolds égale 8500.

La figure IV.7 présente le profil de vitesses à la sortie de l'échangeur de chaleur pour le nanofluid AL_2O_3 /eau à une concentration volumique de 5 % pour deux nombre de Reynolds 5800 et 10000. Nous remarquons que c'est il y a une augmentation de nombre de Reynolds la vitesse augment dans le tube interne est reste constante dans le tube externe.



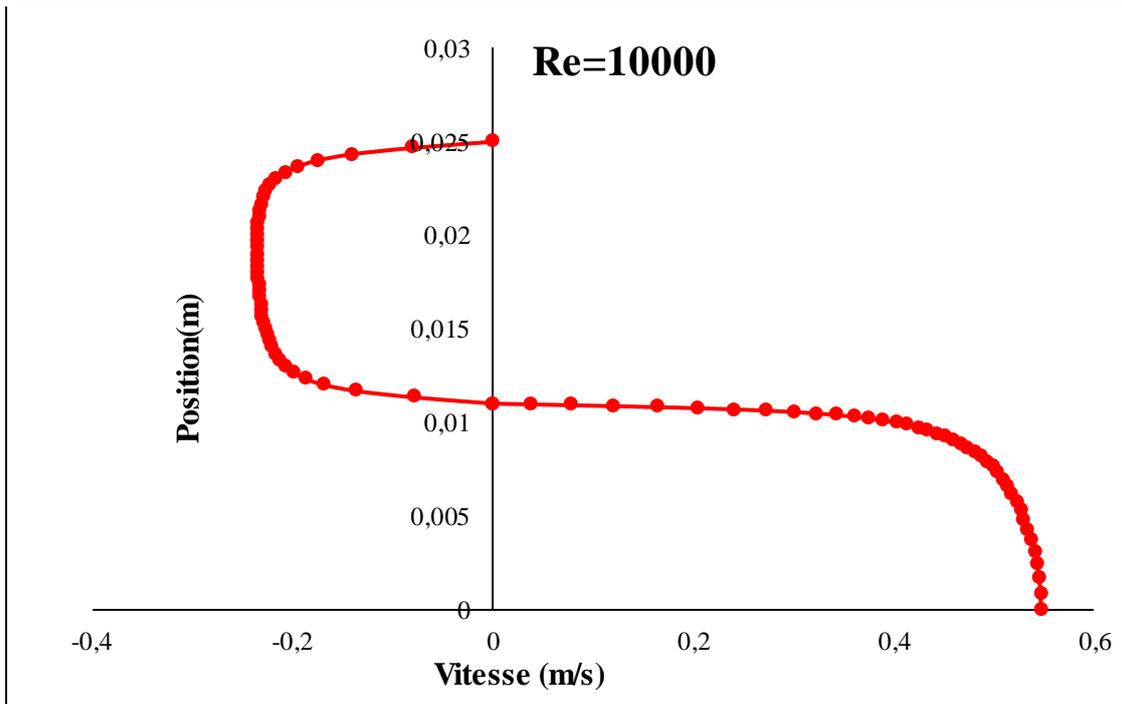
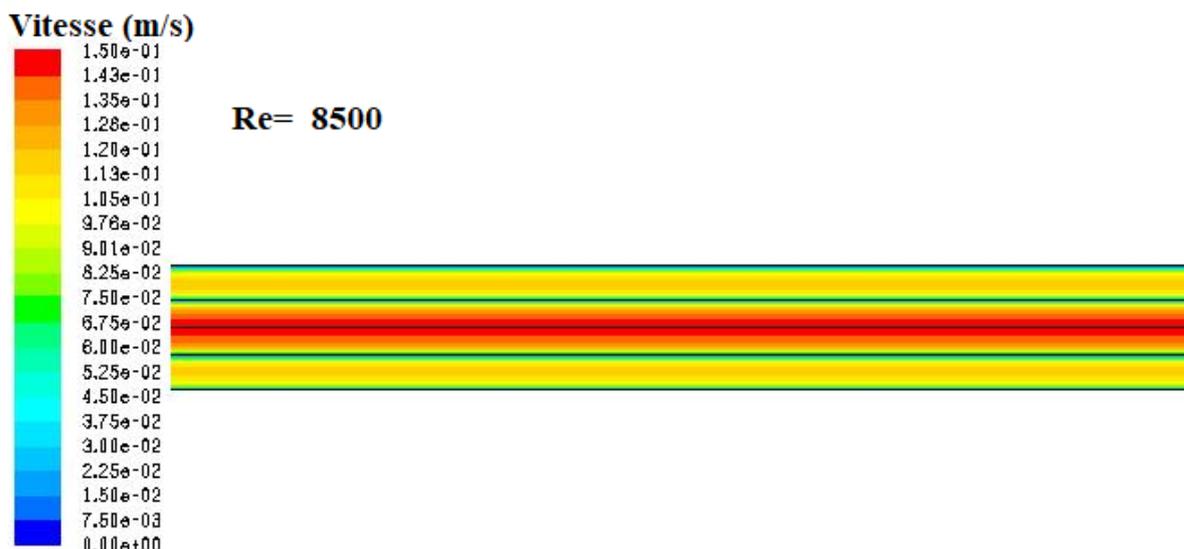


Figure IV.7 Profil de vitesse à la sortie de l'échangeur de chaleur pour le nanofluide $[[AL]]_2O_3/eau$ à 5% pour deux nombre de Reynolds, 5800 et 10000.

IV. 3. 2. Contour de vitesse

La figure IV.8 montre la distribution de la vitesse à travers la géométrie de l'échangeur de chaleur a ailette au niveau du plan de la section médiane pour le nanofluide AL_2O_3/eau à une concentration volumique de 5 % pour deux nombre de Reynolds 5800 et 10000 , la vitesse est maximale entre la paroi et l'extrémité d'ailette par ce que la section de passage est très petite, donc les ailettes diminuent la section de passage et augmentent la surface d'échange.



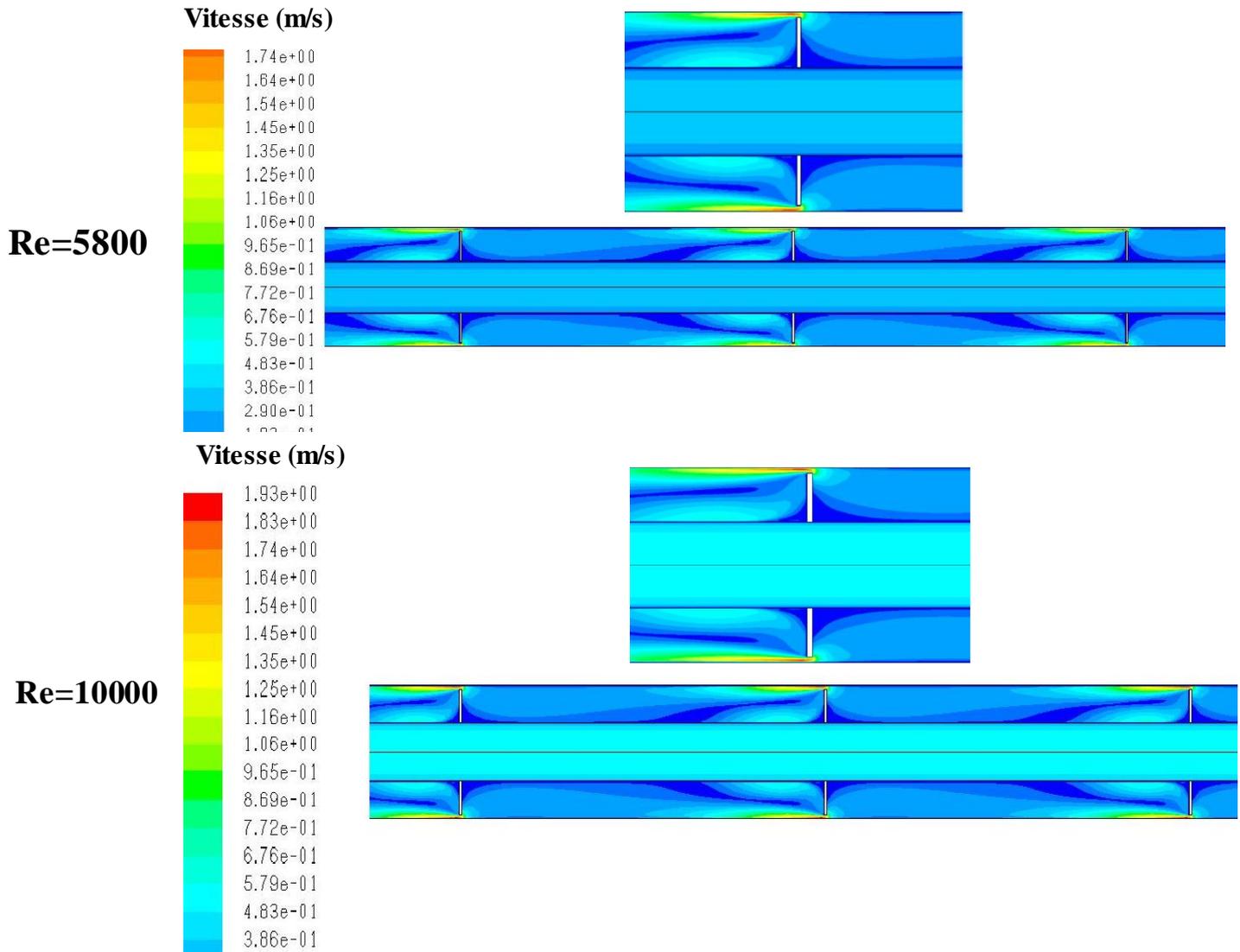


Figure IV.8 Contours de vitesse à travers la géométrie de l'échangeur de chaleur sans et avec ailette.

IV. 3. 3. Iso vitesse

La figure IV.9 présente les iso vitesses à travers la géométrie de l'échangeur de chaleur a ailette pour le nanofluide AL_2O_3 /eau à une concentration volumique de 5 % pour deux nombre de Reynolds 5800 et 10000.

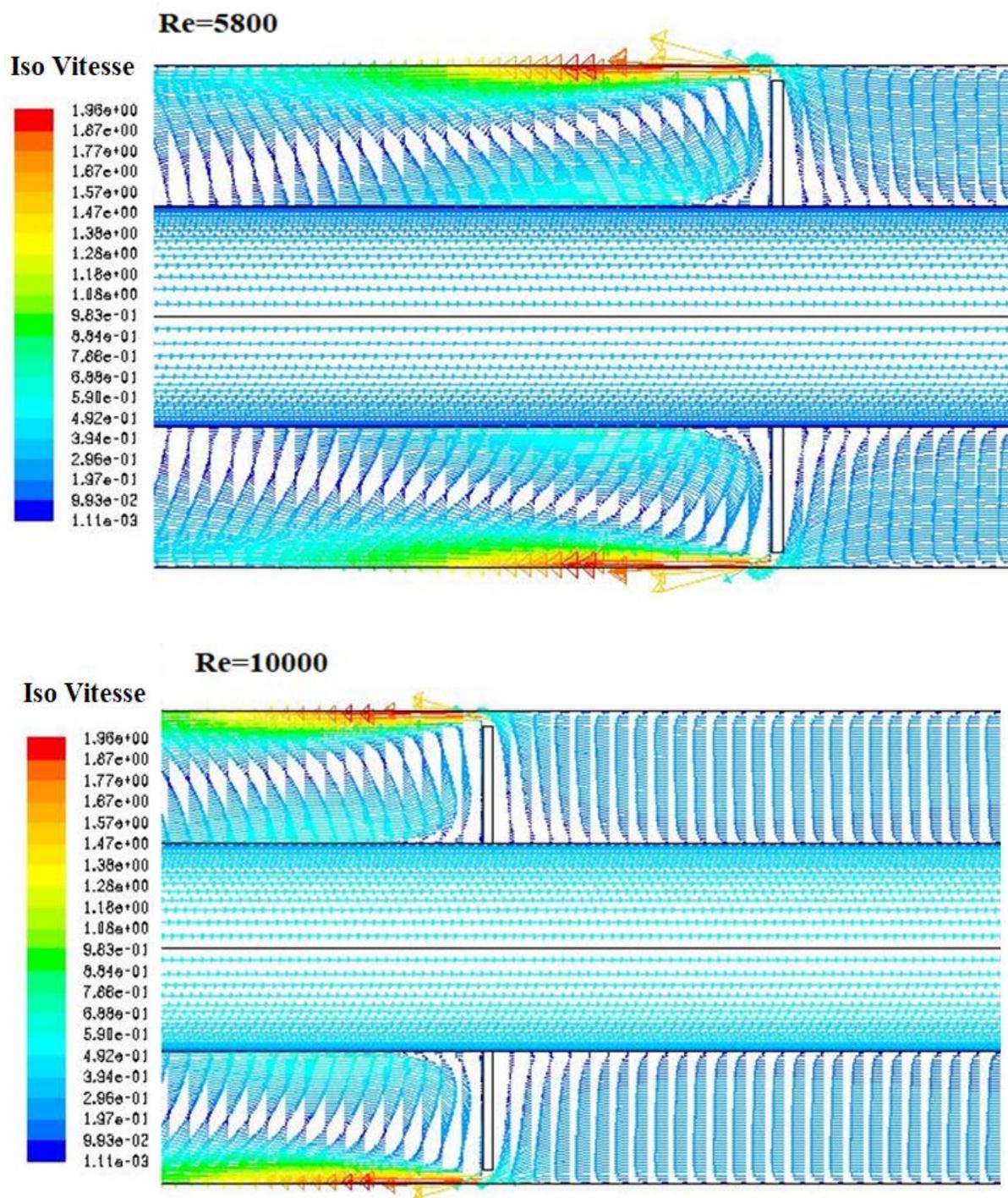


Figure IV.9 Iso vitesse pour le nanofluide $[\text{AL}]_2\text{O}_3/\text{eau}$ à une concentration volumique de 5% pour deux nombre de Reynolds 5800 et 10000.

IV. 3. 4. Ligne des courants

L'intensité des lignes de courants pour l'écoulement du fluide froid (nanofluid $\text{AL}_2\text{O}_3/\text{eau}$) au tube interne et le fluide chaud (eau) pour le tube externe à travers un échangeur de chaleur à

aillettes pour une concentration volumique de 5 % et deux nombre de Reynolds 5800 et 10000 sont présentées sur la figure IV.10.

En remarque que la vitesse est plus élevé à côté des parois du tube interne avec l'augmentation de nombre de Reynolds, par contre dans le tube externe la présente des ailettes crée des zones de turbulence par ce que les ailettes jouée le rôle d'un obstacle. On peut conclure à partir de ces figures, que l'intensité des lignes de courant est proportionnelle avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

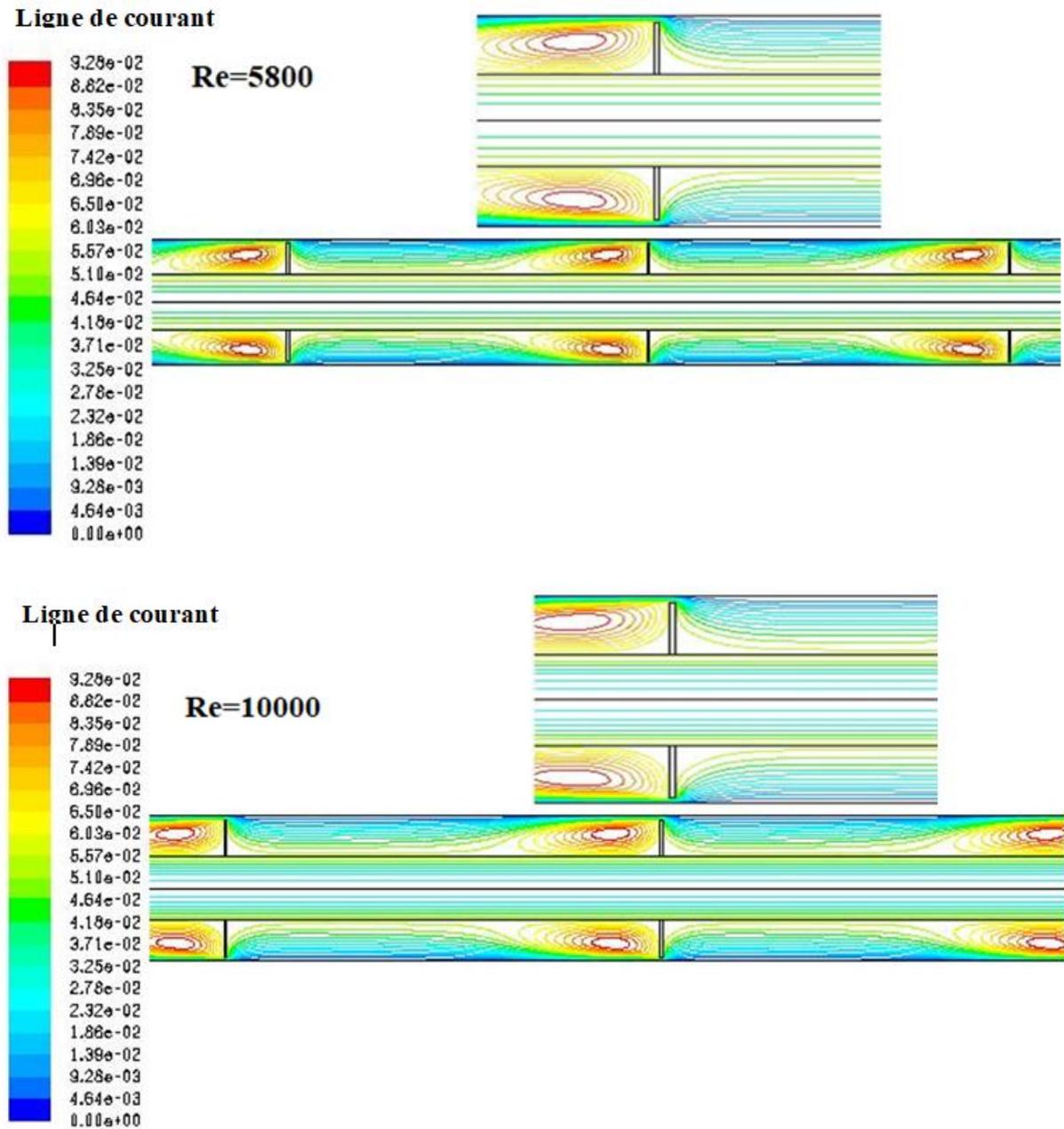
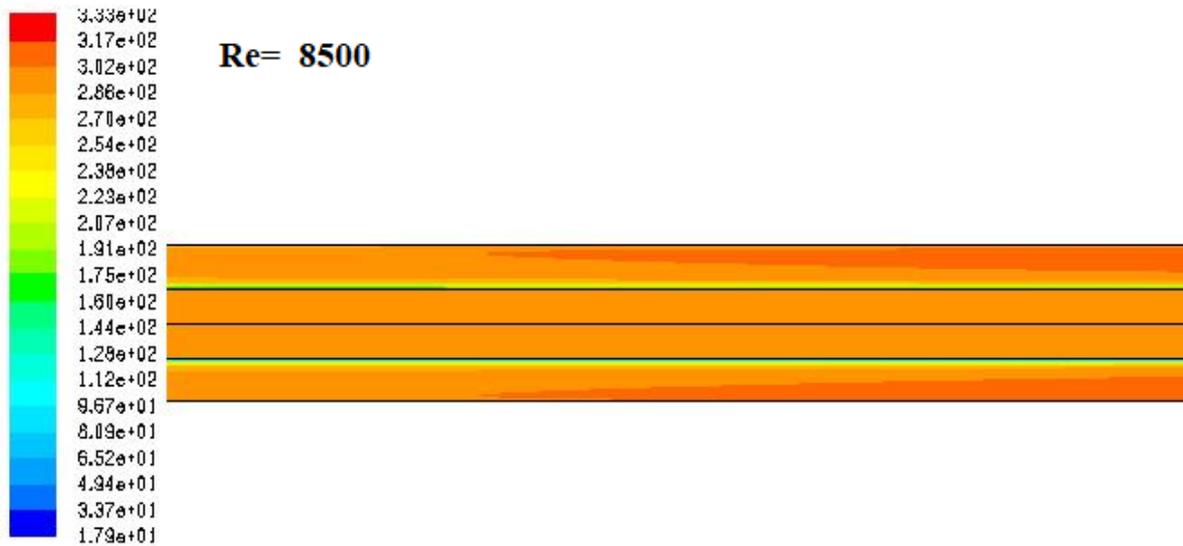


Figure IV.10 Lignes de courant pour le nanofluid $[[AL]]_2O_3$ /eau à une concentration volumique de 5% pour deux nombre de Reynolds 5800 et 10000.

IV. 3. 5. Contour de température

La figure IV.11 montre la distribution de la température à travers la géométrie de l'échangeur de chaleur sans et avec ailette pour le nanofluide AL_2O_3 /eau à une concentration volumique de 5% pour deux nombre de Reynolds 5800 et 10000. On voit clairement sur ces figures qu'une petite variation de température des fluides chauds et froids avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

Température(K)



Température (K)

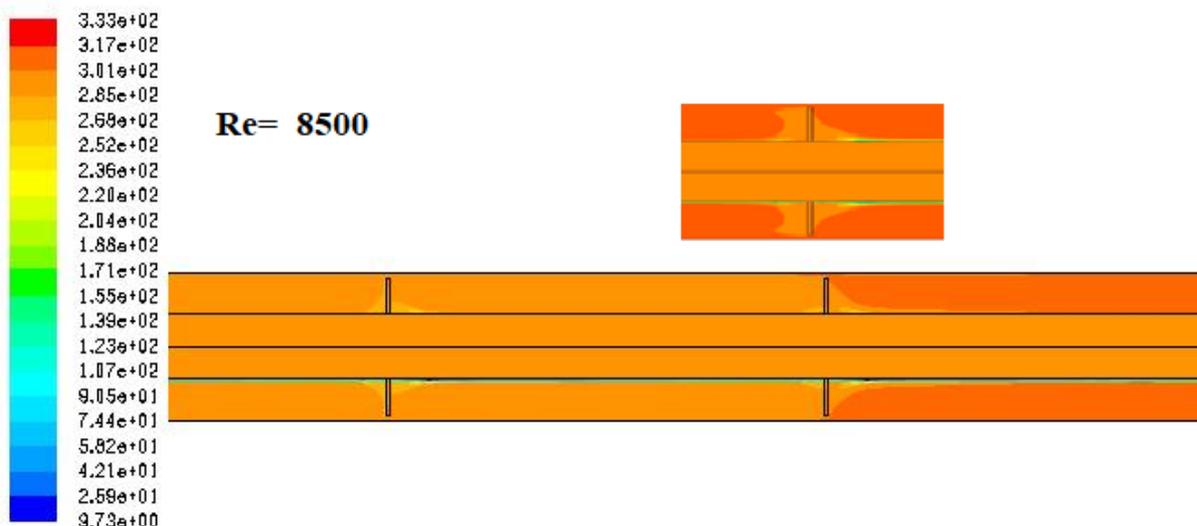


Figure IV.11 Contours de température à travers la géométrie de l'échangeur de chaleur sans et avec ailette.

IV. 3. 6. Variation du nombre de Nusselt

D'après la figure IV.12, on voit que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds et des concentrations volumiques de nanofluides. On constate que le taux de changement du transfert de chaleur par rapport à la concentration des nanofluides augmente avec une augmentation du nombre de Reynolds.

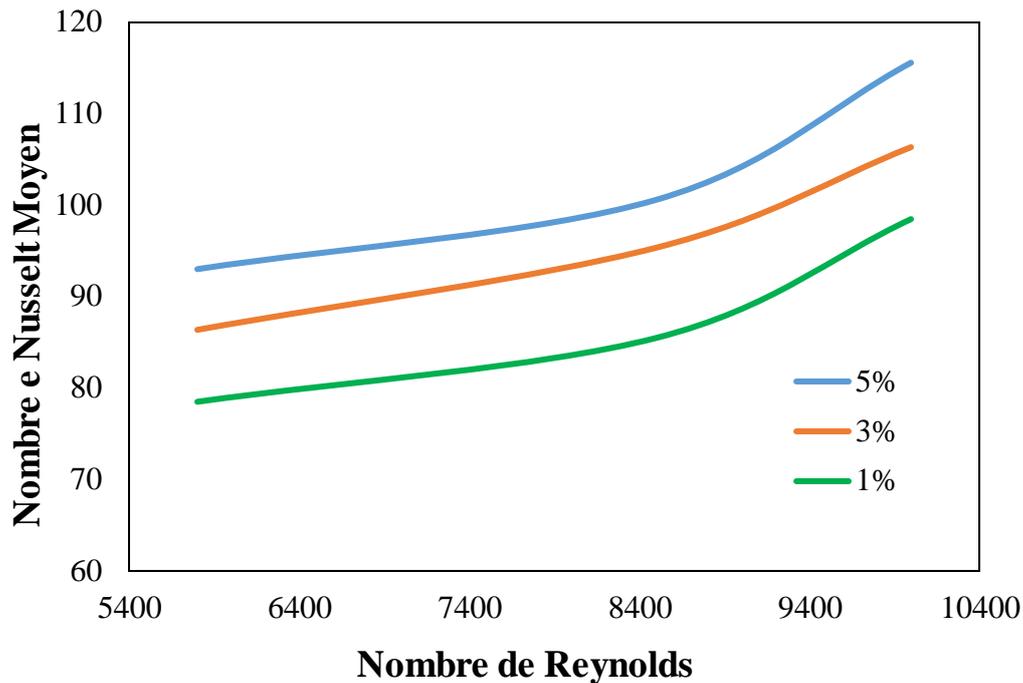


Figure IV.12 Variation du Nombre de Nusselt pour différents concentrations volumiques de nanoparticule Al₂O₃ en fonction du nombre de Reynolds.

IV. 3. 7. Critère d'évaluation des performances thermo-hydrauliques

La figure IV.13 montre la variation du critère d'évaluation des performances en fonction du nombre de Reynolds pour le fluide froid nanofluide Al₂O₃ /eau pour différentes concentrations (0, 1%, 3%,5%). Il ressort comme principal résultat que le meilleur transfert de chaleur est obtenu quand la concentration volumique est la plus élevée avec un petit diamètre de nanoparticules. En comparaison avec le fluide de base, il y a lieu de noter que les nanofluides améliorent toujours la qualité du transfert de chaleur et donc les performances thermo-hydrauliques du micro-dissipateur.

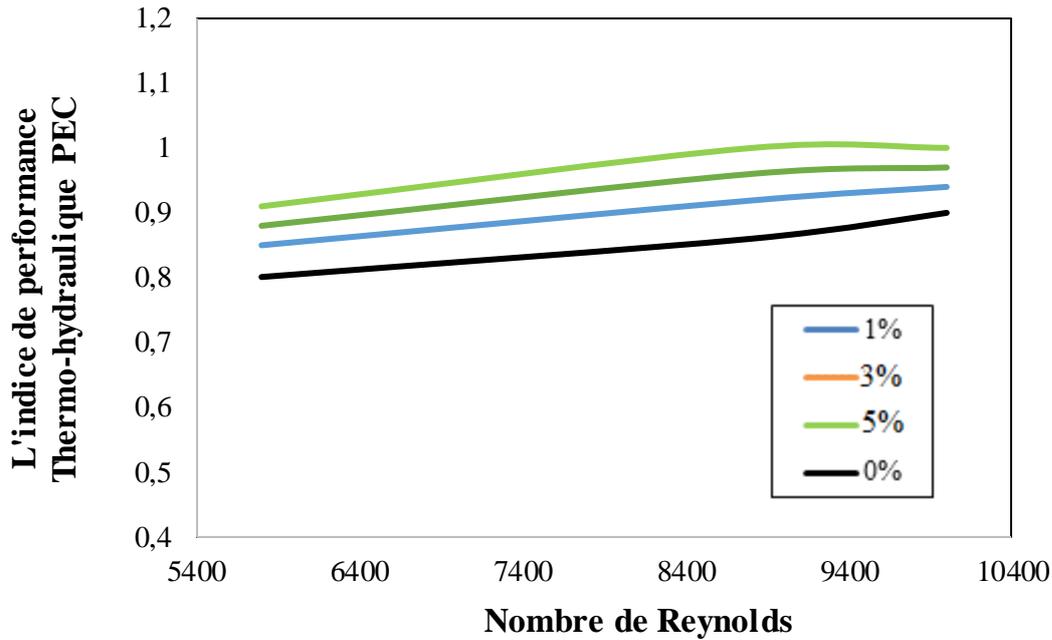


Figure IV.13 Critère d'évaluation des performances pour différents concentration volumique de nanoparticule Al₂O₃ en fonction du nombre de Reynolds.

IV. 4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons étudié l'effet de l'utilisation des nanofluides comme fluide caloporteur dans un échangeur de chaleur sans et avec ailette. Les conclusions suivantes ont été tirées :

L'ajout des nanoparticules a amélioré les performances thermiques de l'échangeur de chaleur, et cette amélioration dès à l'augmentation de nombre de Nusselt avec l'augmentation de la concentration.

Les indicateurs thermiques de l'échangeur de chaleur, tels que l'efficacité de l'échangeur de chaleur, le nombre de Nusselt, les unités de transfert de chaleur et la quantité de chaleur échangée, se sont améliorés lors de l'utilisation du nanofluide Al₂O₃/eau, par rapport au liquide de base.

Ainsi, on peut dire que le nanofluide utilisé est un bon moyen de transfert de chaleur et une alternative prometteuse aux liquides traditionnels actuellement utilisés dans diverses applications thermiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique des deux tubes d'échangeur de chaleur en présence des ailettes, en utilisant un type de nano fluide d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 /Eau et à 1%, 3% et 5% de concentration volumique sont fait pour plusieurs nombre de Reynolds.

La géométrie du modèle utilisé a été dessinée et maillée par le préprocesseur GAMBIT et la résolution et l'exploitation des résultats obtenus à partir de du solveur Ansys Fluent (CFD) qui se base sur la méthode des volumes finis. Les résultats sont montrés en termes de nombre de Nusselt, coefficient de convection, de facteur de frottement et de performance thermo-hydraulique. Les Résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- Pour chaque concentration volumique du nanofluide, le coefficient de transfert de chaleur est plus élevé que l'eau.

- L'étude conclue que l'utilisation de l'écoulement de nanofluide Al_2O_3 -eau dans un échangeur de chaleur a ailettes et un diamètre de nanoparticules de 10 nm et une concentration volumique de 5% donne la meilleure performance thermo-hydraulique pour $Re= 10000$

- Le coefficient de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds.
- l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules est très avantageuse à l'amélioration du nombre de Nusselt.
- l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules donne un excellent indice de performance thermo-hydraulique.
- Au même nombre de Reynolds, le coefficient de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de concentration volumique des nanofluides.

Bibliographie

- [1]. F. Mebarek-Oudina, Encyclopédie de l'énergie ; Article 055 : les échangeurs de chaleur.2014
- [2] site web: <https://www.choisir.com/energie/articles/120207/le-role-de-lechangeur-thermique> . date de vue: 03/2023
- [3] MOUNIR BENNAJAH et NAOIL CHAOUNI, Livre : Echangeur de chaleur, technologie, calcul et design. Auteur : (2009)
- [4]site web, <https://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/>
Date de vue :03/2023
- [5] Technique de l'ingénieur: échangeurs de chaleur ; Description des échangeurs. EnPDF
- [6] V. Wong Kaufui Omar De Leon Department of Mechanical Engineering, College of Design and Engineering, National University of Singapore, février 2023
- [7] site web <https://www.nouvenergie.fr/chauffage-central/echangeurs-de-chaleur/>
Date de vue :05/2023
- [8] Energy Modelling and Sustainable Energy Systems (METSAP) Research Lab., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
- [9] V. Wong Kaufui Omar De Leon Department of Mechanical Engineering, College of Design and Engineering, National University of Singapore, février 2023
- [10] YAHLA Mohamed Amine Etude numérique d'un échangeur de chaleur à tubes concentriques fonctionnant avec un nanofluide 28 septembre 2022
- [11] site web , <https://www.ets.ch/fr/index.php/produits/echangeurs-de-chaleur-a-ailettes>
date ;04/2023
- [12] C. C. Wang, Y. C. Hsieh, and Y. T. Lin, "Sensible heat and friction characteristics of plate finand- tube heat exchangers having plane fins," International Journal Of Refrigeration, vol. 19,(2019)
- [13] E. M. A. Mokheimer, "Performance of annular fins with different profiles subject to variable heat transfer coefficient," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 3631–3642,(2002)

Bibliographoe

- [14] J. Y. Jang and J. Y. Yang, "Experimental and 3D numerical analysis of the thermal-hydraulic characteristics of elliptic finned-tube heat exchangers," *Heat Transfer Engineering*, vol.19, pp. 55-67, 1998
- [15] H. Kenichi, M. Ryo, K. Tetsuya, and M. Takahiro, "Fin efficiency of serrated fins," *Heat Transfer Engineering*, vol. 23, pp. 6-14, (2010.)
- [16] Y. Ma, Y. Yuan, Y. Liu, X. Hu, and Y. Huang, "Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in serrated finned tube banks with staggered layouts," *Applied Thermal Engineering*, vol. 37, pp. 314-323, 2012.
- [17] Department of Mechanical Engineering, College of Design and Engineering, National University of Singapore, (fevrier 2023)
- [18] Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China
- [19] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran b Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, P.O. Box 484, Babol, Iran 2022
- [20] Lee Kong Chian Engineering Discipline, School of Engineering, Monash University, 47500, Bandar Sunway, Malaysia (2013)
- [21] Kermanshah, Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, , Iran (2017)
- [22] pdf ,International Communications in Heat and Mass Transfer 2022
- [24] Islamic Azad Department of Mechatronics Engineering, College of Engineering, Kermanshah Science and Research Branch, University, Kermanshah, Iran
Année 2015.
- [25] C Kalaniketan A Jabalpur Engineering College, Jabalpur , India B Energy Centre, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal 462 003, India
Polytechnic College , India. (2022)
- [26] Mme mostefaoui amina SPIM - Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques– doctorat de mécanique énergétique – Analyse thermo énergétique de la convection therique d'un écoulement de nanofluide dans des micro-canaux ondulés

- [27] Lu S, Lin H. Effective conductivity of composites containing aligned spherical inclusions of finite conductivity. *Journal of Applied Physics*, (1996):
- [28] W. Yu, S.U.S. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *J. nanoparticle Res*, (2003).
- [29] P. Bhattacharya, S.K. Saha, A. Yadav, P.E. Phelan, R.S. Prasher. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. *Journal Applied Physics*, (2004).
- [30] Q.Z. Xue. Model for thermal conductivity of carbon nano tube-based composites. *Physica B: Condensed Matter*, (2005).
- [31] H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solution. *Journal of Chemical Physics*, (1952).
- [32] J. Koo, C. Kleinstreuer, Laminar nanofluid flow in micro heat-sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (2005).
- [33] D.P. Kulkarni, D.K. Das, G. Chukwu, Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (Nanofluid). *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, (2006).
- [34] C.T. Nguyen, F. Desgranges, G. Roy, N. Galanis, N. Mare, S. Boucher, et al, Temperature and particle-size dependent viscosity data for water based nanofluids– hysteresis phenomenon, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, (2007).
- [35] J.C.A. Maxwell, *Treatise on electricity and magnetism*. Oxford, UK: Clarendon Press, (1881).
- [36] R.L. Hamilton, O.K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *I&EC Fundamentals*, (1962).
- [37] W. Yu, S.U.S. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *J. nanoparticle Res*, (2003)
- [38] D.A.G. Bruggeman. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen, I—Dielektrizitätskonstanten und leitfähigkeiten der mischkörper aus isotropen substanzen. *Annalender Physik, Leipzig*, (1935).

- [39] Lu S, Lin H. Effective conductivity of composites containing ligned spherical inclusions of finite conductivity. *Journal of Applied Physics*, (1996).
- [40] C.H. Li, G.P. Peterson, Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *Journal of Applied Physics*, (2006).
- [41] E.V. Timofeeva, A.N. Gavrilov, J.M. McCloskey, Y.V. Tolmachev, Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. *Physical Review*, (2007).
- [42] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Measurement of temperature dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (2009).
- [43] Y. Xuan and W. Roetzel. Conception for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (2000).
- [44] H. Sakuma, K. Ishii. Gas flow sputtering: Versatile process for the growth of nanopillars, nanoparticles, and epitaxial thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (2009).
- [45] V. Wong Kaufui Omar De Leon. Applications of Nanofluids: Current and Future. Mechanical and Aerospace Engineering Department, University of Miami. (2015).
- [46] P. Bhattacharya, S.K. Saha, A. Yadav, P.E. Phelan, R.S. Prasher. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. *Journal Applied Physics*, 95(2004): 6492-4.
- [47] Q.Z. Xue. Model for thermal conductivity of carbon nano tube-based composites. *Physica B: Condensed Matter*, 368 (2005).
- [48] E.V. Timofeeva, A.N. Gavrilov, J.M. McCloskey, Y.V. Tolmachev, Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. *Physical Review*, 76 (2007).
- [49] Sarmad A. Abdal Hussein , Experimental Investigation of Double Pipe Heat Exchanger by using Semi Circular Disc Baffles , *Computer Applications* 2015