

Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des hydrocarbures de l'énergie
Renouvelable et des sciences de la terre
et de l'univers
Département des énergies renouvelables



جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية المحروقات، الطاقات
المتجددة وعلوم الارض
والكون
قسم الطاقات المتجددة

MÉMOIRE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER ACADÉMIQUE
LMD EN : Énergies Renouvelables en Mécanique
Filière : GÉNIE MÉCANIQUE

**Simulation de l'Effet des Nano-Fluides
sur les Performances d'un Échangeur
Thermique à Double Tube en U**

Réalisé par :

M^{elle} . Nour Elhouda ALMI

M^{elle} . Lamisse BOUDRIOUA

Encadré par :

Dr. Amar ROUAG

Soutenu le 13 jun 2022, Devant le jury composé de :

Med Hafd BERREBEUH	MCA	Université Kasdi MERBAH	Président
Mhamed DERNOUNI	MCA	Université Kasdi MERBAH	Examinateur
Amar ROUAG	MCA	Université Kasdi MERBAH	Encadreur
Abdessamai HADJADJ	MCB	Université Kasdi MERBAH	Co-Encadreur

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur :pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire et à notre encadreur Dr : Rouag amar pour ses conseils et l'aide qu'il nous a apportés.

Nous adressons également nos sincères remerciements particulier au Dr : Hadjadj Abdessamia Co-encadreur de nous avoir orienté, aidé et conseillé. Pour le temps qu'il a consacré à nous apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche.

Nous envoyons également nos remerciements les plus dévoués au membre de jury : Mr Berrebeuh et Mr Dernouni pour avoir gentiment accepté de juger notre travail et qui nous avons honoré avec leurs présence

Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de nos familles, surtout nos parents qui nous ont toujours encouragé moralement et matériellement et a qui on tient à les remercier.

Merci!

Pour el houda Almi & Lamisse Boudrioua



Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma chère mère, la prunelle de mes yeux Ta présence à mes coté a toujours été ma source de force, ton affection me couvre et ta bienveillance me guide quoi que je fasse ou je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit.

A mon cher papa Tu as toujours été à mes coté pour m'encourager et me soutenir, que ce travail traduit mon affection et ma gratitude

A ma très chère sœur manel pour son soutient et ses conseils et à ma petite sœur hadjer et mon frère houssem

A mon très cher gand-père Ibriz Ahcen pour son encouragement durant toutes mes années d'études que dieu le protège

A mon fiancé qui m'as aidé et me supporter dans les moments difficiles

A Dr Hadjadj abdessamia pour pour tout ce qui nous a donné durant toute cette année, pou son aide et sa patience

A tous ceux qui m'ont aidé et ceux qui ont partagé avec moi les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail

Merci !

Almi Pour el houda



Dédicace



Je dédie ce travail :

A ma chère mère La lumière de mes jours qui n'as jamais cessé de me supporter, tu es ma source de force merci pour tout ce que tu as fait pour moi.

A mon cher père Qui a été toujours présent à mes coté

A mon frère zakaria et ma sœur douaa pour leurs soutiens morale et leurs conseils tout au long de mes études.

A ma tante Habiba ma 2ème mère que dieu la garde pour moi

A mon très cher mari Djellal Omar qui m'as aidé et supporté dans les moments difficiles

A ma belle famille qui m'ont toujours encouragé.

A Dr Hadjadj abdessamia pour pour tout ce qui nous a donné durant toute cette année, pou son aide et sa patience

A tous ceux qui m'ont aidé - de près ou de loin - et ceux qui ont partagé avec moi les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail et qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

Merci !

Boudrioua Lamisse



Sommaire

Liste Des Tableaux	V
Liste Des Figures	VI
Abréviations et symboles	VIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Introduction générale	1
I Généralité sur les échanges thermiques	3
I.1 Introduction	3
I.2 Transfert de chaleur	4
I.2.1 Conduction	4
I.2.2 convection	5
I.3 Paramètres sans dimension :	6
I.3.1 Le nombre de Nusselt (Nu)	6
I.3.2 Le nombre de Prandtl (Pr)	7
I.3.3 Le nombre de Grashof (Gr)	7
I.3.4 Le nombre de Reynolds (Re)	7

SOMMAIRE

I.4	Échangeur de chaleur	8
I.4.1	Construction d'un échangeur de chaleur	9
I.4.2	Types de configuration de chemin d'écoulement à travers l'échangeur de chaleur	9
I.4.3	Classification selon les processus de transfert	11
I.4.3.1	Échangeur de chaleur à contact indirect	11
I.4.3.2	Échangeur de chaleur a contact direct	11
I.4.4	Classification selon la phase des fluides	11
I.4.4.1	Gaz-Liquide	11
I.4.4.2	Liquide-Liquide	12
I.4.4.3	Gaz-Gaz	12
I.4.5	Les types des échangeurs de chaleur	12
I.5	Nanoparticules	13
I.5.1	Les différents types de nanoparticules	13
I.5.2	les sources de nanoparticules	14
I.5.3	Applications de nanoparticules	16
I.6	Nanofluides	16
I.6.1	Préparation de nanofluides	17
I.6.2	Propriétés thermo-physiques des nanofluides	18
I.6.3	Domaine d'application de nanofluides	20
I.7	conclusion	21
II	Revue bibliographique	22
II.1	introduction	22

SOMMAIRE

II.2 l'état de l'art	22
II.3 Recherche expérimentale et numérique	25
II.4 conclusion	33
III présentation du problème physique	34
III.1 Introduction	34
III.1.1 Les étapes pour définir le problème CFD	35
III.2 la géométrie et maillage du problème étudié	35
III.2.1 la géométrie du problème	35
III.2.2 présentation des conditions aux limites	36
III.2.3 Etude de maillage	37
III.3 Formulation mathématique du problème	38
III.3.1 Hypothèses simplificatrices	38
III.3.2 Equation de continuité	39
III.3.3 Equation de quantité de mouvement	39
III.3.4 Equation de l'énergie	39
III.4 conclusion	40
IV Résultats et discussions	41
IV.1 Introduction	41
IV.2 Validation des résultats numériques avec les corrélations	41
IV.3 Cas du fluide sans nanoparticules :	43
IV.3.1 Le contour des températures	43
IV.3.2 Les contours des vitesses de leau distillée	44
IV.4 Cas du fluide avec nanoparticule Al_2O_3	45

SOMMAIRE

IV.4.1	Leffet de la fraction volumique 0.1%	45
IV.4.1.1	Les contours de la température	45
IV.4.2	Leffet de la fraction volumique 0.3%	46
IV.4.2.1	Contour de la température	46
	CONCLUSION GÉNÉRALE	49
	Bibliographie	I

Liste Des Tableaux

III.1 Paramètres géométriques et de fonctionnement et variables étudiées.	36
III.2 Conditions aux limites imposées aux extrémités de léchangeur de chaleur .	36
III.3 Propriétés thermo-physiques des fluides de travail	40

Liste Des Figures

I.1	Transfert thermique par conduction	5
I.2	Tansfert thermique par convection	6
I.3	les types de confugiration de chemin ecoulement a travers lechangeur de chaleur	10
I.4	Les types déchangeurs de chaleur	13
I.5	Classification de nanoparticules	14
I.6	Les methodes de preparation des nanofluides	18
I.7	proprietes thermo- physiques de nanofluides	19
I.8	Les differentes conductivites thermiques de nanoparticules	19
II.1	Visualisation en réseau des mots-clés auteur sur « nanofluide et échangeur de chaleur» élaboré avec VOSviewer	24
II.2	Cooccurrence et liens du mot clé «analyse numérique».les termes les plus utilisés sont associés au diamètre des taches(noeuds) et a la taille de la police	25
III.1	la géomertie de problème	36
III.2	maillage de léchangeur de chaleur	37
III.3	Stabilité du maillage en fonction du nombre de nuds	38

LISTE DES FIGURES

IV.1 Lestimation du nombre de Nusselt de fluide monophasé	42
IV.2 Contour de température $(0,134,0,178)kg.s^{-1}$	43
IV.3 Contour de température en $(0.2,0,267)kg.s^{-1}$	44
IV.4 contour de vitesse dans las quatres débits	45
IV.5 contour de température en 0.1%	46
IV.6 conteur de la température 0.3%	47

Abréviations et symboles

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le transfert de chaleur est un processus qui a une grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies. Il se manifeste sous diverses formes telles que la conduction et la convection. L'une des applications les plus utiles de ces formes de transfert est l'échangeur de chaleur. Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs de transfert de chaleur entre deux ou plusieurs fluides à des températures différentes. Les recherches ont permis au long des années d'améliorer la conductivité thermique des fluides purs et le transfert d'énergie thermique dans les échangeurs de chaleur. Ces améliorations sont faites par plusieurs méthodes parmi lesquelles le ajout des nanoparticules. Ces dernières années un nouveau type de fluide est en train d'émerger c'est le nanofluide. Le nanofluide est un fluide caloporteur tel que l'eau, l'huile à qui l'on rajoute des nanoparticules de métal (Al, Cu, Ag, Au, etc.) ou d'oxyde métallique ou non métallique (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2), ou autres formes allotropiques du carbone, ces nanofluides augmentent le transfert de chaleur par rapport au cas des fluides conventionnels. A cet égard, l'étude de transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur utilisant des nanofluides est devenue un sujet de grand intérêt en raison des progrès dans l'industrie. Donc l'objectif principal de cette étude est l'amélioration de la conductivité thermique et le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur, en utilisant des nanofluides (eau+CuO, eau+ Al_2O_3) dans un échangeur de chaleur

INTRODUCTION GÉNÉRALE

double tube en U (contre-courant). Pour atteindre cet objectif, le présent mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre donne quelques généralités sur les échangeurs de chaleur et les nanofluides

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation d'une revue bibliographique des principaux travaux publiés dans le domaine des échanges thermiques dans les échangeurs par nanofluides caloporteurs.

Dans le troisième chapitre, nous avons posé le modèle physique de la géométrie étudiée. Ainsi, le problème physique est considéré sous forme d'équations mathématiques utilisant dans la configuration en question par logiciel de simulation (Ansys fluent version R21) et la méthode de la résolution numérique par utilisation de l'Ansys.

Le quatrième chapitre interprète les résultats de notre étude numérique.

Chapitre I

Généralité sur les échanges thermiques

I.1 Introduction

Le transfert de chaleur est un processus d'une grande importance dans le domaine de l'industrie et des technologies, Ce phénomène au sein des fluides est utilisé dans le chauffage ou refroidissement et aussi dans le transport. Les fluides de processus conventionnels ont une faible conductivité thermique cela limite le développement de l'efficacité des échangeurs de chaleur, après plusieurs recherches et études ils ont trouvé que l'ajout de petites particules (nanoparticules) dans le fluide améliore la conductivité thermique. À cet égard, l'amélioration des propriétés thermiques des fluides caloporteurs est devenue l'une des méthodes les plus importantes permettant d'augmenter le transfert de chaleur.

I.2 Transfert de chaleur

La chaleur est une forme d'énergie qui se déplace toujours de la partie chaude à la partie froide d'une substance ou d'un objet à haute température à un autre objet à plus basse température. Les corps n'ont pas besoin d'être en contact mais il devrait y avoir une différence de température. Dans certains cas, la quantité de chaleur transférée peut être déterminée simplement en appliquant des relations fondamentales ou les lois de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Dans d'autres cas, où les mécanismes de transfert de chaleur ne sont pas complètement connus, des méthodes de mesure ou des méthodes expérimentales basées sur des expériences sont appliquées. La chaleur peut être transférée de trois manières différentes, à savoir la conduction thermique, la convection et le rayonnement thermique [1]

I.2.1 Conduction

La conduction est le transfert de chaleur d'une partie d'un corps à une température plus élevée à une autre partie du même corps à une température plus basse, ou d'un corps à une température plus élevée à un autre corps en contact physique avec lui à une température plus basse [2] La diffusion thermique à travers les solides est régie par la loi de Fourier, qui sous forme unidimensionnelle s'exprime par

$$Q = -gradT \tag{I.1}$$

Le gradient de température (cř/m) est représenté par grad (T). Alternative-

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

ment, sous une forme asymétrique : avec l'ajout de

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{-k \cdot s}{dt} dx \quad (\text{I.2})$$

- ϕ : Flux de chaleur transmis par conduction W ;
- κ : Conductivité thermique du milieu $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$;
- S : Aire de la section de passage du flux de chaleur m^2 ;
- X : Variable despace dans la direction du flux m .

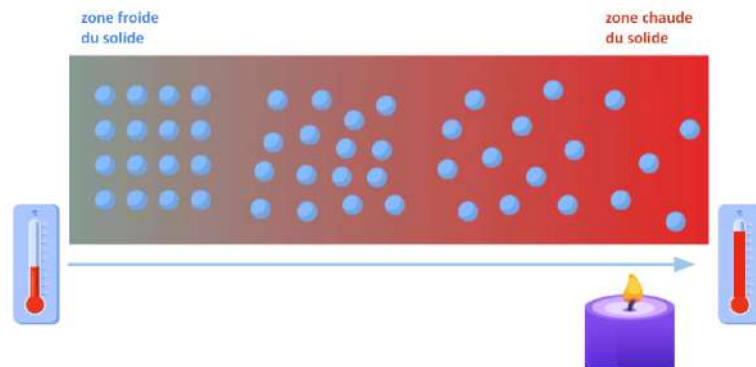


FIGURE I.1 : Transfert thermique par conduction

I.2.2 convection

La convection, parfois identifiée comme un mode distinct de transfert de chaleur, se rapporte au transfert de la chaleur d'une surface de délimitation à un fluide en mouvement, ou au transfert de chaleur à travers un plan d'écoulement à l'intérieur du fluide qui s'écoule. [2] Le flux de chaleur transmis par convection entre une paroi de température T_1 et un fluide de température T_2 s'écrit (loi de Newton)

$$\phi = hS(T_2 - T_1) \quad (\text{I.3})$$

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

- h : Coefficient d'échange par convection thermique ($W/m^2.k$) ;
- T_1 : La température de la paroi en (K) ;
- T_2 : La température du fluide en (K) ;
- S : La surface de contact avec le fluide en (m^2).

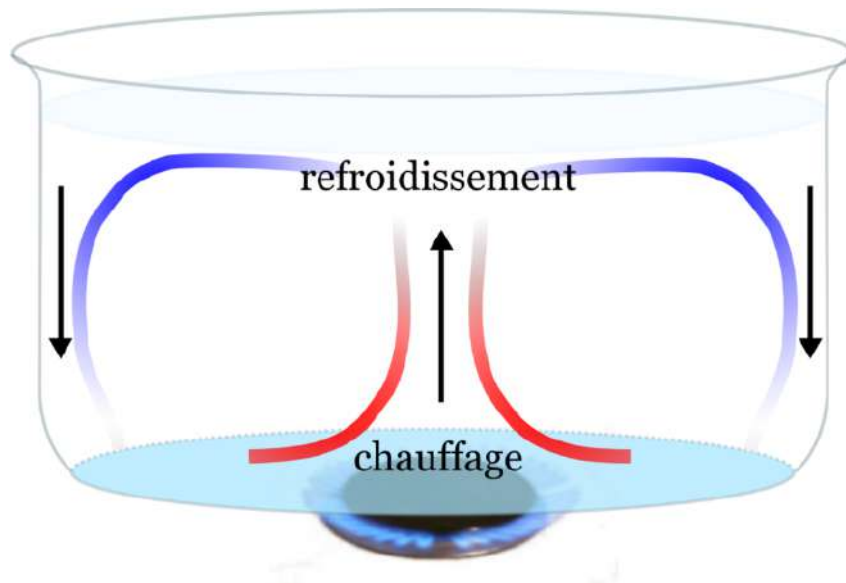


FIGURE I.2 : Transfert thermique par convection

I.3 Paramètres sans dimension :

Quantités sans dimension courantes utilisées dans la corrélation des données de transfert de chaleur sont :

I.3.1 Le nombre de Nusselt (Nu)

Qui relie le coefficient de transfert thermique convectif à la conduction dans le fluide

$$Nu = \frac{he}{\lambda} \quad (I.4)$$

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

- λ : Conductivité thermique en (W/m.K) ;
- e : Lépaisseur de la couche de transfert en (m).

I.3.2 Le nombre de Prandtl (Pr)

Qui est un paramètre de propriété fluide :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (\text{I.5})$$

- λ : Conductivité thermique en (W/m.K) ;
- C_p : chaleur spécifique du fluide en (J/kg.K).

I.3.3 Le nombre de Grashof (Gr)

Qui rend compte de l'effet de flottabilité :

$$Gr = \frac{\rho g \beta (T_e - T_s) e^3}{\mu^2} \quad (\text{I.6})$$

- β : Coefficient de dilatation de fluide en μ^{-1} pour les gaz parfaits, et il est équivalent à l'inverse de la température absolue : $\beta = \frac{1}{T}$
- e : épaisseur caractéristique de la cellule

I.3.4 Le nombre de Reynolds (Re)

Qui relie la quantité de mouvement dans le flux à la force visqueuse dissipation :

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (\text{I.7})$$

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

- $Re > 2300$ le régime est turbulent ;
- $Re < 2300$ le régime est laminaire ;
- $Re = 2300$ le régime est critique.

Où :

- ρ : la masse volumique du fluide en $kg.m^3$;
- U : La vitesse cinématique du fluide en $m.s^{-1}$
- D : Diamètre de la conduite (m)
- μ : La viscosité dynamique du fluide (kg/m.s)

Toutes les propriétés thermiques des groupes sans dimension précédents s'appliquent au fluide à sa Température

I.4 Échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est un dispositif de transfert de chaleur qui échange de la chaleur entre deux ou plusieurs fluides de traitement. Les échangeurs de chaleur ont de nombreuses applications industrielles et domestiques. De nombreux types d'échangeurs de chaleur ont été développés pour être utilisés dans les centrales à vapeur, les usines de traitement chimique, les systèmes de chauffage et de climatisation des bâtiments, les systèmes d'alimentation électrique des transports et les unités de réfrigération. La conception même des échangeurs de chaleur est un problème compliqué. Cela implique plus que la seule analyse de transfert de chaleur. Le coût de fabrication et d'installation, le poids et la taille jouent un rôle important dans la sélection de la conception finale du point de vue du coût total de possession. Dans de nombreux cas, bien que le coût soit une considération

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

importante, la taille et l'encombrement ont souvent tendance à être les facteurs dominants dans le choix d'une conception. [3]

I.4.1 Construction d'un échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est constitué d'éléments d'échange de chaleur tels qu'un noyau ou une matrice contenant la surface de transfert de chaleur, et d'éléments de distribution de fluide tels que des collecteurs ou des réservoirs, des buses ou des tuyaux d'entrée et de sortie, etc. Habituellement, il n'y a pas de pièces mobiles dans l'échangeur de chaleur ; Cependant, il existe des exceptions, comme un régénérateur rotatif dans lequel la matrice est entraînée pour tourner à une certaine vitesse de conception. La surface de transfert de chaleur est en contact direct avec des fluides à travers lesquels la chaleur est transférée par conduction. La partie de la surface qui sépare les fluides est appelée surface de contact primaire ou direct. [4]

I.4.2 Types de configuration de chemin d'écoulement à travers l'échangeur de chaleur

■ Flux croisé multi-passes :

Dans les unités à flux croisés à plusieurs passages, un flux de fluide fait la navette d'avant en arrière sur le trajet d'écoulement de l'autre flux de fluide, donnant généralement une approximation du flux croisé au contre-courant.

■ Flux croisé à passage unique :

Dans les unités à flux croisés à passage unique, un fluide se déplace à travers la matrice de transfert de chaleur perpendiculairement au trajet d'écoulement de l'autre

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

fluide.

■ Contre-courant :

Dans les unités à contre-courant ou à contre-courant, les deux courants se déplacent dans des directions opposées.

■ Flux parallèle :

Dans les unités à écoulement simultané ou parallèle, les deux flux de fluide entrent ensemble à une extrémité, s'écoulent dans la même direction et partent ensemble à l'autre extrémité. [3]

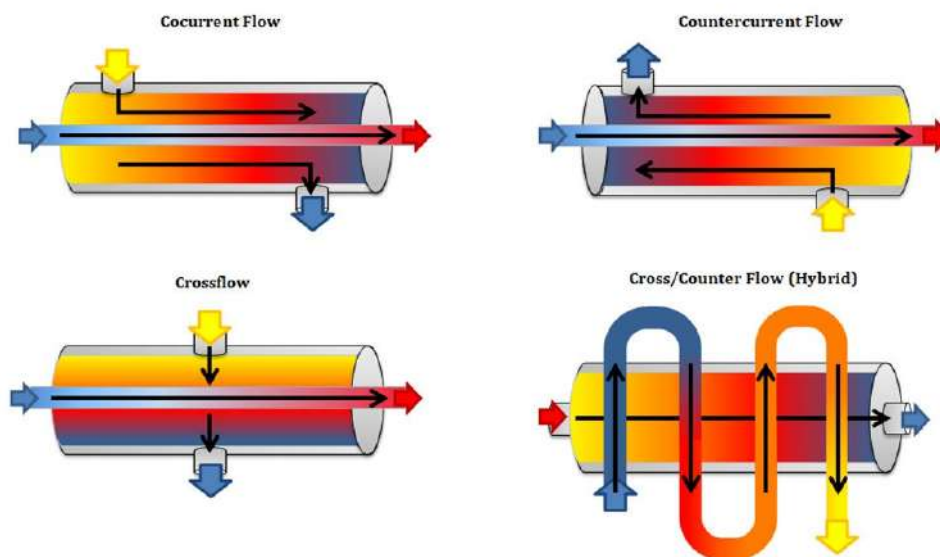


FIGURE I.3 : les types de configuration de chemin écoulement à travers le changeur de chaleur

I.4.3 Classification selon les processus de transfert

Les échangeurs de chaleur sont classés selon les processus de transfert en types de contact indirect et direct.

I.4.3.1 Échangeur de chaleur à contact indirect

Dans un échangeur de chaleur à contact indirect, les courants de fluide restent séparés et la chaleur est transférée en continu à travers une paroi de séparation imperméable ou dans et hors d'une paroi de manière transitoire. Ainsi, idéalement, il n'y a pas de contact direct entre les fluides en interaction thermique [3]

I.4.3.2 Échangeur de chaleur a contact direct

Dans ce type, la chaleur est transférée en continu du fluide chaud au fluide froid à travers une paroi de séparation. Bien qu'un écoulement simultané de deux fluides (ou plus) soit nécessaire dans l'échangeur, il n'y a pas de mélange direct des deux fluides (ou plus) car chaque fluide s'écoule dans des passages de fluide séparés. En général, il n'y a pas de pièces mobiles dans la plupart de ces échangeurs de chaleur. Ce type d'échangeur est désigné comme échangeur de chaleur récupérateur ou simplement comme récupérateur [3]

I.4.4 Classification selon la phase des fluides

I.4.4.1 Gaz-Liquide

Les échangeurs de chaleur gaz-liquide sont principalement des échangeurs de chaleur compacts de type tube à ailettes avec le liquide côté tube. Le radiateur est de loin

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

le principal type d'échangeur de chaleur liquide-gaz, refroidissant généralement l'eau de la chemise du moteur par air [4]

I.4.4.2 Liquide-Liquide

La plupart des échangeurs de chaleur liquide-liquide sont de type calandre et tube, et des échangeurs de chaleur à plaques dans une moindre mesure. Les deux fluides sont pompés à travers l'échangeur, de sorte que le principal mode de transfert de chaleur est la convection forcée [4]

I.4.4.3 Gaz-Gaz

Ce type d'échangeur se trouve dans les récupérateurs de préchauffage air-gaz d'échappement, les régénérateurs rotatifs, les refroidisseurs intermédiaires et/ou les refroidisseurs d'admission pour refroidir l'air d'admission des moteurs suralimentés de certains groupes motopropulseurs diesel terrestres et locomotives diesel, et les systèmes cryogéniques de liquéfaction des gaz. Dans de nombreux cas, un gaz est comprimé de sorte que la densité est élevée tandis que l'autre est à basse pression et à basse densité [4]

I.4.5 Les types des échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur se trouvent sous plusieurs types sont :

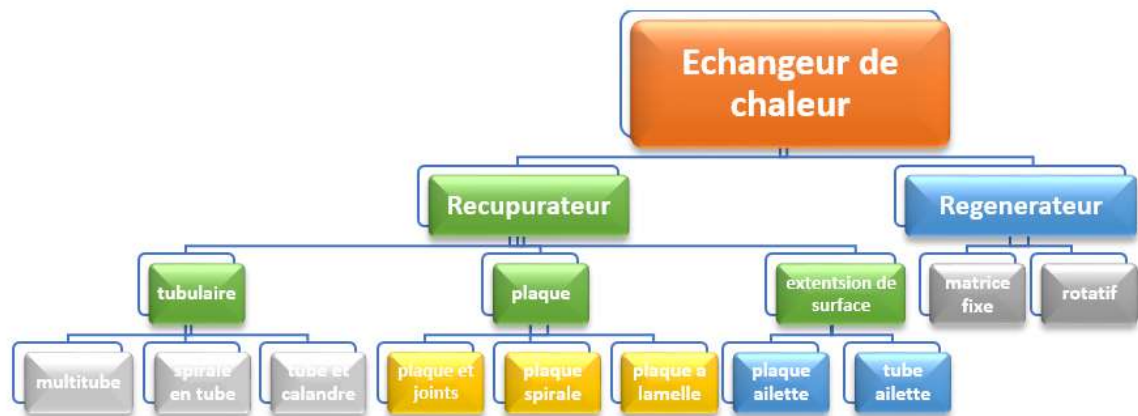


FIGURE I.4 : Les types d'échangeurs de chaleur

I.5 Nanoparticules

Une nanoparticule est définie comme étant une particule dont au moins une direction de l'espace a une dimension inférieure à 100 nm . La particularité d'une nanoparticule réside dans le fait que la majorité des atomes qui la constitue se trouve en surface. Les nanoparticules sont de forme, de taille et de structure différentes. Elles sont soit sphériques, cylindriques, tubulaires, coniques, à noyau creux, en spirale, plats, etc. ou irréguliers et dont la taille varie de 1 nm à 100 nm . La surface peut être uniforme ou irrégulière avec des variations de surface. [5]

I.5.1 Les différents types de nanoparticules

Les types de nanoparticules sont présentés au tableau ci-dessous :

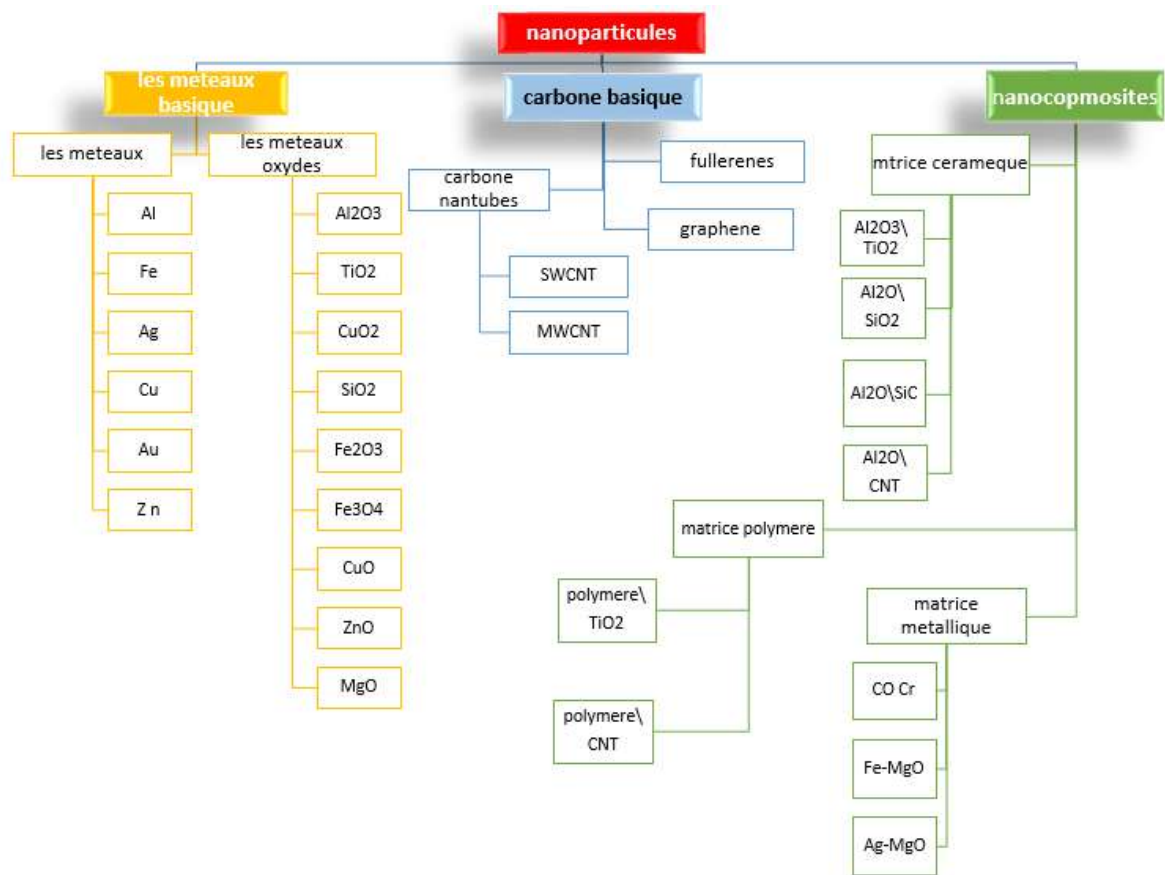


FIGURE I.5 : Classification de nanoparticules

I.5.2 les sources de nanoparticules

Les nanoparticules naturelles : Un grand nombre de nanoparticules d'origine naturelle sont présentes dans l'environnement (poussières émises par combustion ou par les volcans, produites par érosion). Parmi elles, on note les nanoparticules naturelles qui se présentent sous la forme de tubes ou une forme décrite comme sphérique résultant de l'altération de verres et de cendres volcaniques ;

Les nanoparticules produites par l'homme de façon non intentionnelle : Dans cette catégorie nous retrouvons les particules atmosphériques « *ultrafines* » (PUF). En milieu urbain, les PUF peuvent être formées de plus de 80% de suies fines (inférieure à 1 *nm*) et ultrafines provenant de la combustion des carburants fossiles .Et

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

aussi, nous retrouvons principalement les particules présentes dans la fumée de soudage dans les secteurs de la construction, et de l'industrie manufacturière (transformation des biens, réparation et l'installation d'équipements industriels) notamment. Des données métrologiques montrent l'existence de particules primaires de taille nanométrique dans les aérosols particuliers émis par les différents procédés de soudage utilisés. Dans certains types de fumées, les nanoparticules peuvent ainsi représenter jusqu'à 11% de la masse totale des particules émises, et surtout jusqu'à 80% du nombre total de particules émises ;

Les nanoparticules produites par l'homme de façon intentionnelle :

Le développement récent des nanotechnologies, regroupement de l'ensemble des techniques visant à concevoir, caractériser et produire des matériaux à l'échelle du nanomètre, a commencé à élargir les sources de nanoparticules avec la production accrue de nanomatériaux manufacturés, dont des NanoParticules Manufacturées (NPM). En raison des propriétés nouvelles des matériaux ainsi produits, les nanotechnologies connaissent un essor particulièrement important depuis ces dernières années à l'échelle internationale, où l'on observe un investissement grandissant de la part de pays de plus en plus nombreux. Des différences existent entre les PUF et NPM, les premières ayant généralement une assez large distribution de taille et une composition chimique complexe alors que les secondes ont souvent une distribution étroite et une composition chimique définie. Très schématiquement, il existe des NPM métalliques (dioxyde de titane et de zinc, par exemple) et des NPM carbonées [6].

I.5.3 Applications de nanoparticules

Les nanoparticules ouvrent un large domaine d'applications en :

- Électronique ;
- Sciences biomédicales et médicales ;
- Catalyse (catalyseur efficace dans la production des produits chimiques) ;
- Énergie renouvelable et assainissement de l'environnement ;
- Et nouvelles voies d'application comme la capture réversible des gaz à effet de

serre.

La production de nanoparticules peut représenter des risques de différentes natures car elle nécessite souvent des réducteurs chimiques toxiques et agressifs comme le borohydrure de sodium et l'hydrazine et des solvants organiques volatils tels que le toluène ou le chloroforme [7].

I.6 Nanofluides

La conductivité thermique du chauffage ou du refroidissement des fluides est une propriété très importante pour le développement d'équipements de transfert de chaleur économes en énergie. Pendant ce temps, dans tous les processus impliquant un transfert de chaleur, la conductivité thermique du fluide est l'une des propriétés fondamentales importantes à prendre en compte dans la conception et le contrôle des processus. Les nanofluides sont des colloïdes artificiels constitués d'un fluide de base et de nanoparticules de (1-100) nm. De nombreux chercheurs ont découvert que les nanofluides offrent une conductivité thermique plus élevée que les fluides de base. Sa valeur augmente avec l'aug-

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

mentation de la concentration des particules, de la température, de la taille des particules, de la dispersion et de la stabilité. Néanmoins, on s'attend à ce que d'autres facteurs tels que la densité, la viscosité et la chaleur spécifique soient également responsables de l'amélioration du transfert de chaleur par convection des nanofluides. Les nanofluides ont une conductivité thermique élevée et un coefficient de transfert de chaleur élevé par rapport aux fluides monophasés.

I.6.1 Préparation de nanofluides

La préparation des nanofluides est l'étape clé dans l'utilisation des nanoparticules pour améliorer la conductivité thermique des fluides. Deux types de méthodes ont été employés dans la production de nanofluides. L'une est une méthode en une seule étape et l'autre est une méthode en deux étapes :

Méthode en une seule étape : Il s'agit de créer des nanoparticules dans le fluide de base, cette méthode permet d'éviter Agrégation et oxydation des nanoparticules. Dans cette méthode, les processus de séchage, de stockage, de transport et de dispersion des nanoparticules sont évités, de sorte que l'agglomération des nanoparticules est minimisée et la stabilité des fluides est augmentée. Mais un inconvénient de cette méthode est que seuls les fluides à faible pression de vapeur sont compatibles avec le procédé [8]

Méthode en deux étapes : La méthode en deux étapes de préparation de nanofluides est un procédé par dispersion de nanoparticules dans des liquides de base. Les nanoparticules, nanofibres ou nanotubes utilisés dans cette méthode sont d'abord produits sous forme de condensation de gaz inerte pulvérulent sec, dépôt chimique en phase vapeur, mécanique d'alliage ou d'autres techniques appropriées, et la poudre nanométrique est

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

ensuite dispersée dans un fluide lors d'une seconde étape de traitement. Cette méthode étape par étape isole la préparation des nanofluides de la préparation des nanoparticules. En conséquence, l'agglomération des nanoparticules peut avoir lieu dans les deux étapes, en particulier dans le processus de séchage, de stockage et de transport des nanoparticules. L'agglomération entraînera non seulement le tassement et le colmatage des micro canaux, mais également diminuer la conductivité thermique. Des techniques simples telles que l'agitation par ultrasons ou l'ajout de tensioactifs aux fluides sont souvent utilisées pour minimiser l'agrégation des particules et améliorer le comportement de dispersion. [9]

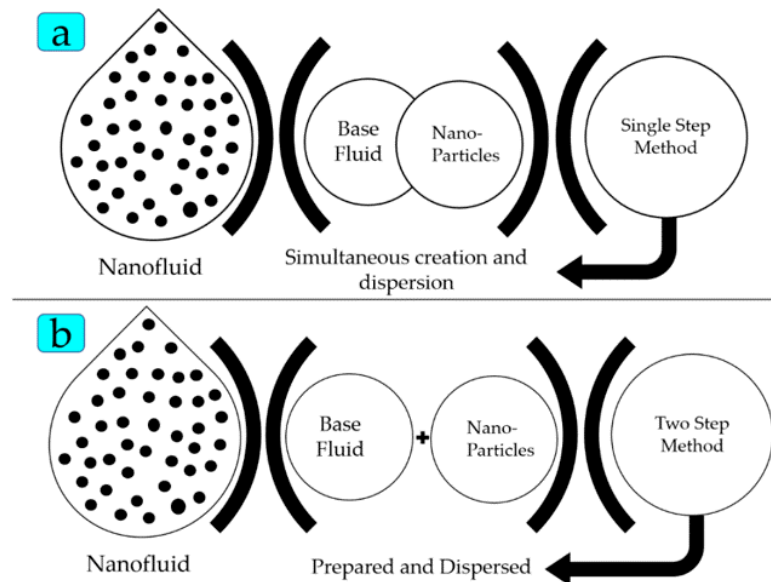


FIGURE I.6 : Les methodes de preparation des nanofluides

I.6.2 Propriétés thermo-physiques des nanofluides

L'incorporation de nanoparticules dans le fluide de base entraîne des changements dans les propriétés thermo-physiques telles que la conductivité thermique, la viscosité, la masse volumique, et la chaleur spécifique qui affecte le transfert de chaleur par convection, sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES ÉCHANGES THERMIQUES

de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu), sont quelques-uns des facteurs premiers qui modifient considérablement les propriétés thermo-physiques de différents fluides de base et nanoparticules ainsi que des facteurs affectant la conductivité thermique. [10]

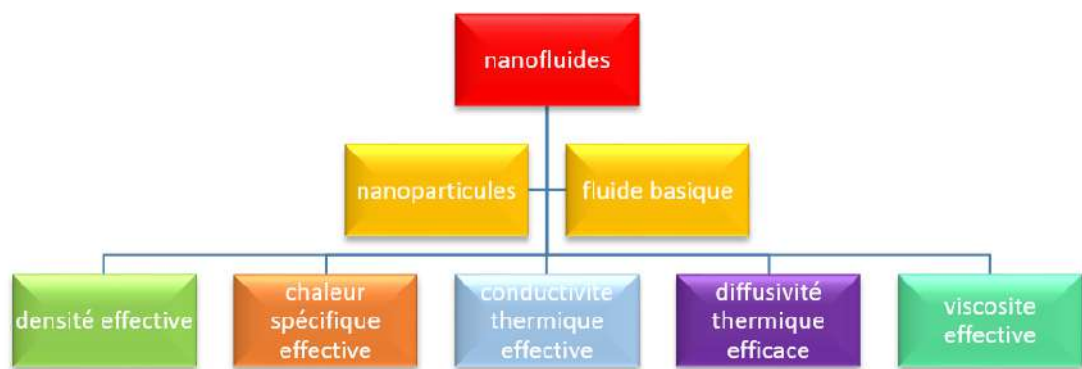


FIGURE I.7 : propriétés thermo- physiques de nanofluides

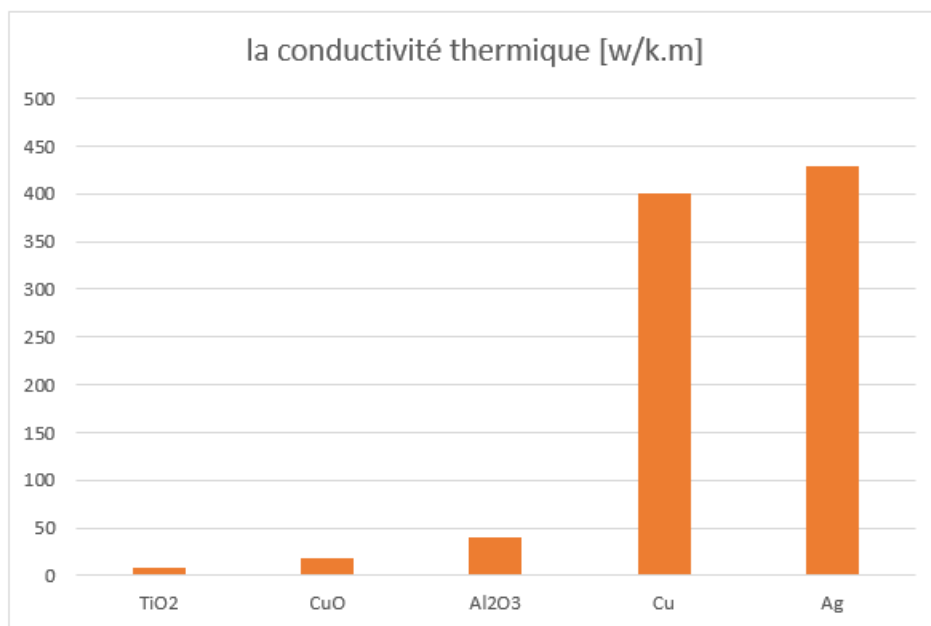


FIGURE I.8 : Les différentes conductivités thermiques de nanoparticules

I.6.3 Domaine d'application de nanofluides

Les nano-fluides préparés par différentes combinaisons de nanoparticules et de fluides de base présentent diverses caractéristiques telles qu'une conductivité thermique extraordinaire, un transfert de masse intensif, une absorption de chaleur efficace, une excellente lubrification, une propriété magnétique, des activités antibactériennes et d'administration de médicaments, et une propriété optique accordable, Les nano-fluides sont utilisés dans plusieurs industries telles que [11] :

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

I.7 conclusion

L'échangeur de chaleur est l'un des dispositifs importants qui peuvent être utilisés pour économiser de l'énergie sans aucun souci environnemental. Le rendement et l'efficacité de nombreuses applications d'échangeur de chaleur peuvent être améliorés en améliorant le fonctionnement de l'échangeur de chaleur. L'efficacité énergétique d'un échangeur de chaleur peut être améliorée en améliorant les caractéristiques de transfert de chaleur. Les chercheurs se concentrent maintenant sur la recherche d'un nouveau moyen d'augmenter le taux de transfert de chaleur pour économiser de l'énergie et réduire l'espace ainsi que les dépenses des échangeurs de chaleur. Le taux de transfert de chaleur de ces types de dispositifs peut être amélioré en utilisant une variété récente de fluide de travail connu sous le nom de nanofluide avec une conductivité thermique plus élevée. De nombreux chercheurs ont identifié que le nanofluide possède une conductivité thermique plus élevée par rapport au fluide de base.

Chapitre II

Revue bibliographique

II.1 introduction

Un grand nombre de travaux ont été publiés ces dernières années et portent sur divers nanofluides dans différents domaines. Dans ce chapitre, nous présentons l'état de l'art des échangeurs de chaleur avec nanofluides et des recherches expérimentales et numériques de quelques chercheurs qui nous permettront de formuler et de poser les problématiques de notre recherche.

II.2 l'état de l'art

Les paramètres de transfert de chaleur varient considérablement avec l'uniformité de la vitesse et de la température distribution dans l'échangeur de chaleur. Ainsi, optimiser les conditions d'exploitation et la conception de l'échangeur est d'une grande importance pour améliorer le transfert de chaleur. De plus, l'étape difficile dans l'étude d'une nouvelle conception d'échangeur de chaleur ou même dans la remise à neuf d'un

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

ancien système de chauffage échangeurs est d'obtenir une conception avec une distribution uniforme de la chaleur et du débit d'air. D'où, les études paramétriques nécessitent un grand nombre d'expériences pour aboutir au meilleur design SD, cependant, ces expériences prennent du temps et ne sont pas économiquement efficaces.

Pour identifier facilement les lacunes dans la littérature, une visualisation des articles scientifiques publiés dans la littérature concernant les nanofluides et l'échangeur de chaleur a été effectuée. Les étudiants de ce mémoire ont effectué une analyse bibliométrique approfondie basée sur 978 documents (articles originaux et de synthèse, les articles, chapitres de livres et documents de conférence) collectés en recherchant les mots Nano fluides et échangeur de chaleur dans la base de données Scopus avec dernier accès le 20 février 2022. De plus, l'un des avantages de ce type d'analyse est de déterminer les méthodologies les plus pertinentes qui ont été utilisées par les chercheurs dans un domaine spécifique.

Dans cette étude bibliométrique, les analyses de données ont été réalisées à l'aide du logiciel open-source (VOSviewer -V 1.6.16) [12] (voir la figure II.1). Ce dernier permet de générer et de visualiser des réseaux bibliométriques sur les liens entre les différents éléments des publications de recherche. Dans cette analyse, le lien entre éléments était en termes de liens de cooccurrence [13].

Sur la figure II.1, les mots-clés sont affichés dans une visualisation de réseau dans laquelle chaque mot-clé est représenté par une tache colorée dont la taille est proportionnelle à son poids exprimé en termes de nombre d'occurrences ou la force du lien ce qui signifie que les termes les plus utilisés sont en gras, grande taille de police et sont à l'intérieur de gros points (par exemple, les nano-fluides) et vice versa (par exemple, la

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

mécanique des fluides) (Figure II.1).

Les couleurs appartiennent au cluster sur lequel les différents éléments sont regroupés et l'espace entre deux spots est proportionnel à la relation entre les mots-clés. En analysant les résultats obtenus, nous avons observé que cinq clusters principaux sont présentés : Pôle 1 : Échangeur de chaleur, coquille et tube ; Pôle 2 : Transfert de chaleur, échange de chaleur, performance thermique, Transfert de chaleur et de masse, conductivité thermique ; Pôle 3 : Nano-fluide, nano-particules, masse et fraction volumique, concentrations, nanotechnologies ; Pôle 4 : CFD, simulation numérique, répartition du débit d'air, répartition de la température, performances thermiques ; Pôle 5 : Convection forcé, convection naturelle, écoulement turbulent, nombre de Reynolds.

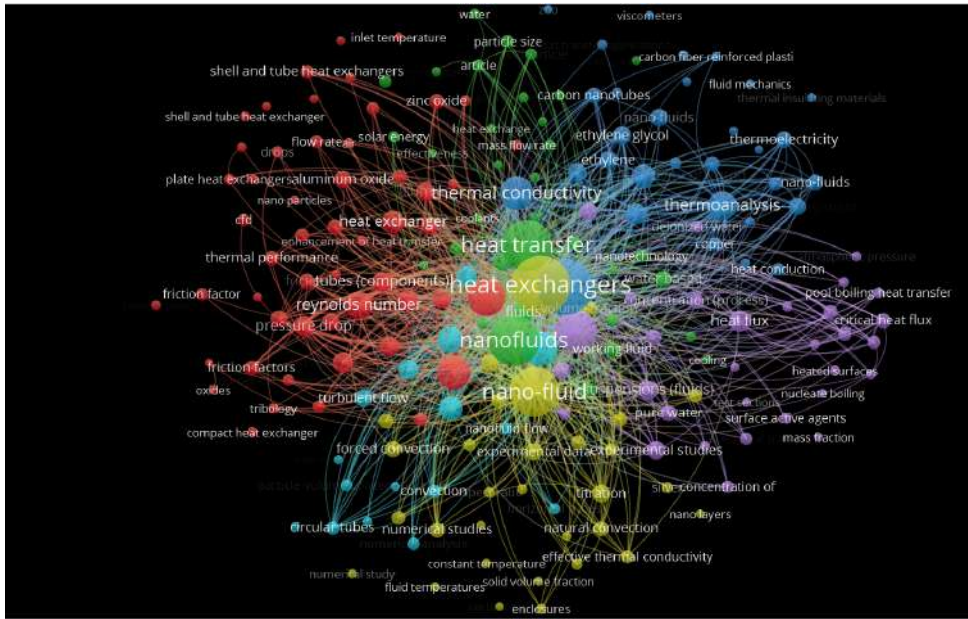


FIGURE II.1 : Visualisation en réseau des mots-clés auteur sur « nanofluide et échangeur de chaleur » élaboré avec VOSviewer

Puisque l'expression CFD est si proche du mot-clé échangeur de chaleur à nano-fluide dans les données du VOS-Viewer, nous pouvons conclure que la simulation numérique et, en particulier, la CFD, sont les approches les plus couramment utilisées

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

pour étudier la distribution de la chaleur à l'intérieur du nano-fluide (Figure!!!). Des simulations numériques ont également été réalisées dans le passé pour améliorer l'efficacité des nano-fluides, l'utilisation principale de la CFD étant :

- la conception et la prédiction de la distribution de la température d'écoulement du nano-fluide dans l'échangeur de chaleur ; [14–17]
- l'étude de l'effet de géométrie de l'échangeur de chaleur ; [18–20]
- amélioration de l'échangeur de chaleur à l'intérieur l'homogénéité de l'échangeur de chaleur a été examinée par d'autres chercheurs. [14–17] [18–20]

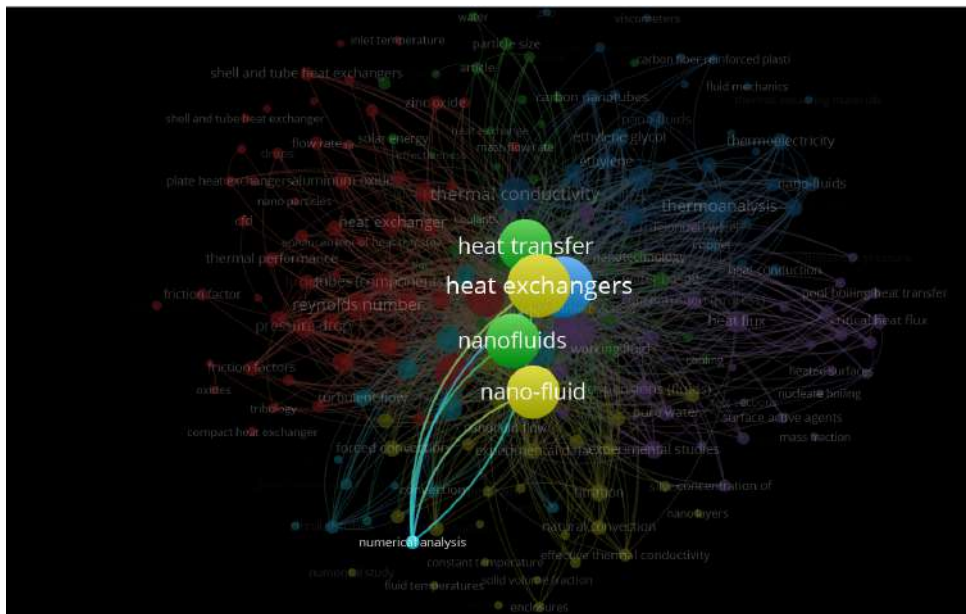


FIGURE II.2 : Cooccurrence et liens du mot clé «analyse numérique».les termes les plus utilisés sont associés au diamètre des taches(noeuds) et a la taille de la police

II.3 Recherche expérimentale et numérique

Le comportement de transfert de chaleur des nanofluides Fe_2O_3 /eau et Fe_2O_3 /EG dans un échangeur de chaleur à coque et tube a été examiné dans le travail expérimental

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

de **Nishant, et al . (2016)** [21] . Les tests ont été effectués pour une large gamme de nombres de Reynolds et de concentrations de nanoparticules. À diverses concentrations, débits et températures de fluides chauds, laugmentation du coefficient global de transfert de chaleur a été étudiée pour les deux nanofluides.

- Les caractéristiques de transfert de chaleur des deux nanofluides se sont améliorées avec le nombre de Reynolds, selon les résultats de l'expérience. Le transfert de chaleur global a été amélioré par rapport à un fluide de base avec le même nombre de Reynolds ;
- L'ajout de nanoparticules à un fluide améliore la zone de transfert de chaleur ainsi que le transfert de chaleur ;
- Les conductivités thermiques des deux fluides de base ont été étudiées à diverses concentrations et températures. La conductivité thermique augmente à mesure que la concentration de nanoparticules dans les fluides de base augmente ;
- Lorsqu'un écoulement turbulent est utilisé comme fluide de base, l'augmentation proportionnelle de la chute de pression est plus importante. A flux laminaire, il n'y a pas d'augmentation significative de la perte de charge. Dans chaque système de nanofluide, une concentration idéale doit être déterminée, avec plus d'amélioration du transfert de chaleur et moins de résistance à l'écoulement se produisant dans différents régimes d'écoulement.

Jaafar Albadr, et al. (2013) [22] Cette étude expérimentale est basée sur le diagnostic du transfert de chaleur forcé de l'action thermique, donc des nanofluides constitués d'eau et de différentes. Concentrations d' Al_2O_3 s'écoulent dans un échangeur de chaleur de type tube et calandre. Cette étude expérimentale utilise des nanoparticules

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

d'un diamètre d'environ 30 *nm*. Cette étude donne des résultats sur le coefficient de transfert de chaleur de sorte que :

- Le transfert de chaleur des nanofluides est légèrement supérieur à celui des fluides de base usuels ;
- Le coefficient de transfert de chaleur du nanofluide augmente également avec le débit massique ;
- L'augmentation du coefficient de flux thermique lors de l'augmentation de la concentration volumique du nanofluide Al_2O_3 ;
- Cependant, l'augmentation de la concentration volumique entraîne une augmentation de la viscosité du fluide, ce qui entraîne une augmentation du pourcentage de frottement.

Les caractéristiques thermiques et d'écoulement d'un nanofluide ont été évaluées numériquement dans un échangeur de chaleur circulaire à double tube à ailettes par **Mozafarie et, al. (2021)** [23] Les effets des propriétés des nanofluides et de la configuration des ailettes sur le coefficient de frottement, le nombre de Nusselt et les performances thermiques ont été étudiés à l'aide d'un modèle CFD (3D). Les effets des nanoparticules d' Al_2O_3 à une concentration volumique de 1 à 2% ont été examinés. Pour plusieurs valeurs de nombres Re de 5 000 à 100 000, hauteurs d'ailettes (1, 2 et 3 *mm*) et pas d'ailettes, une analyse numérique est effectuée (80, 160 et 320 *mm*). Les résultats de cette étude ont montré que :

- Nombre Nu est augmenté avec l'augmentation du nombre Re et de ϕ , tandis qu'il diminue avec l'augmentation du pas des ailettes ;
- Le facteur F diminue avec l'augmentation du nombre Re et du pas des ailettes, tandis qu'il augmente avec l'augmentation de ϕ ;

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

- Par l'évaluation des performances thermiques, il est conclu que l'utilisation d'ailettes et de nanoparticules simultanées est suggérée pour l'écoulement newtonien avec les valeurs de rendement η les plus élevées. Pour un fluide non newtonien, les meilleures performances thermiques ont été obtenues lorsque $S = 320 \text{ mm}$, $h = 2 \text{ mm}$ et $\phi = 2\%$ sans aucun insert.

Le transfert de chaleur par convection forcée turbulente et le frottement du flux de nanofluide Al_2O_3 - eau à travers un échangeur de chaleur à tube concentrique en U avec et sans inserts de ruban hélicoïdal dans le tube interne ont été étudiés expérimentalement par **Prasad, et al. (2015)**. [24] Les expériences ont été menées dans la gamme des nombres de Reynolds de 3000 à 30000, des concentrations volumiques de 0,01%, 0,03% et des inserts de bande hélicoïdale de $p/d = 5, 10, 15$ et 20. Les résultats de cette étude indiquent que :

- L'augmentation des nombres de Reynolds et de Prandtl entraîne une augmentation du nombre moyen de Nusselt et que l'augmentation de la conductivité thermique dans le nanofluide facilite la transmission de la chaleur ;
- En général, et conformément à la théorie, la chute de pression dans le tube interne augmente avec l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules et du rapport d'aspect des inserts pour une concentration de 0.03% de nanofluide avec des inserts de bande hélicoïdale de $p/d = 5$ par rapport à l'eau, en général, et conformément à la théorie, la chute de pression dans le tube interne augmente avec l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules et du rapport d'aspect des inserts ;
- Les corrélations empiriques pour le nombre de Nusselt et le facteur de frottement

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

sont obtenues en fonction du nombre de Reynolds, du nombre de Prandtl, de la concentration volumique et du rapport d'aspect.

Une étude expérimentale a été réalisée par **Arya, et al. (2019)** [25]. pour évaluer l'application plausible du *MgO*-éthylène glycol comme fluide caloporteur dans un échangeur de chaleur à double tube. Les expériences ont été menées dans la plage de fraction volumique (0.1-0.3)%, le banc d'essai a fourni les conditions pour mesurer le coefficient de transfert de chaleur par convection et la chute de pression. L'influence des différents paramètres de fonctionnement tels que le débit, la concentration massique des nanoparticules et la température d'entrée du nanofluide dans l'échangeur de chaleur sur le coefficient de transfert de chaleur et la chute de pression a été étudiée expérimentalement. Les résultats suivants ont été tirés :

- La présence de nanoparticules de *MgO* dans l'éthylène glycol augmente la densité, la viscosité et la conductivité thermique du nanofluide, tandis qu'elle diminue la capacité thermique du nanofluide. Dans la plage de température de 25 à 60 °C ;
- La présence de nanoparticules dans le fluide de base a augmenté la chute de pression à l'intérieur de l'échangeur de chaleur. Cela a été attribué à l'augmentation de la viscosité de l'éthylène glycol due à la présence des nanoparticules ;
- La température d'entrée a légèrement augmenté le coefficient de transfert de chaleur jusqu'à 9% à 60 °C. La raison de l'amélioration a été attribuée à l'augmentation de certaines propriétés thermo physiques telles que la conductivité thermique de nanofluide.

Logesh, et al. (2020) [26].ont présenté une simulation numérique des possibilités d'amélioration des paramètres de transfert de chaleur et d'écoulement à l'aide d'ailettes poreuses

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

dans un échangeur de chaleur à tubes concentriques ,dans lequel le fluide chaud circule dans le cylindre intérieur et le fluide froid dans l'espace annulaire. Des ailettes poreuses sont fixées à la surface extérieure de la chambre à air pour faciliter le transfert de chaleur dans le flux de fluide du côté froid :

- Le résultat montre que l'espacement des ailettes joue un rôle essentiel dans la modification des paramètres d'écoulement et du taux de transfert de chaleur ;
- Lorsque l'ailette est grande et que la porosité est faible, l'écoulement est sensiblement influencé et des zones de circulation apparaissent ;
- La conductivité thermique des ailettes affecte également le taux de transfert de chaleur car elle modifie directement le profil de température sur toute la longueur de l'ailette ;
- L'espacement des ailettes augmente le taux de transfert de chaleur jusqu'à 15. Après une certaine valeur despacement entre les ailettes, le taux de transfert de chaleur diminue, il est donc conseillé de maintenir un espacement optimal pour un nombre Nu maximum.

Une étude expérimentale par **Rao, et al. (2018)** [27]. a porté sur l'estimation du coefficient de transfert de chaleur de AL_2O_3 de diamètre 47 nm dans un échangeur de chaleur à contre-courant où le nanofluide est utilisé comme fluide froid avec différentes concentrations 0.01, 0.02 et 0.03 et différents débits massiques. les résultats ont été comparés avec le fluide de base les auteurs ont tiré les observations suivantes :

- Le coefficient de transfert thermique augmente avec l'augmentation de la concentration de nanofluide par rapport au fluide de base, le coefficient de convection amélioré pour un nanofluide de 0.03 avec le fluide de base par 47.53% ;

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

- Le coefficient de transfert thermique global augmente avec l'augmentation de la concentration du nanofluide par rapport au fluide de base, laugmentation du coefficient de transfert thermique pour le nanofluide AL_2O_3 - eau est de 73.94% pour 1 LPM et de 65.25% pour 4 LPM en comparant le 0.03% avec l'eau ;
- Le transfert thermique moyen augmente avec l'augmentation de la concentration de nanofluide par rapport au fluide de base.

Les flux de convection forcée de nanofluide constitués d'eau avec des nanoparticules de TiO_2 et d' AL_2O_3 dans un tube horizontal à température de paroi constante sont étudiés numériquement par **Demir, et al. (2011)** [28]. La section d'essai horizontale est modélisée et résolue à l'aide d'un logiciel commercial Fluent utilisé dans l'étude numérique. Il utilise la technique du volume de contrôle pour convertir les équations directrices en équations algébriques afin qu'elles puissent être résolues numériquement. L'étude numérique est réalisée pour une taille de particule constante de AL_2O_3 comme étude de cas après la validation de son modèle au moyen des données expérimentales de Duangthongsuk and **Wongwises (2010)** avec des nanoparticules de TiO_2 . Les résultats numériques ont clairement montré que :

- L'utilisation de nanofluide peut considérablement augmenter les capacités de transfert de chaleur des nanofluides, même pour des fractions de volume de particules relativement petites ;
- Les nanofluides à plus forte concentration volumique ont une chaleur plus élevée et ont également une plus grande chute de pression. Par conséquent, une décision judicieuse doit être prise lors de la sélection d'un nanofluide qui équilibrera l'amélioration du transfert de chaleur et la pénalité de la chute de pression.

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Y.Phanindra et al.(2018) [29]. ont fait une étude expérimentale sur nano fluide hybride AL_2O_3 et Cu/huile utilisant un échangeur de chaleur à tube concentrique, cette étude porte sur le transfert de chaleur laminaire du nanofluide hybride AL_2O_3 Cu/Oil avec 0.1% concentration volumique à travers un échangeur de chaleur à tubes concentriques sous condition aux limites de flux de chaleur constant Les principaux résultats expérimentaux sont énumérés ci-dessous :

- Les performances de transfert de chaleur dans l'échangeur de chaleur à tubes concentriques sont augmentées en suspendant l'hybride AL_2O_3 -Cu Nanoparticules par rapport à l'huile pure. L'augmentation moyenne du nombre de Nusselt pour l'hybride AL_2O_3 -Cu/Oil le nanofluide est de 10.34% par rapport à l'huile pure.
- Le coefficient de transfert de chaleur est directement proportionnel au nombre de Reynolds. Il augmente avec l'augmentation de du nombre Reynolds. Les résultats expérimentaux du nanofluide hybride ont montré une amélioration maximale de 12.06% pour le nombre Nusselt et 1820 pour le nombre de Reynolds par rapport à l'huile pure.

Aghayari, et al. (2020) [30] représentent les performances du nanofluide Fe_2O_3 /eau (20 nm) dans un échangeur de chaleur à double tube équipé d'inserts en ruban torsadé pour intensifier le transfert de chaleur. Les paramètres pris en considération sont le débit massique, le taux de torsion du ruban, la température et la fraction volumétrique des nanoparticules par rapport à l'eau. Les concentrations volumétriques de nanoparticules sont de 0.08% et 0.1% (V/V), et différents rubans torsadés avec des rapports de torsion de $2.5 \leq y/w \leq 5.2$ sont utilisés. La variation du nombre de Reynolds se situe dans le régime d'écoulement turbulent de $5000 < Re$. Les résultats expérimentaux sont résumés

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

comme suit.

- L'effet du film enroulé sur le transfert de chaleur est plus important que celui de l'utilisation de nanoparticules ;
- L'utilisation de nanofluide Fe_2O_3 /eau avec une concentration volumique de 0.08% et 0.1% augmente le transfert de chaleur et le nombre de Nusselt d'environ 18% et 25%, respectivement ;
- Pour la gamme conçue, le facteur de performance thermique maximal de 3.25 est atteint en appliquant 0.1% de nanofluide, un taux de torsion de 2.5 et un Re de 5000.

II.4 conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs chercheurs ont mené des études analytiques, numériques et expérimentales sur l'intensification des échanges thermiques dans les échangeurs de chaleur pour améliorer le transfert de chaleur et augmenter l'efficacité de l'échangeur thermique. Ils ont appliqués plusieurs techniques d'amélioration des échanges thermiques. A cet égard, le troisième chapitre est consacré à la simulation des échanges thermiques dans l'échangeur de chaleur à tube U concentrique avec les nanofluides **Cuo** et Al_2O_3 pour améliorer le transfert de chaleur.

Chapitre III

présentation du problème physique

III.1 Introduction

L'amélioration des performances d'un échangeur de chaleur est liée principalement à la nature du matériau, et les propriétés thermiques des matériaux utilisés. Ce chapitre est dédié à : Traiter l'étude de refroidissement de l'eau, principalement à l'aide de logiciel (ANSYS fluent R21) qui est spécialement destiné à la dynamique des fluides numérique (CFD), qui permet d'analyser les phénomènes thermiques et fluidiques complexes. Ainsi, le logiciel permet de prédire les performances avant de procéder à des expériences physiques sur des modèles réels. Présenter la géométrie de notre cas suivie par les équations du problème étudié à savoir : les équations de la quantité de mouvement, de continuité et de l'énergie avec les conditions aux limites en appliquant les conditions aux limites.

CHAPITRE III. PRÉSENTATION DU PROBLÈME PHYSIQUE

III.1.1 Les étapes pour définir le problème CFD

Les étapes à suivre pour simuler l'écoulement à l'aide de logiciel ANSYS R21 sont :

Géométrie : utilisé pour créer, importer, modifier ou mettre à jour un modèle qui peut être utilisé pour l'analyse ;

Maillage : cette cellule est liée à la définition de la géométrie, systèmes de coordonnées, des connections et du maillage dans le module de simulation mécanique ;

Configuration : permet de définir les conditions aux limites et une autre configuration pour l'analyse ;

Solution : permet d'accéder aux données de la résolution ;

Résultats : combiner et regroupe les résultats de l'analyse.

III.2 la géométrie et maillage du problème étudié

III.2.1 la géométrie du problème

L'analyse est effectuée sur un échangeur de chaleur à double tube U, illustré en 3 dimensions avec un diamètre intérieur de 0,019 m et un diamètre extérieur de 0,025 m pour le tuyau intérieur, et un diamètre intérieur de 0,05 m et un diamètre extérieur de 0,056 m pour l'anneau tuyau, et une longueur totale de 2,36 m. Le débit massique d'eau chaude ($0.134-0.267 \text{ kg.s}^{-1}$), avec des températures variables (voir le tableau III.1).

Le nanofluide circule dans le tube intérieur, et l'eau chaude circule dans le tube extérieur, dans notre cas on a choisi deux études (eau-eau), (eauCuO) et (eau- Al_2O_3) en

CHAPITRE III. PRÉSENTATION DU PROBLÈME PHYSIQUE

TABLE III.1 : Paramètres géométriques et de fonctionnement et variables étudiées.

Tube interne	Matériau	Aluminum
	Conductivité thermique	$36.9 W.m^{-1}K^{-1}$
	Diamètre interne	$0.019 m$
	Diamètre externe	$0.025 m$
Tube externe	Matériau	Aluminum
	Conductivité thermique	$36.9 W.m^{-1}K^{-1}$
	Diamètre interne	$0.05 m$
	Diamètre externe	$0.056 m$

contre-courant. La figure III.1 montre le modèle géométrique.

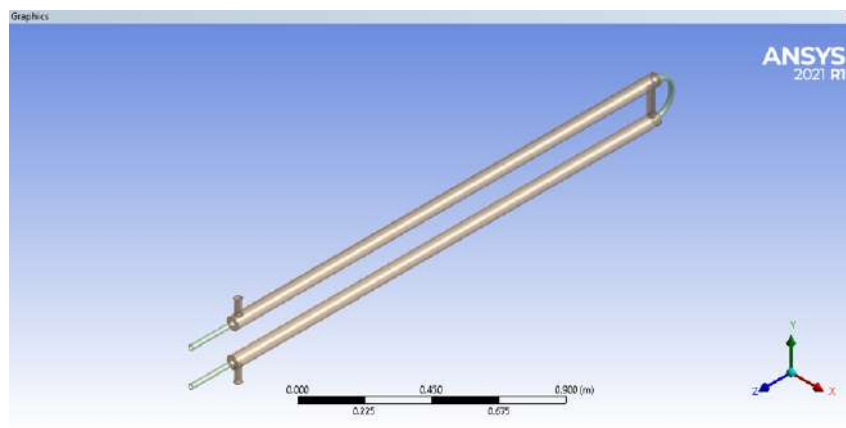


FIGURE III.1 : la géométrie de problème

III.2.2 présentation des conditions aux limites

Les tableaux III.2 ci-dessous représentent les paramètres et les conditions aux limites de notre étude :

TABLE III.2 : Conditions aux limites imposées aux extrémités de l'échangeur de chaleur

Type de limite	Tube _{ext}	Tube _{int}
Débit massique aux entrées [$kg.s^{-1}$]	0.134	0.134 au 0.267
Température d'entrée [K]	333	300
Flux de chaleur constant au tube	0	—

III.2.3 Etude de maillage

Le premier travail à accomplir dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à la nature de l'écoulement. Pour exécuter la simulation, un maillage de calcul approprié est nécessaire. Plusieurs densités de maillage ont été testées pour avoir le maillage approprié qui assure une meilleure précision de calcul possible et qui conforme à la géométrie compliquée de la forme. Les résultats consécutifs sont considérés comme critère de choix du maillage de la structure, voir les figures III.2. La taille des éléments et le nombre de nœuds ont également été explorés, comme illustré

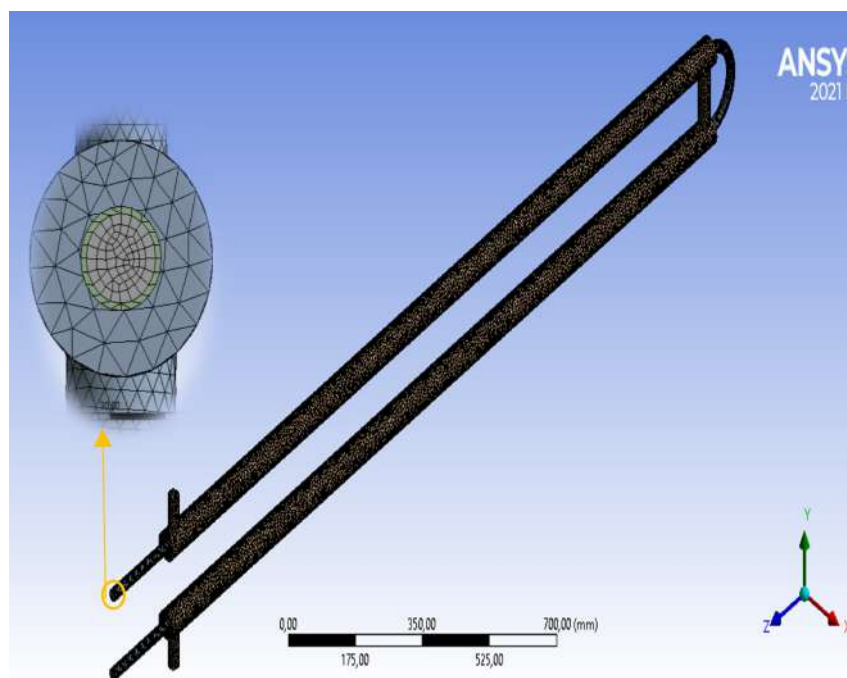


FIGURE III.2 : maillage de échangeur de chaleur

à la Figure III.3 qui illustre la convergence lorsque le nombre de nœuds atteint 3 189 640. Ce maillage a été utilisé dans tous les résultats de simulation ainsi que dans d'autres concentrations volumique.

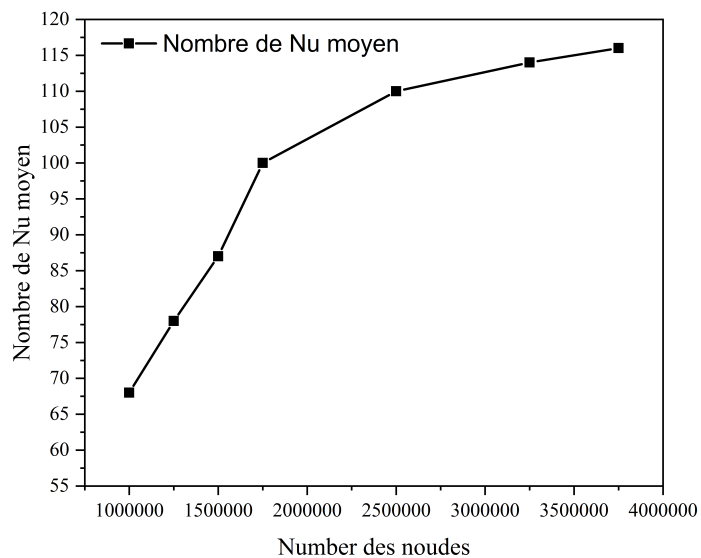


FIGURE III.3 : Stabilité du maillage en fonction du nombre de nœuds

III.3 Formulation mathématique du problème

III.3.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de résoudre les équations qui contrôlent le flux de nanoparticules, on va adopter les hypothèses de simplification suivantes :

- L'écoulement est stationnaire et bidimensionnel ;
- Le fluide est Newtonien et incompressible ;
- L'écoulement engendré est constant dans le temps ;
- Le flux de la source de chaleur est constant dans le temps ;
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable ;
- La puissance volumique dissipée est négligeable ;
- Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable

III.3.2 Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.1})$$

III.3.3 Equation de quantité de mouvement

Equation de la conservation de la quantité de mouvement suivant x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + u_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right] \quad (\text{III.2})$$

Equation de la conservation de la quantité de mouvement suivant y

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + u_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + (\rho\beta)_{nf} g (T - T_0) \right] \quad (\text{III.3})$$

Equation de la conservation de la quantité de mouvement suivant z

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + u_{nf} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right] \quad (\text{III.4})$$

III.3.4 Equation de l'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.5})$$

CHAPITRE III. PRÉSENTATION DU PROBLÈME PHYSIQUE

TABLE III.3 : Propriétés thermo-physiques des fluides de travail

les liquides	Fraction volumique	k	C_p	ρ	$[\mu]$
	[%]	$[W.m^{-1}K^{-1}]$	$[J.Kg^{-1}K^{-1}]$	$[kg.m^{-3}]$	$kg.m^{-1}s^{-1}$
L'eau distillée	0	0.603	4182	997.1	0.00109
CuO-eau	0.1	0.615	4155.99	1002.413	0.00106
	0.3	0.619	4110.720	10013.039	0.001011
Al2O3	0.1	0.652	4148	1072.9	1.027
	0.3	0.678	4079.5	1087.4	10.77

III.4 conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé le modèle physique examiné et les équations qui régissent ce modèle physique, ensuite nous avons spécifié les conditions aux limites de tous les frontières du domaine de l'écoulement pour résoudre les équations de la dynamique des fluides qui se font par utilisation des méthodes numériques où intervient le concept de la discrétisation. Ainsi, le prochain chapitre va être consacré à la présentation des résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de notre simulation de l'effet du transfert de chaleur de l'eau distillée et les nanfluides (CuO , Al_2O_3) dans un échangeur de chaleur à double tube en U avec différentes fractions (0%, 0.1%, 0.3%) et quatre débits ($0.134\text{-}0.267 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$) pour un arrangement contre courant.

IV.1.1 Le contour des températures

Les contours de température de l'eau pure dans le tube intérieur et extérieur de l'échangeur de chaleur à double tube en U sont illustrés à la figure [IV.2](#) et figure [IV.3](#) dans les conditions de débit estimé de ($1.34\text{-}0.267 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$), on observe que la température du fluide extérieur (eau pure), diminue progressivement de l'entrée à la sortie du tube extérieur. Ainsi, l'augmentation du débit entraîne une augmentation du nombre de Reynolds et puis le nombre de Nusselt ce qui améliore le taux de transfert thermique pour

CHAPITRE IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

atteindre un meilleur rendement.

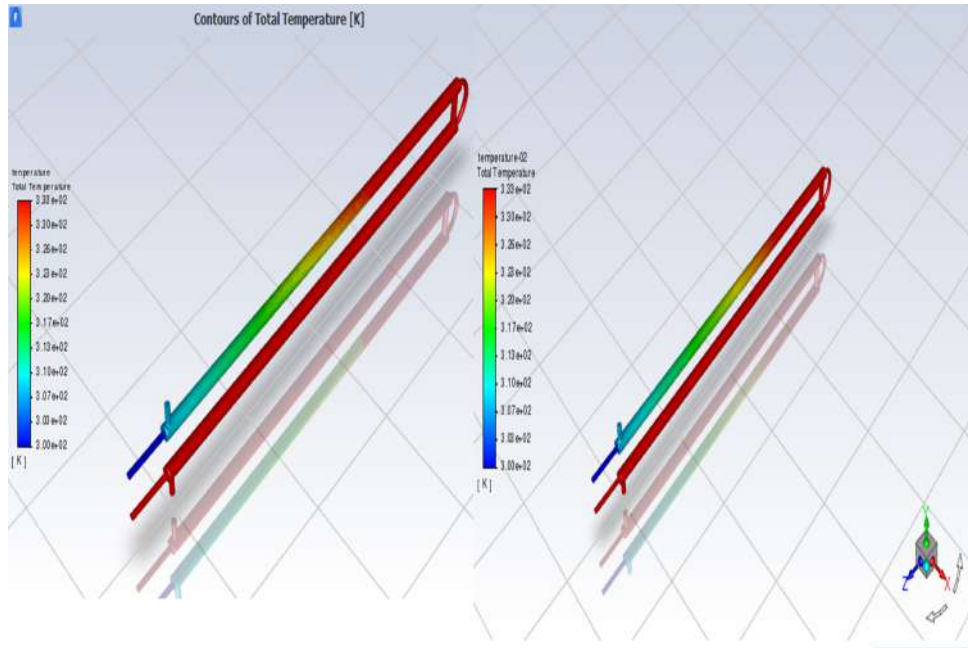


FIGURE IV.1 : Contour de température $(0,134,0,178)kg.s^{-1}$

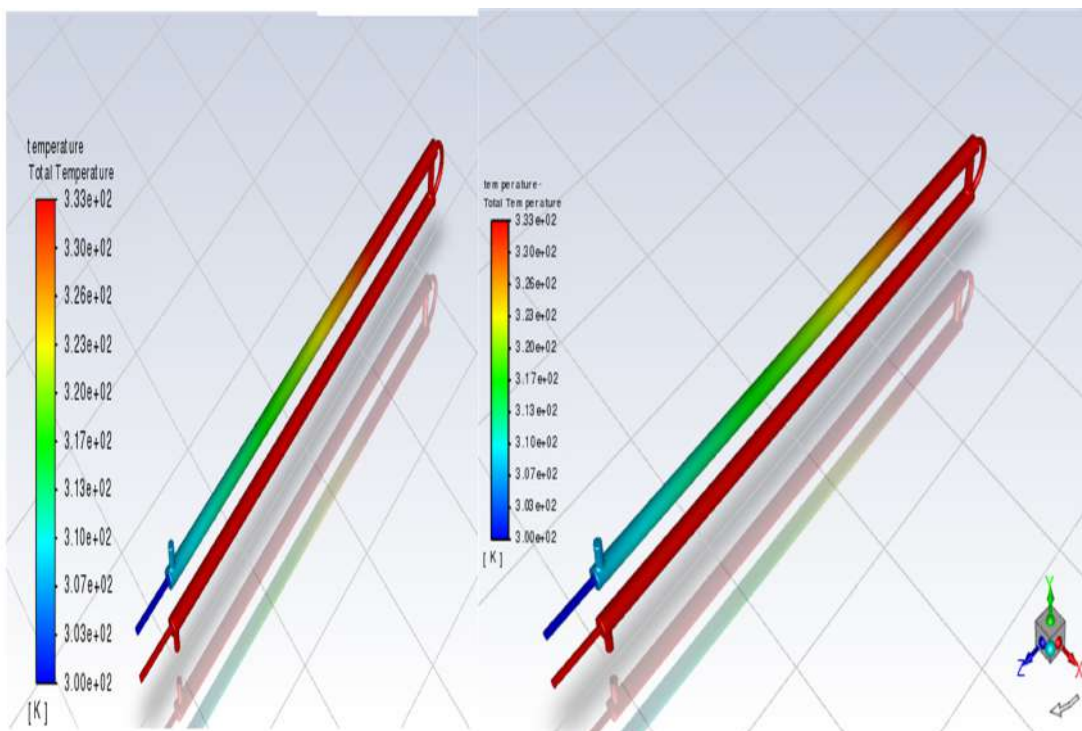


FIGURE IV.2 : Contour de température en $(0.2,0,267)kg.s^{-1}$

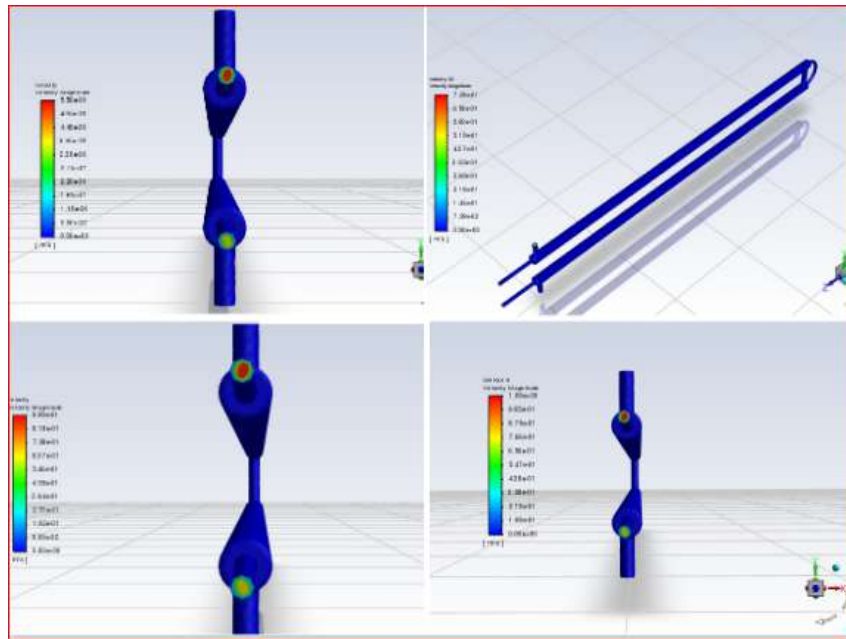


FIGURE IV.3 : contour de vitesse dans les quatre débits

IV.1.2 Les contours des vitesses de leau distillée

Les contours de la vitesse de leau pure dans tube intérieur et l'extérieur de l'échangeur de chaleur à double tube en U de chaque débit ($0.134-0.267 \text{ kg.s}^{-1}$) sont illustrés à la figures IV.4. Daprès les résultats de la figureIV.4 , on observe que les vitesses des fluides chaud et froid (eau pure) augmentent progressivement avec laugmentation de débit.

IV.2 Cas du fluide avec nanoparticule Al_2O_3

IV.2.1 Leffet de la fraction volumique 0.1%

Les figures ci-dessous (Figure IV.5 représentent les contours de la température dans le cas de nanofluide Al_2O_3 -eau avec une fraction volumique de (0.1%)

IV.2.1.1 Les contours de la température

Le contour de température du nanofluide Al_2O_3 -eau dans le tube intérieur et extérieur de l'échangeur de chaleur à double tube en U sont illustrés à la figure IV.5. Lorsque la fraction volumique estimée (0.1%) et débit (1.34 kg.s^{-1}) a la sortie de tube, on observe que la température du fluide interieur (nanofluide), augmente rapidement de l'entrée à la sortie du tube interieurur par rapport à leau distillée. Cette augmentation est due à laugmentation de la conductivité thermique du fluide caloporteur par lajout des nanoparticules.

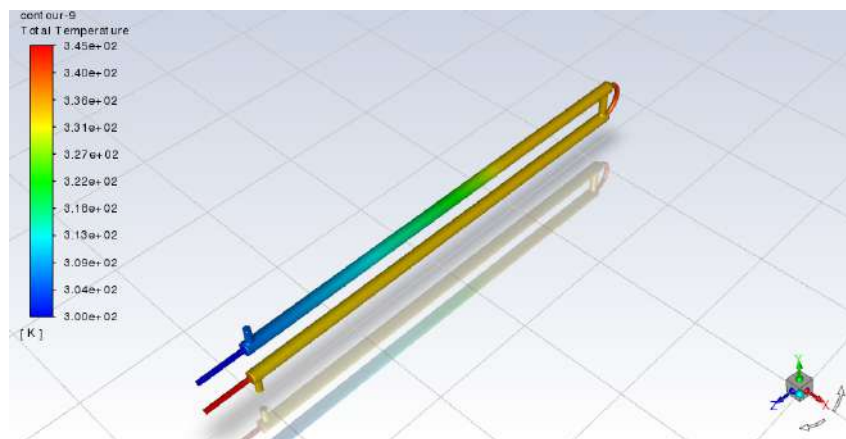


FIGURE IV.4 : contour de température en 0.1%

IV.2.2 Leffet de la fraction volumique 0.3%

Les figures ci-dessous représentent les contours de la température dans le cas de nanofluide Al_2O_3 -eau avec fraction volumique (0.3%)

IV.2.2.1 Contour de la température

Les contours de température du tube intérieur et extérieur de l'échangeur de chaleur sont illustrés à la figure IV.6. Les résultats de la simulation ont montré que lorsque la fraction volumique estimée (0.3%) et débit (1.34 kg.s^{-1}) à la sortie de tube la température du fluide interieur (nanofluide), augmente rapidement de l'entrée à la sortie du tube interieur par rapport au nanofluide de (0.1%) et leau distillée. Cette augmentation est justifiée par le fait que la conductivité thermique du nanofluide (0.3%) est plus élevée quun nanofluide avec fraction de (0.1%) pour le même type de nanoparticules. Les résultats présentés plus haut montrent que l'utilisation des nanofluides a une influence considérable sur les performances des échangeurs de chaleur.

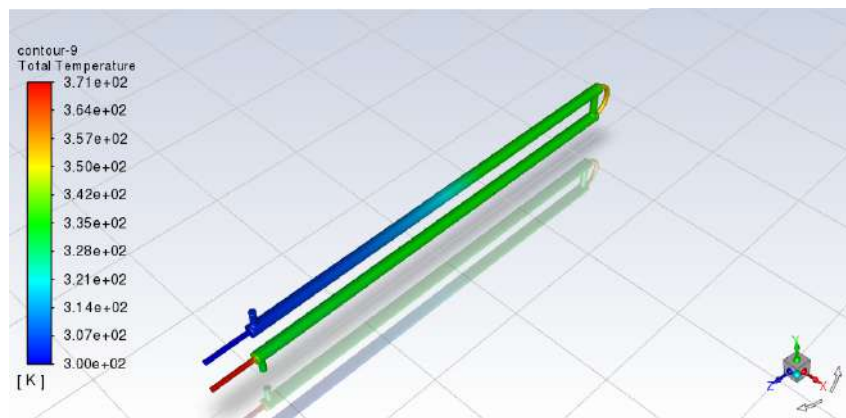


FIGURE IV.5 : contour de la température 0.3%

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce travail de mémoire nous avons fait une étude numérique en vue de modérer l'effet du transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur a double tube en u. Le calcul numérique, est mené en 3 dimensions. L'objectif consistait délaborer un programme de simulation numérique pour étudier leffet de nanofluide sur l'échangeur de chaleur. Les systèmes des équations gouvernantes le problème ont été résolus numériquement par une méthode des volumes finies, en utilisant un logiciel CFD (ANSYS fluent R21) Nos simulations numériques ont été effectuées en contre-courant, Nous avons choisi deux différentes nanoparticules (oxyde d'Aluminium (Al_2O_3), oxyde de cuivre (CuO)) dans un fluide de base (eau) avec différentes concentrations (0,1 et 0,3) pour les trois cas possibles (fluide pur(eau) dans les deux tubes, Al_2O_3 +eau et CuO +eau avec différents débits. Pour donner plus de confiance aux résultats de notre simulation numérique, nous avons comparé ces derniers avec d'autres études expérimentales présentées dans la littérature, un excellent accord est apprécié entre les deux et la validation du code numérique a donnée des résultats très encourageants. Les résultats obtenus montrent que :

- Le transfert de chaleur des nanofluides est supérieur à celui des fluides de base usuels ;
- L'augmentation des échanges thermique doit être lorsque laugmentation de la conduc-

CONCLUSION GÉNÉRALE

tivité thermique du nano-fluide

- L'augmentation de la conductivité thermique du nano-fluide donne une amélioration dans le refroidissement de fluide de base ;
- L'augmentation de nombre de Reynolds (qui entraîne l'augmentation du transfert de chaleur) mène à l'évolution de nombre de Nusselt moyen ;
- Avec L'augmentation de la concentration de CuO dans le nanofluide, l'efficacité s'améliore.

Bibliographie

- [1] Bengt Sundén. *Introduction to heat transfer*. Wit Press, 2012.
- [2] Warren M Rohsenow, James P Hartnett, Young I Cho, et al. *Handbook of heat transfer*, volume 3. McGraw-Hill New York, 1998.
- [3] Bahman Zohuri. *Compact heat exchangers*. Springer, 2017.
- [4] Kuppan Thulukkanam. *Heat exchanger design handbook*. CRC press, 2000.
- [5] S Anu Mary Ealia and MP Saravanakumar. A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, volume 263, page 032019. IOP Publishing, 2017.
- [6] S Lanone and J Boczkowski. Les sources de nanoparticules. *Revue française d'allergologie*, 50(3) :211–213, 2010.
- [7] Kawter Nor El Houda SEKKAL. *Elaboration de nanoparticules mésoporeuses et application environnementale et catalytique*. PhD thesis, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf .
- [8] Wei Yu and Huaqing Xie. A review on nanofluids : preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of nanomaterials*, 2012, 2012.

BIBLIOGRAPHIE

- [9] Yanjiao Li, Simon Tung, Eric Schneider, Shengqi Xi, et al. A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder technology*, 196(2) :89–101, 2009.
- [10] Jan Rudolf Eggers and Stephan Kabelac. Nanofluids revisited. *Applied Thermal Engineering*, 106 :1114–1126, 2016.
- [11] Dan Li and Richard B Kaner. Processable stabilizer-free polyaniline nanofiber aqueous colloids. *Chemical communications*, (26) :3286–3288, 2005.
- [12] Nees Van Eck and Ludo Waltman. Software survey : Vosviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics*, 84(2) :523–538, 2010.
- [13] Umair Sultan, Yangjun Zhang, Muhammad Farooq, Muhammad Imran, Alamgir Akhtar Khan, Weilin Zhuge, Tariq Amin Khan, Muhammad Hummayun Yousaf, and Qasim Ali. Qualitative assessment and global mapping of supercritical co2 power cycle technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43 :100978, 2021.
- [14] C Gnanavel, R Saravanan, and M Chandrasekaran. Heat transfer augmentation by nano-fluids and circular fin insert in double tube heat exchanger—a numerical exploration. *Materials Today : Proceedings*, 21 :934–939, 2020.
- [15] Ahmed M Nagib Elmekawy, Alaa A Ibrahim, Abdalrahman M Shahin, Sara Al-Ali, and Gasser E Hassan. Performance enhancement for tube bank staggered configuration heat exchanger—cfD study. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 164 :108392, 2021.
- [16] G Murali, B Nagendra, and J Jaya. Cfd analysis on heat transfer and pressure drop characteristics of turbulent flow in a tube fitted with trapezoidal-cut twisted tape

BIBLIOGRAPHIE

- insert using Fe_3O_4 nano fluid. *Materials Today : Proceedings*, 21 :313–319, 2020.
- [17] K Somasekhar, KND Malleswara Rao, V Sankararao, Raffi Mohammed, M Veerendra, and T Venkateswararao. A cfd investigation of heat transfer enhancement of shell and tube heat exchanger using Al_2O_3 -water nanofluid. *Materials Today : Proceedings*, 5(1) :1057–1062, 2018.
- [18] Khaoula Nedjem, Mohamed Teggat, Tarik Hadibi, Müslüm Arıcı, Çağatay Yıldız, and Kamal AR Ismail. Hybrid thermal performance enhancement of shell and tube latent heat thermal energy storage using nano-additives and metal foam. *Journal of Energy Storage*, 44 :103347, 2021.
- [19] Nae-Hyun Park and Man Yeong Ha. An experimental study on the effect of vertical header geometry on the two-phase refrigerant distribution and performance of a microchannel heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 209 :118287, 2022.
- [20] Abdessamia Hadjadj, Boubaker Benhaoua, Abdelmalek Atia, Abderrahmane Khechekhouche, Nacer Lebbihiat, and Amar Rouag. Air velocity effect on the performance of geothermal helicoidally water-air heat exchanger under el oued climate, algeria. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20 :100548, 2020.
- [21] Nishant Kumar and Shriram S Sonawane. Experimental study of Fe_2O_3 /water and Fe_2O_3 /ethylene glycol nanofluid heat transfer enhancement in a shell and tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78 :277–284, 2016.
- [22] Jaafar Albadr, Satinder Tayal, and Mushtaq Alasadi. Heat transfer through heat exchanger using Al_2O_3 nanofluid at different concentrations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 1(1) :38–44, 2013.

BIBLIOGRAPHIE

- [23] Seyed Shahab Mozafarie, Kouros Javaherdeh, and Omid Ghanbari. Numerical simulation of nanofluid turbulent flow in a double-pipe heat exchanger equipped with circular fins. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6) :4299–4311, 2021.
- [24] PV Durga Prasad, AVSSKS Gupta, M Sreeramulu, L Syam Sundar, MK Singh, and Antonio CM Sousa. Experimental study of heat transfer and friction factor of al₂o₃ nanofluid in u-tube heat exchanger with helical tape inserts. *Experimental thermal and fluid science*, 62 :141–150, 2015.
- [25] H Arya, MM Sarafraz, O Pourmehran, and Maziar Arjomandi. Heat transfer and pressure drop characteristics of mgo nanofluid in a double pipe heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*, 55(6) :1769–1781, 2019.
- [26] K Logesh, R Arunraj, S Govindan, M Thangaraj, and GK Yuvashree. Numerical investigation on possibility of heat transfer enhancement using reduced weight fin configuration. *International Journal of Ambient Energy*, 41(2) :142–145, 2020.
- [27] Mr B Parameswara Rao, Mr V Nageswara Rao, SCV Ramana Murthy Naidu, and Mr T Veeraiah. Heat transfer enhancement in double pipe heat exchanger by alumina–water nanofluid. *Heat Transfer*, 5(03), 2018.
- [28] Hülya Demir, AS Dalkilic, NA Kürekci, W Duangthongsuk, and S Wongwises. Numerical investigation on the single phase forced convection heat transfer characteristics of tio₂ nanofluids in a double-tube counter flow heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(2) :218–228, 2011.
- [29] Weerapun Duangthongsuk and Somchai Wongwises. Comparison of the effects of measured and computed thermophysical properties of nanofluids on heat transfer performance. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(5) :616–624, 2010.

BIBLIOGRAPHIE

- [30] Reza Aghayari, Heydar Maddah, Seyed Mohsen Pourkiaei, Mohammad Hossein Ahmadi, Lingen Chen, and Mahyar Ghazvini. Theoretical and experimental studies of heat transfer in a double-pipe heat exchanger equipped with twisted tape and nanofluid. *The European Physical Journal Plus*, 135(2) :1–26, 2020.
- [31] RH Notter and CA Sleicher. A solution to the turbulent graetz problemiii fully developed and entry region heat transfer rates. *Chemical Engineering Science*, 27(11) :2073–2093, 1972.

Résumé :

Dans notre étude on a fait une simulation numérique dans un échangeur de chaleur en double tube U. le fluide froid circule dans le tube interne et le fluide chaud dans le tube externe, dans le but de comparer l'effet des nanofluide (eau-eau, eau- CuO et eau- Al_2O_3) avec différentes débit (0.134, 0.178, 0.222, 0.267 kg /s) et différentes fractions (0%, 0.1%, 0.3%) dans un échangeur de chaleur. Les températures des nanofluide fluide circulant dans l'échangeur de chaleur sont maintenues à 300k. A cet effet on a utilisé un logiciel de simulation ANSYS workbench (version 2021 R1), dont les résultats montrent que : l'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide provoque une amélioration de l'échange thermique.

Mots clés ; Simulation numérique ; Nanofluide ; Echangeur de chaleur ; Conductivité thermique ; ANSYS.

Abstract :

In our study we made a numerical simulation in a heat exchanger in double tube U. the cold fluid circulates in the inner tube and the hot fluid in the outer tube, in order to compare the effect of nanofluids (water-water, water-CuO and water- Al_2O_3) with different flow rates (0.134, 0.178, 0.222, 0.267 kg /s) and different fractions (0%, 0.1%, 0.3%) in a heat exchanger. The temperatures of the fluid nanofluids circulating in the heat exchanger are maintained at 300K.

For this purpose, an ANSYS workbench simulation software (version 2021 R1) was used, the results of which show that: the increase in the thermal conductivity of the nanofluid causes an improvement in the heat exchange.

Keywords; Numerical simulation; Nanofluids; Heat exchanger; Thermal conductivity; ANSYS.

المخلص

يهتم هذا العمل بالدراسة رقمية في مبادل حراري في أنبوب مزدوج U ، يدور السائل البارد في الأنبوب الداخلي والسائل الساخن في الأنبوب الخارجي ، من أجل مقارنة تأثير السوائل النانوية (ماء-ماء ، ماء- CuO و ماء- Al_2O_3) بمعدلات تدفق مختلفة (0.134 ، 0.178 ، 0.222 ، 0.267) وكسور حجمية مختلفة (0% ، 0.1% ، 0.3%) في مبادل حراري. يتم الحفاظ على درجات حرارة السوائل النانوية المتداولة في المبادل الحراري عند 300 كلفن. لهذا الغرض ، تم استخدام برنامج محاكاة ANSYS (الإصدار R1 2021) ، وأظهرت النتائج أن زيادة التوصيل الحراري للسائل النانوي يؤدي إلى تحسن في التبادل الحراري

كلمات مفتاحية.