

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت - بلحاج بوشعيب



Université Ain Témouchent– Belhadj Bouchaib

Faculté des sciences et de Technologie

Département de Genie mécanique



**Projet de Fin de d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème :

**Analyse tridimensionnelle de l'écoulement dans un échangeur bitube en présence
d'un nanofluide hybride**

Realisé par:

- Mr. MADANI Mohamed Abd El Ghafour
- Melle LOURMIL Souheyla

Devant le jury composé de :

- | | |
|--------------------------------|---------------|
| • Pr. BENZENINE Hamidou | Encadrant |
| • Mr. BRAKNA Djamel Abdelkader | Co- encadrant |
| • Pr. BENSAD Bourassia | Président |
| • Dr. GUENDOUZ Bouhelal | Examineur |

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, **Pr. BENZENINE Hamidou**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'études. Ses orientations et son expertise nous ont été d'une aide inestimable.

Nous adressons également nos sincères remerciements à notre co-encadrant, **Mr. BRAKNA Djamel Abdelkader**, pour son suivi, ses remarques constructives et son aide précieuse qui ont contribué à l'amélioration de ce travail.

Nous remercions vivement les membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail en acceptant de l'évaluer, ainsi que pour leurs observations et recommandations enrichissantes.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont assuré notre formation et partagé avec nous leurs connaissances tout au long de notre parcours universitaire.

Dédicace

À moi-même, artisan de cette réussite grâce à ma détermination, ma persévérance et ma volonté. Je suis fier de chaque pas accompli, de chaque obstacle surmonté et de chaque effort consenti pour atteindre cet objectif.

À mon cher père et à ma chère mère, aucun mot ne saurait exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance envers vous. Merci pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices, vos encouragements et votre soutien constant. Vous êtes ma plus grande source de force et de motivation. Que Dieu vous protège et vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À la famille Madani, dans toute sa grandeur et à chacun de ses membres, je vous adresse toute mon affection, ma fidélité et ma profonde gratitude. Merci pour votre présence, votre soutien et les valeurs que vous m'avez transmises.

À mes chers amis: Mahdi, Ali, Mouad, Abd El Ali, wail, pour les moments partagés, votre soutien, votre confiance et les précieux souvenirs que nous avons construits ensemble.

À mon petit ange Zayd, que Dieu te protège, veille sur toi et fasse de toi une source de fierté et de bonheur pour tous ceux qui t'aiment.

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à mon parcours et à ma réussite. Avec toute ma reconnaissance et mon respect.

Abd El Ghafour

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts, de persévérance et de sacrifices,

À la mémoire de mon très cher père, qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste Paradis. Son amour, ses conseils et les valeurs qu'il m'a transmises continueront de guider chacun de mes pas.

À ma très chère maman, source inépuisable de tendresse, de courage et de soutien. Aucun mot ne saurait exprimer ma profonde gratitude pour tous les sacrifices qu'elle a consentis afin de me voir réussir.

À mon frère Ibrahim, pour son affection, ses encouragements et sa présence à mes côtés.

À mes chères sœurs Samira et Nesrine, pour leur amour, leur confiance et leur soutien permanent.

À mes précieuses amies Feriel et Hayet, qui ont partagé avec moi les moments de joie comme les moments difficiles tout au long de ce parcours.

À celui qui fut un refuge pour mon âme et une source de motivation pour mes ambitions, à ce cœur discret qui a partagé avec moi les épreuves des jours par ses paroles réconfortantes, à celui qui a toujours été présent dans l'ombre, tel un soutien fidèle et indéfectible, j'adresse cette dédicace avec toute ma gratitude et mon estime.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dédie cette réussite.

Souheyla

Résumé

Ce travail présente une étude thermique numérique d'un échangeur de chaleur à double tube muni d'ailettes longitudinales fixées sur la surface extérieure du tube intérieur, réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'influence du débit, du type de nanofluide hybride ainsi que de la concentration volumique des nanoparticules sur les performances thermiques de l'échangeur. Les ailettes longitudinales ont été utilisées afin d'augmenter la surface d'échange thermique et d'améliorer l'efficacité du transfert de chaleur. Après la création de la géométrie, du maillage et l'application des conditions aux limites, plusieurs simulations numériques ont été effectuées afin d'évaluer le comportement thermique des fluides et l'évolution des températures de sortie. Les résultats obtenus montrent que la variation du débit, du type de nanofluide hybride et de la concentration influence directement l'efficacité du transfert thermique et les températures de sortie. Cette étude met en évidence l'importance de la simulation numérique dans l'analyse et l'optimisation des échangeurs thermiques.

Mots-clés : Échangeur de chaleur, double tube, ailettes longitudinales, nanofluide hybride, concentration volumique, transfert thermique, simulation numérique.

المخلص :

يقدم هذا العمل دراسة حرارية ورقمية لمبادل حراري مزدوج الأنبوب مزود بزعانف طولية مثبتة على السطح الخارجي يتمثل الهدف الرئيسي لهذه الدراسة في تحليل تأثير معدل ANSYS Fluent للأنبوب الداخلي، وذلك باستخدام برنامج التدفق، ونوع المائع النانوي الهجين، وكذلك التركيز الحجمي للجسيمات النانوية على الأداء الحراري للمبادل الحراري. وقد استُخدمت الزعانف الطولية بهدف زيادة مساحة التبادل الحراري وتحسين كفاءة انتقال الحرارة. بعد إنشاء الهندسة وإجراء عملية التشبيك وتطبيق الشروط الحدية، تم تنفيذ عدة محاكاة عددية لتقييم السلوك الحراري للموائع وتطور درجات حرارة الخروج. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن تغير معدل التدفق، ونوع المائع النانوي الهجين، والتركيز الحجمي للجسيمات النانوية يؤثر بشكل مباشر على كفاءة انتقال الحرارة ودرجات حرارة الخروج. الكلمات المفتاحية: المبادل الحراري، الأنبوب المزدوج، الزعانف الطولية، المائع النانوي الهجين، التركيز الحجمي، انتقال الحرارة، المحاكاة العددية

Abstract

This work presents a thermal and numerical study of a double-tube heat exchanger equipped with longitudinal fins mounted on the outer surface of the inner tube using ANSYS Fluent software. The main objective of this study is to analyze the influence of flow rate, hybrid nanofluid type, and nanoparticle volume concentration on the thermal performance of the heat exchanger. The longitudinal fins were used to increase the heat exchange surface area and enhance heat transfer efficiency. After creating the geometry, mesh, and boundary conditions, several numerical simulations were carried out to evaluate the thermal behavior of the fluids and the evolution of outlet temperatures. The obtained results show that the variation of flow rate, hybrid nanofluid type, and concentration directly affects heat transfer efficiency and outlet temperatures. This study highlights the importance of numerical simulation in the analysis and optimization of heat exchangers.

Keywords: Heat exchanger, double tube, longitudinal fins, hybrid nanofluid, volume concentration, heat transfer, numerical simulation.

Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé	iv
Abstract.....	v
Introduction générale.....	xiv
Chapitre 01 :	1
Généralités sur les échangeurs de chaleur	1
1. Introduction	2
2. Généralités sur le transfert de chaleur	2
2.1 La conduction.....	3
2.2 La convection.....	4
2.3 Le rayonnement	6
3. Les Échangeurs de chaleur	7
3.1 Définition	7
3.2 Principe de fonctionnement	7
3.3 Différents types d'échangeurs.....	8
4. Classification des échangeurs de chaleur.....	13
4.1 Selon le type de contact	14
4.2 Selon la nature du matériau de la paroi d'échange	14
4.3 Selon la compacité de l'échangeur.....	15
4.4 Selon le type de l'écoulement	15
4.5 Selon le type d'échange	17
5. Domaines d'application des échangeurs de chaleur	18
6. Conclusion	18
Chapitre 02 :	2
Généralité et Etude bibliographique sur les nanofluides	2
Introduction	20
1. Définition des nanofluides.....	20
2. Historique et développement des nanofluides	21
3. Propriétés thermo-physiques des nanofluides.....	21
4. Méthodes de préparation des nanofluides.....	24
5. Stabilité des nanofluides.....	26
6. Les Nanofluides hybrides	27
6.1 Définition.....	27

6.2	Composition d'un nanofluide hybride	27
6.3	Applications des nano fluides	28
7.	L'utilisation des Nanofluides dans les échangeurs de chaleur.....	30
8.	L'utilisation des nanofluide hybride dans les l'échangeur de chaleurs	31
9.	Conclusion	34
Chapitre 03 :		35
Modèle mathématique et Simulation numérique		35
1.	Introduction	36
2.	Objectifs de l'étude.....	37
3.	Présentation du code de calcul ANSYS.....	37
4.	Présentation de la géométrie.....	37
4.1	Géométrie de l'échangeur de chaleur bitube.....	37
4.2	Importance du choix géométrique.....	38
4.3	Description de la géométrie	38
4.4	Dimensions principales.....	38
4.5	Domaine de calcul.....	39
4.6	Configuration de l'écoulement.....	39
4.7	Description de la figure.....	39
4.8	Génération de la géométrie sous ANSYS	40
5.	Type de nanofluides utilisé.....	40
6.	Propriétés Physique :.....	40
7.	Maillage du modele:	41
8.	Modèles Mathématiques	42
9.	Conditions aux limites	45
10.	Conditions de fonctionnement.....	45
11.	Conclusion	46
Chapitre 04 :		35
Résultats et Discussions.....		35
1.	Introduction	47
2.	Étude d'indépendance du maillage	47
3.	Validation du modèle numérique	48
3.1	Validation par le débit.....	48
3.2	Analyse des résultats.....	49
3.3	Conclusion de la validation.....	49
4.	Résultats et discussions.....	50
4.1	Effet de différents types de nanofluides hybrides	50
4.2	Effet de la concentration volumique des nanoparticules.....	52

Sommaire

4.3	Effet de la fraction de chaque nanoparticule dans le nanofluide hypride	54
4.4	Effet de localisation de nanofluide hypride	56
5.	Distribution de la température	57
	Analyse globale	63
6.	Conclusion	63
	Conclusion générale	45
	Référence	iv

Liste des figures

• CHAPITRE 1

Figure 1. 1:Transfert thermique par conduction.....	3
Figure 1. 2:Association du transfert de chaleur par conduction avec la diffusion d'énergie due l'activité moléculaire.....	4
Figure 1. 3:Association du transfert de chaleur par convection avec la diffusion d'énergie due l'activité moléculaire.....	4
Figure 1. 4:Transfert thermique par convection.....	5
Figure 1. 5:Transfert thermique par rayonnement.....	6
Figure 1. 6:Schéma de fonctionnement d'un échangeur de chaleur à plaques.....	9
Echangeurs tubulaires :	9
Figure 1. 7:Echangeur tube unique.....	10
Figure 1. 8:Echangeur Double tube coaxial	11
Figure 1. 9:Echangeur a faisceau tubulaire et calandre à tubes en U.....	12
Figure 1. 10:Echangeur a faisceau tubulaire et calandre à tubes droits.....	12
Figure 1. 11:Echangeur à ailettes	13
Figure 1. 12: Classification générale des échangeurs de chaleur	Error! Bookmark not defined.
Figure 1. 13:Profil de température et le sens de l'écoulement dans un échangeur co-courant.....	15
Figure 1. 14:Profil de température et le sens de l'écoulement dans un échangeur contre-courant	16
Figure 1. 15:Echangeur à courants croisés	16
Figure 1. 16:Types d'écoulement.....	17

• CHAPITRE 2

Figure 2. 1:Nombre annuel de publication sur les nanofluides (2002-2025).....	21
Figure 2. 2:Mécanisme d'amélioration du transfert du chaleur dans un nanofluide.....	23
Figure 2. 3:Relation entre la conductivité thermique et la fraction volumique des nanoparticules.	24
Figure 2. 4: Méthode de préparation des nanofluides.....	25
Figure 2. 5:Méthode 01 de préparation des nanofluides	26
Figure 2. 6:les nanofluides dans un échangeur de chaleur	28
Figure 2. 7:Capteur solaire à nanofluides.....	28
Figure 2. 8:Refroidissement des microprocesseurs	29
Figure 2. 9:Système de refroidissement électronique avec nanofluide	29
Figure 2. 10:Refroidissement du moteur par nanofluide.....	30
Figure 2. 11:Climatisation et HVAC.....	30
Figure 2. 12:Nanofluide hybride dans un échangeur de chaleur bitubes.....	31

• CHAPITRE 3

Figure 3. 1:Configuration du modèle CFD de l'échangeur de chaleur bitube	39
Figure 3. 2:Maillage du modèle.....	42

• CHAPITRE 4

Figure 4. 1:Température de sortie de fluide froid en fonction du nombre d'élément.....	48
Figure 4. 2:Variation du taux de transfert thermique en fonction du débit massique : Comparaison avec les résultats de Ban Ghulam et al	49
Figure 4. 4:Taux de transfert de chaleur en fonction de débit.....	50
Figure 4. 5:coefficient de transfert de chaleur en fonction de débit.....	51
Figure 4. 6:Taux de transfert de chaleur en fonction de débit.....	52
Figure 4. 7:coefficient de transfert de chaleur en fonction de débit.....	53
Figure 4. 8:Taux de transfert de chaleur en fonction de débit.....	54
Figure 4. 9:Coefficient de transfert de chaleur en fonction de débit.....	55

Liste des figures

Figure 4. 10:Taux de transfert de chaleur en fonction de débit.	56
Figure 4. 11:coefficient de transfert de chaleur en fonction de débit.	56
Figure 4. 12:Champ de température radial dans un échangeur bitube équipé d'ailettes longitudinales à $x=0$	58
Figure 4. 13:Champ de température radial dans un échangeur bitube équipé d'ailettes longitudinales à $x=1m$	59
Figure 4. 14:Distribution de la température de tube intérieur avec ailettes longitudinales.	60
Figure 4. 15:Distribution de la température du fluide intérieur le long de l'échangeur (vue longitudinale).....	61
Figure 4. 16:Distribution de la température en coupe avec ailette.	62

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Propriétés thermophysique des fluides de base.[56]	40
Tableau 3.2: Propriétés thermophysiques des nanoparticules utilisées.[56]	41

Liste des symboles

Liste des symboles		
Φ	Taux thermique	(W)
λ	conductivité thermique	(W/m·K)
S	Surface d'échange thermique	(m ²)
ΔT	différence de température	(K)
T_1	Température de la face chaude h	(°C ou K)
T_2	Température de la face froide	(°C ou K)
R_{th}	résistance thermique	(K /W)
h	coefficient de convection	(W/m ² ·K)
T_s	température de surface	(K)
T_f	température du fluide	(K)
ε	émissivité	(-)
e	Épaisseur	(m)
σ	constante de Stefan-Boltzmann	(W/m ² ·K)
T^4	température du corps	(K)
k_{nf}	la Conductivité thermique du nanofluide	(W/m·K)
k_{bf}	la Conductivité thermique du fluide de base (W/m·K)	(W/m·K)
k_{np}	la Conductivité thermique des nanoparticules	(W/m·K)
k_{np1}	La conductivité thermique des nanoparticules de type 1	(W/m·K)
k_{np2}	La onductivité thermique des nanoparticules de type 2	(W/m·K)
ϕ	Fraction volumique du nanofluide dans le fluide de base	(%)
ϕ_1	la fraction volumique des nanoparticules de type 1	(%)
ϕ_2	la fraction volumique des nanoparticules de type 2	(%)
μ_{nf}	La Viscosité du nanofluide	Pa·s (kg/m·s)
μ_{bf}	La Viscosité du fluide de base	Pa·s (kg/m·s)
ρ_{nf}	La Densité du nanofluide	kg/m ³
ρ_{bf}	La Densité du fluide de base	kg/m ³
ρ_{np}	La Densité des nanoparticules	kg/m ³
ρ_{np1}	la densité des nanoparticules de type 1	(kg/m ³)
ρ_{np2}	la densité des nanoparticules de type 2	(kg/m ³)
$C_{p\ nf}$	La Chaleur spécifique du nanofluide	J/(kg·K)
$C_{p\ bf}$	La Chaleur spécifique du fluide de base	J/(kg·K)

Liste des symboles

$C_{p\ np}$	La Chaleur spécifique des nanoparticules	$J/(kg \cdot K)$
$C_{p\ np1}$	La Chaleur spécifique des nanoparticules de type 1	$J/(kg \cdot K)$
$C_{p\ np2}$	La Chaleur spécifique des nanoparticules de type 2	$J/(kg \cdot K)$
Φ_h	Chaleur cédée par le fluide chaud	(W)
Φ_c	Chaleur reçue par le fluide froid	(W)
$\dot{m}$	Débit massique	(kg/s)
U	Coefficient global de transfert de chaleur	$W/(m^2 \cdot K)$
ΔT_{lm}	Différence de température moyenne logarithmique (DTML)	$(K \text{ ou } ^\circ C)$
u, v, w	Composantes de la vitesse selon les axes x, y et z	(m/s)
x, y, z	Coordonnées spatiales	(m)
p	Pression	(Pa)
ρ	Masse volumique	(kg/m^3)
γ	Viscosité cinématique	(m^2/s)
∇^2	Opérateur Laplacien	(m^{-2})
T	Température	(K)
α	Diffusivité thermique	(m^2/s)
g_z	composante de l'accélération de la pesanteur selon l'axe z	(m/s^2)

Introduction générale

Introduction générale

Les échangeurs de chaleur jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels tels que l'énergie, la pétrochimie, le génie thermique, les systèmes de refroidissement et les procédés industriels. Leur fonction principale est d'assurer le transfert de chaleur entre deux fluides à des températures différentes, sans mélange direct entre eux. Grâce à leur importance dans l'amélioration des performances thermiques et la réduction de la consommation énergétique, les échangeurs de chaleur sont devenus des équipements indispensables dans les installations modernes.

Parmi les différents types d'échangeurs existants, l'échangeur à double tube (Double Tube Heat Exchanger) se distingue par sa simplicité de conception, sa facilité d'entretien et son efficacité dans plusieurs applications industrielles. Ce type d'échangeur est constitué de deux tubes concentriques permettant la circulation de deux fluides : un fluide chaud et un fluide froid. Le transfert thermique s'effectue à travers la paroi séparant les deux fluides, selon différents modes d'écoulement comme le co-courant ou le contre-courant.

Dans le domaine du transfert thermique, plusieurs phénomènes interviennent, notamment la conduction, la convection et parfois le rayonnement. L'étude des échangeurs thermiques nécessite également la compréhension des paramètres influençant les performances thermiques, tels que la vitesse d'écoulement, les propriétés thermophysiques des fluides, le débit massique, la géométrie de l'échangeur ainsi que le coefficient de transfert de chaleur.

Avec le développement technologique et l'augmentation des besoins énergétiques, les chercheurs se sont orientés vers l'amélioration des performances des échangeurs thermiques en utilisant des techniques modernes, parmi lesquelles l'utilisation des nanofluides hybrides. Ces fluides, obtenus par la dispersion de nanoparticules dans un fluide de base, permettent d'améliorer la conductivité thermique et d'augmenter l'efficacité du transfert de chaleur.

Dans ce travail, une étude numérique et thermique d'un échangeur de chaleur à double tube a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent afin d'analyser le comportement thermique et hydrodynamique de l'écoulement à l'intérieur de l'échangeur. La modélisation comprend la création de la géométrie, le maillage, l'application des conditions aux limites ainsi que la simulation des distributions de température et de vitesse.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les performances thermiques de l'échangeur et de comprendre l'influence des différents paramètres sur le transfert de chaleur.

Introduction générale

Cette étude permet également de comparer les résultats obtenus et de proposer des solutions pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes thermiques.

Chapitre 01 :

Généralités sur les échangeurs de chaleur

1. Introduction

Le transfert de chaleur constitue l'un des phénomènes fondamentaux de la thermique et joue un rôle essentiel dans de nombreuses applications industrielles et domestiques. Il correspond au passage spontané de l'énergie thermique d'un milieu à température élevée vers un milieu à température plus basse, conformément au deuxième principe de la thermodynamique.

Les trois modes fondamentaux de transfert thermique — conduction, convection et rayonnement — permettent d'expliquer la majorité des phénomènes énergétiques observés dans les systèmes physiques. La compréhension approfondie de ces mécanismes est indispensable pour optimiser les performances des équipements thermiques et améliorer l'efficacité énergétique.[1]

Dans ce contexte, les échangeurs de chaleur représentent des dispositifs clés permettant le transfert contrôlé de l'énergie thermique entre deux fluides sans contact direct. Leur conception repose sur les principes fondamentaux du transfert thermique et varie selon les besoins industriels, les propriétés des fluides et les conditions de fonctionnement.[2]

Ce chapitre présente ainsi les bases théoriques du transfert de chaleur ainsi qu'une étude détaillée des échangeurs thermiques, leurs types, leurs classifications et leurs domaines d'application.

2. Généralités sur le transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est un phénomène fondamental en thermique, qui correspond à la circulation de l'énergie thermique d'un corps ou d'un fluide vers un autre sous l'effet d'une différence de température. Ce phénomène est omniprésent dans l'industrie et la vie quotidienne. Dans de nombreux procédés industriels, l'échange thermique peut être le but principal (comme dans les fours, les échangeurs de chaleur, le thermoformage, l'induction, les lits fluidisés, la trempe ou le refroidissement), ou un effet inévitable résultant de chocs thermiques, de pertes de chaleur ou de rayonnement.

Le deuxième principe de la thermodynamique précise que la chaleur ne se transmet naturellement que d'un corps chaud vers un corps plus froid. Cette règle fondamentale conditionne toutes les analyses et conceptions liées au transfert thermique. L'étude du transfert de chaleur vise à comprendre les mécanismes par lesquels cette énergie se déplace et à quantifier son évolution dans le temps et l'espace.[1]

Le transfert thermique peut se produire selon trois modes principaux :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

Pour comprendre et contrôler ces phénomènes, il est essentiel d'améliorer l'efficacité des appareils thermiques, réduire les pertes thermiques, ainsi que s'assurer de la sécurité et de la fiabilité des appareils thermiques industriels ou domestiques.

2.1 La conduction

La conduction thermique est un mode de transfert d'énergie qui se produit sans mouvement de matière, et concerne donc principalement les solides ou les fluides immobiles.

Ce phénomène peut se produire à l'intérieur d'un même corps ou entre deux corps en contact.

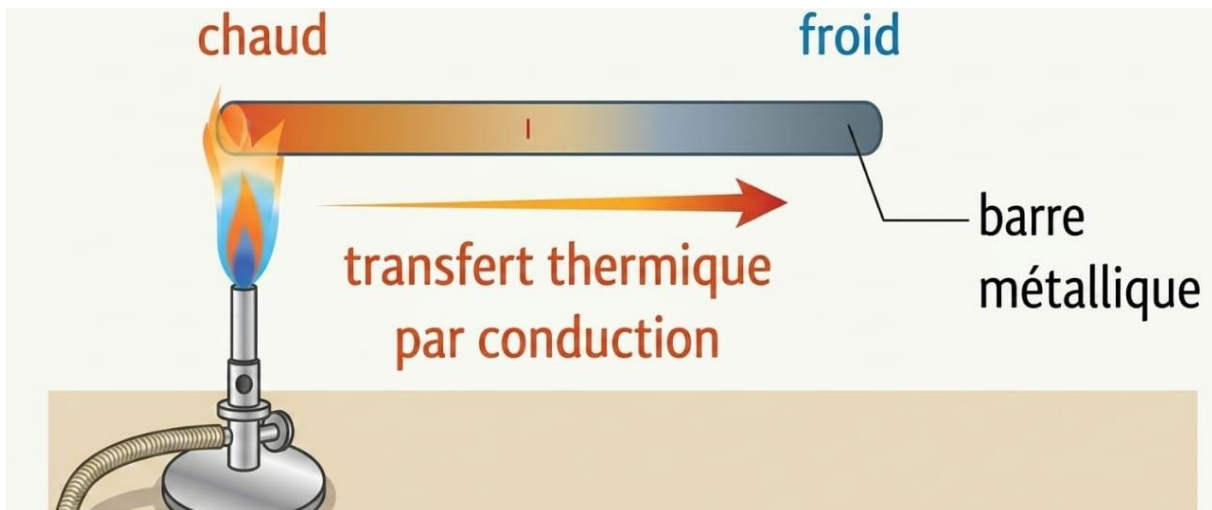


Figure 1.1: Transfert thermique par conduction.[1]

Au niveau microscopique, l'énergie thermique est transmise par les vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre. Dans les cristaux, un mécanisme supplémentaire intervient, lié aux vibrations du réseau cristallin. La conduction peut être considérée comme un processus de diffusion d'énergie thermique de proche en proche. [3]

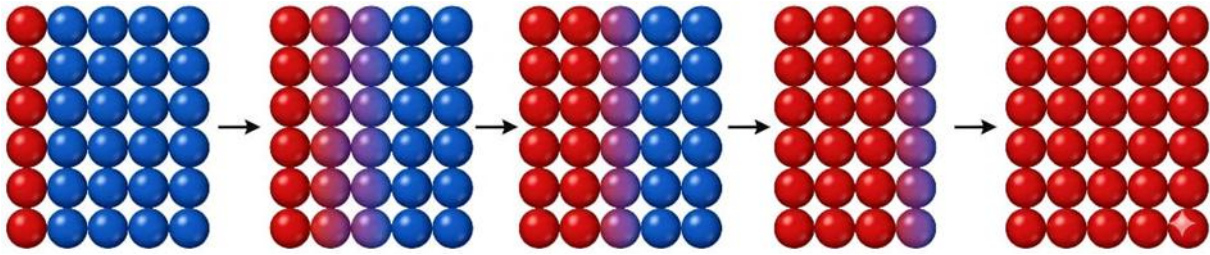


Figure 1. 2: Association du transfert de chaleur par conduction avec la diffusion d'énergie due l'activité moléculaire.[2]

Pour une paroi solide plane d'épaisseur e et de surfaces d'aire S exposées à une différence de température $T_1 - T_2$, le taux thermique Φ est donné par la relation[1] :

$$\Phi = \lambda \cdot S \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{e} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{th}} \dots \dots \dots (1)$$

où :

Φ : Taux thermique total (W)

λ : Conductivité thermique (W/m·K)

S : Surface (m²)

T_1 : Température de la face chaude (°C ou K)

T_2 : Température de la face froide (°C ou K)

e : Épaisseur (m)

R_{th} : Résistance thermique (K /W)

2. 2 La convection

La convection est un phénomène par lequel la chaleur se déplace dans un fluide grâce au mouvement des molécules.

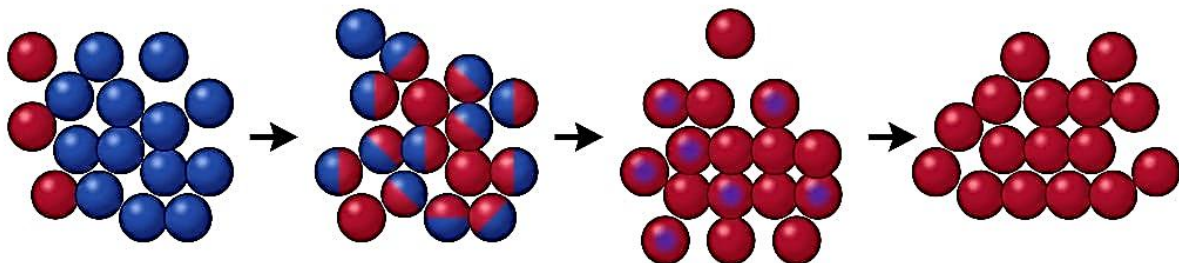


Figure 1. 3: Association du transfert de chaleur par convection avec la diffusion d'énergie due l'activité moléculaire. [2]

Chapitre 01 : Généralités sur les échangeurs de chaleur

Elle intervient aussi bien dans les liquides que dans les gaz, ainsi qu'à l'interface entre un fluide et une surface solide.

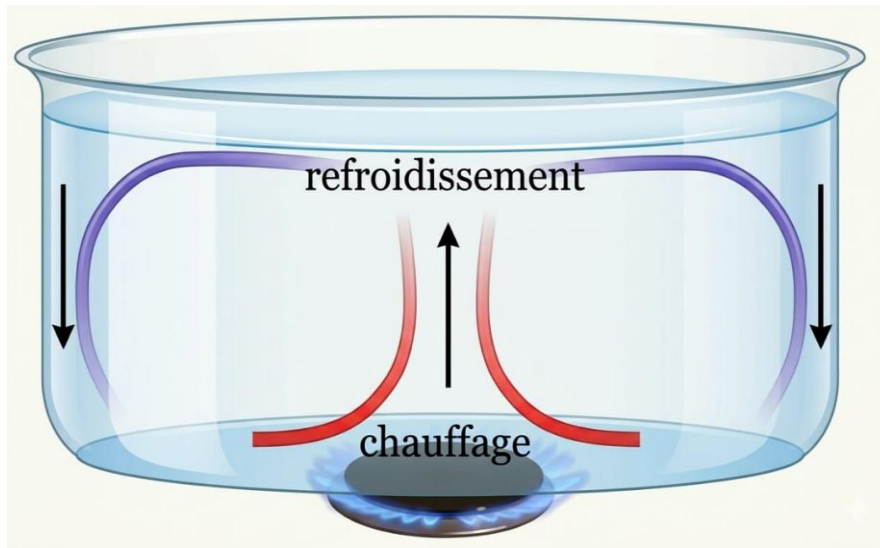


Figure 1. 4: Transfert thermique par convection. [1]

Contrairement à la conduction, la chaleur n'est pas seulement transmise localement, mais est transportée par le déplacement du fluide lui-même. [2]

On distingue deux types principaux de convection :

- **Convection naturelle (ou libre)**

Ce type de convection apparaît lorsque les différences de température modifient la densité du fluide. Les zones chaudes, plus légères, montent, tandis que les zones froides descendent, créant des courants spontanés qui redistribuent la chaleur.

Exemple : Dans une pièce chauffée par un radiateur, l'air chaud s'élève naturellement et l'air froid descend pour prendre sa place, ce qui réchauffe progressivement toute la pièce. [1]

- **Convection forcée**

Ci, le mouvement du fluide est induit par un mécanisme externe comme une pompe ou un ventilateur. Ce déplacement accélère le transfert de chaleur et assure un renouvellement plus rapide du fluide près de la surface. [1]

Exemple : Le refroidissement d'un moteur par un ventilateur, ou la circulation d'eau forcée dans un échangeur thermique.

Le taux thermique par convection est donné par la loi de Newton. [1]

Ou : $\Phi = h \cdot S (T_s - T_f) \dots \dots \dots (2)$

Φ : Taux thermique total (W)

h : coefficient de convection ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

S : surface (m^2)

T_s : température de surface (K)

T_f : température du fluide (K)

Cette formulation permet de quantifier la chaleur transférée par convection en fonction de la surface de contact, du coefficient de convection et de la différence de température entre la surface et le fluide.

2.3 Le rayonnement

Le rayonnement thermique est un mode de transfert de chaleur par ondes électromagnétiques, sans nécessiter de contact ni de matière. Tout corps émet un rayonnement dont l'intensité et la longueur d'onde dépendent de sa température. Par exemple, le Soleil rayonne principalement dans le visible, tandis que des objets plus froids, comme les êtres vivants, émettent surtout dans l'infrarouge. [3]

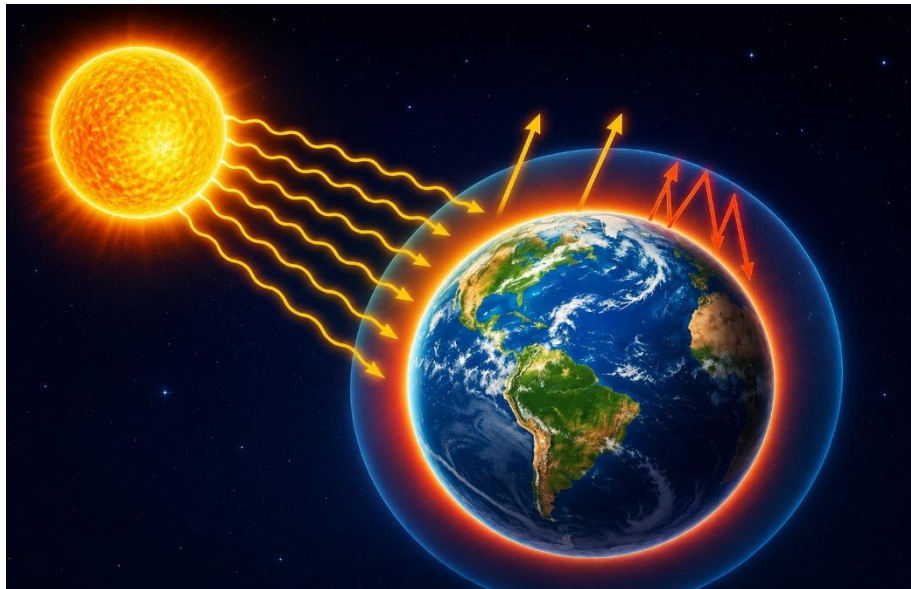


Figure 1. 5:Transfert thermique par rayonnement.[2]

Ce mode de transfert est le seul pouvant se produire dans le vide et peut également traverser certains matériaux transparents. Pour l'étudier, on utilise le concept de corps noir, un objet idéal

qui absorbe et émet tout le rayonnement incident. Le taux thermique surfacique émis par un corps est donné par la loi de Stefan-Boltzmann :[2]

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \dots \dots \dots (3)[1]$$

Φ : Taux thermique total (W)

ε : émissivité (sans unité)

σ : constante de Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} (W/m²·K)

S : surface (m²)

T^4 : température du corps (K)

3. Les Échangeurs de chaleur

3.1 Définition

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant le transfert d'énergie thermique entre un fluide chaud et un fluide froid, tout en maintenant leur séparation physique grâce à une paroi solide adaptée. Les caractéristiques de cette paroi, notamment son épaisseur et sa résistance thermique, sont déterminées en fonction des débits et des propriétés des fluides.

La quantité de chaleur transférée dépend principalement de plusieurs paramètres, à savoir les températures d'entrée des fluides qui génèrent le gradient thermique, les propriétés thermo physiques des fluides telles que leur capacité à stocker et à conduire la chaleur, ainsi que l'efficacité des échanges thermiques, représentée par les coefficients de convection entre les fluides et la paroi.[4]

3.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un échangeur de chaleur consiste à transférer la chaleur d'un fluide chaud vers un fluide plus froid, sans contact direct entre eux. Les deux fluides circulent séparément et sont isolés par une paroi solide qui empêche tout mélange. La chaleur traverse cette paroi principalement par conduction, tandis que la convection intervient entre chaque fluide et la surface d'échange.[5]

Dans la pratique, chaque fluide circule dans son propre circuit. Le fluide chaud, par exemple de l'eau chaude, s'écoule dans un tube ou un serpentín, alors que le fluide froid circule dans un passage voisin. Au cours de l'écoulement, la chaleur est transmise à travers la paroi du tube. Le

fluide chaud perd ainsi une partie de son énergie thermique, alors que le fluide froid se réchauffe progressivement.

L'importance du transfert de chaleur dépend surtout de la différence de température entre les deux fluides, mais aussi des propriétés des fluides et des matériaux utilisés. Les échangeurs de chaleur sont généralement conçus pour assurer un bon transfert thermique tout en limitant les pertes de charge dans les circuits.[3]

3.3 Différents types d'échangeurs

Il existe plusieurs types d'échangeurs de chaleur, chacun conçu pour répondre aux exigences spécifiques du transfert thermique et aux caractéristiques des fluides utilisés. Parmi ces types, nous aborderons les principaux :[1]

- ✓ *les échangeurs à plaques*
- ✓ *les échangeurs tubulaires*
- ✓ *les échangeurs à ailettes*

- **Echangeur à plaques**

L'utilisation des échangeurs de chaleur à plaques a considérablement augmenté dans les applications industrielles, ainsi que dans les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC).

Ces échangeurs sont constitués de plusieurs plaques métalliques disposées à quelques millimètres d'entraxe, à travers lesquelles circulent deux fluides distincts. L'étanchéité entre les plaques est assurée par des joints soigneusement positionnés, empêchant toute fuite ou mélange entre les différentes zones de l'échangeur. Contrairement aux plaques planes, celles-ci présentent des ondulations qui, une fois assemblées, génèrent des zones en chevrons favorisant un écoulement turbulent des fluides.[6]

Cette configuration, combinée à la surface d'étanchéité en contact avec les joints, assure une distribution homogène du fluide sur l'ensemble de la surface d'échange. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de plaques se traduit par une surface d'échange thermique plus thermique.[1]

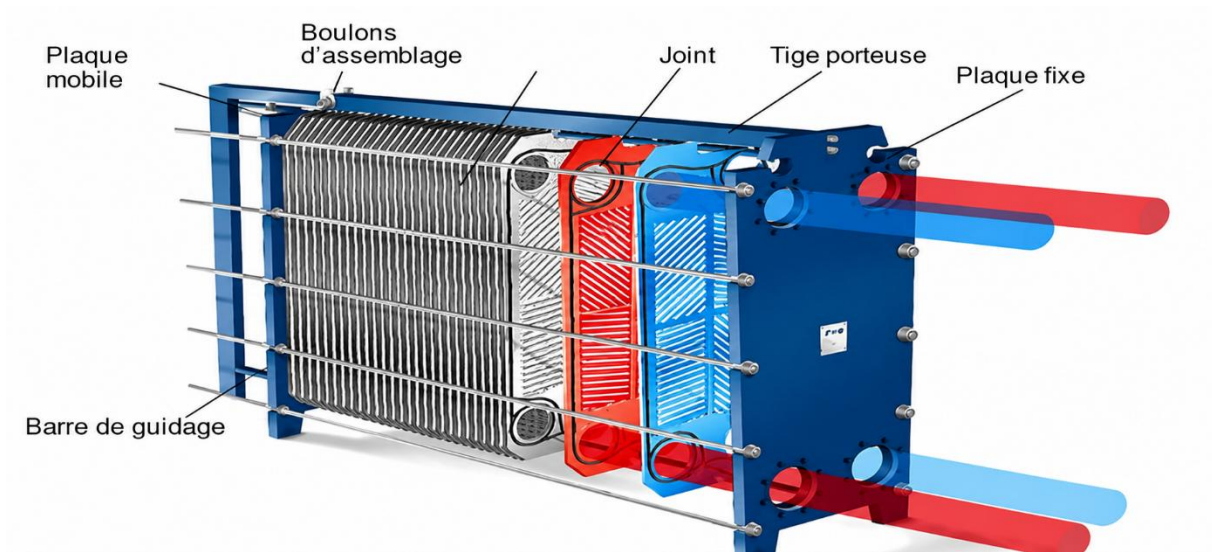


Figure 1. 6:Schéma de fonctionnement d'un échangeur de chaleur à plaques. [1]

- **Echangeurs tubulaires**

Un échangeur tubulaire simple se compose de deux tubes cylindriques coaxiaux. En général, le fluide chaud circule dans le tube intérieur, tandis que le fluide froid circule dans l'espace annulaire entre les deux tubes. Le transfert de chaleur s'opère à travers la paroi du tube intérieur, qui constitue la surface principale d'échange thermique.[5]

Ces échangeurs peuvent se présenter sous plusieurs configurations :

- 1) Tube unique (serpentin).
- 2) Double-tube coaxial (échangeur bitube).
- 3) faisceau tubulaire et calandre.

➤ ***Echangeur Tube unique***

Un échangeur à tube unique, souvent appelé serpentin, est constitué d'un seul conduit enroulé ou droit, dans lequel circule un fluide (chaud ou froid). La surface externe du tube est en contact avec l'autre fluide, permettant ainsi un transfert thermique par convection et conduction à travers la paroi.[2]

Cette configuration est simple et compacte, adaptée aux systèmes où la différence de température est modérée et où les débits des fluides ne nécessitent pas de structures complexes.

Elle est largement utilisée pour des applications de chauffage, refroidissement ou préchauffage de fluides, où un échange thermique efficace et contrôlable est recherché.[5]

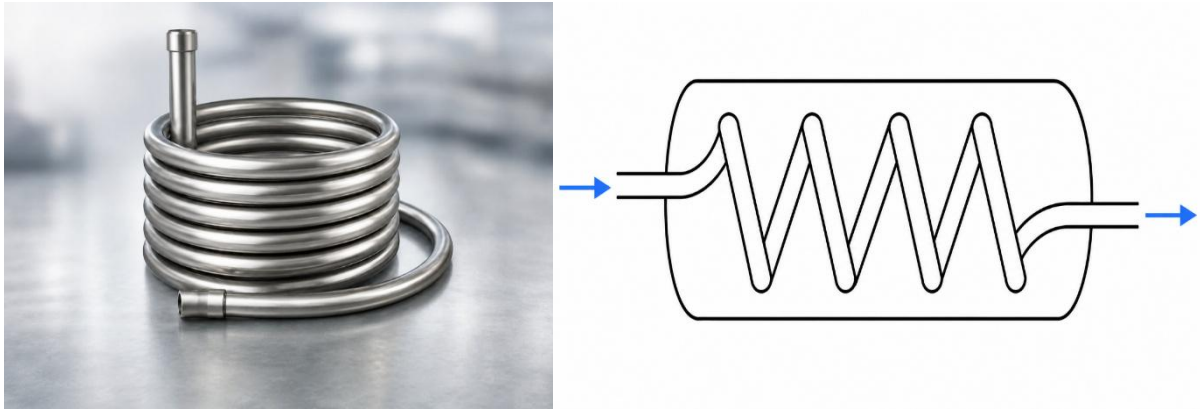


Figure 1. 7:Echangeur tube unique. [3]

➤ *Echangeur Double-tube coaxial*

L'échangeur bitube constitue une configuration particulière de la famille des échangeurs tubulaires. Il se caractérise par une conception simple reposant sur deux tubes coaxiaux, à l'intérieur desquels circulent deux fluides distincts, thermiquement couplés mais séparés physiquement. Le transfert thermique s'effectue principalement par conduction à travers la paroi du tube interne, puis par convection de part et d'autre de celle-ci, sous l'effet du gradient de température.[7]

Grâce à sa géométrie élémentaire, ce type d'échangeur présente une grande facilité de mise en œuvre et un bon niveau de fiabilité pour des débits modérés. Il est particulièrement adapté aux applications exigeant une séparation rigoureuse des fluides, notamment lorsque la prévention des risques de contamination croisée est primordiale. Par ailleurs, l'échangeur bitube peut fonctionner selon une configuration à co-courant ou à contre-courant, cette dernière étant généralement plus favorable en termes de performance thermique et d'efficacité de l'échange.[1]

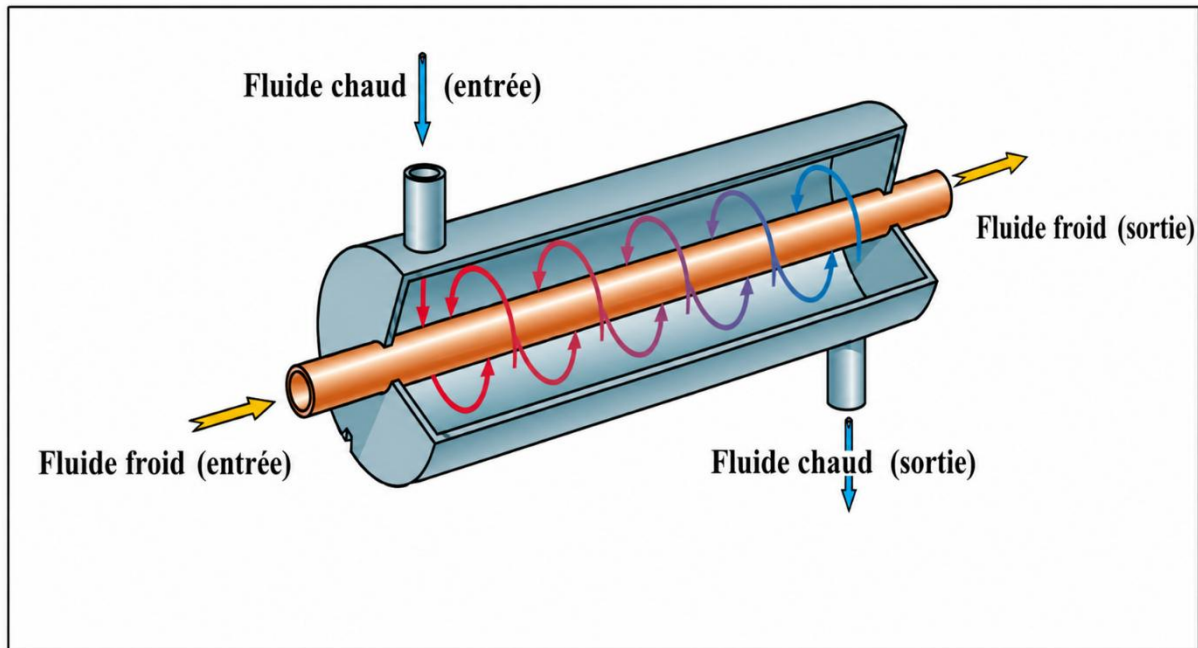


Figure 1. 8:Echangeur Double tube coaxial. [3]

➤ *Echangeur à faisceau tubulaire et calandre*

Les échangeurs à faisceau tubulaire, aussi connus sous l'appellation tubes et calandre, sont largement employés dans les procédés industriels, notamment dans les secteurs chimique et pétrochimique. Leur utilisation fréquente est liée à leur conception simple, leur bonne résistance aux contraintes thermiques et leur facilité d'adaptation à différentes conditions de fonctionnement.

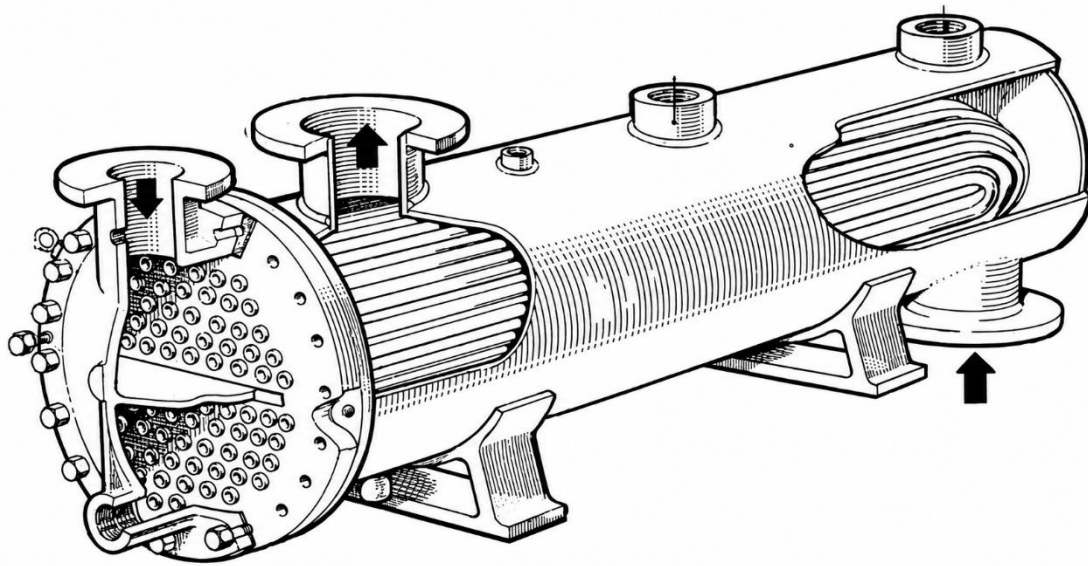


Figure 1. 9:Echangeur a faisceau tubulaire et calandre à tubes en U. [5]

Ce type d'échangeur est constitué d'un ensemble de tubes disposés à l'intérieur d'une calandre cylindrique. Un fluide circule à l'intérieur des tubes tandis que l'autre s'écoule dans la calandre autour du faisceau. Le transfert de chaleur se fait à travers la paroi des tubes, sous l'effet de la différence de température entre les deux fluides. Afin d'améliorer l'échange thermique, des chicanes sont installées dans la calandre pour orienter l'écoulement du fluide externe et limiter les zones de faible échange. La circulation du fluide interne est assurée par des boîtes de distribution, pouvant être organisées en une ou plusieurs passes.[1]

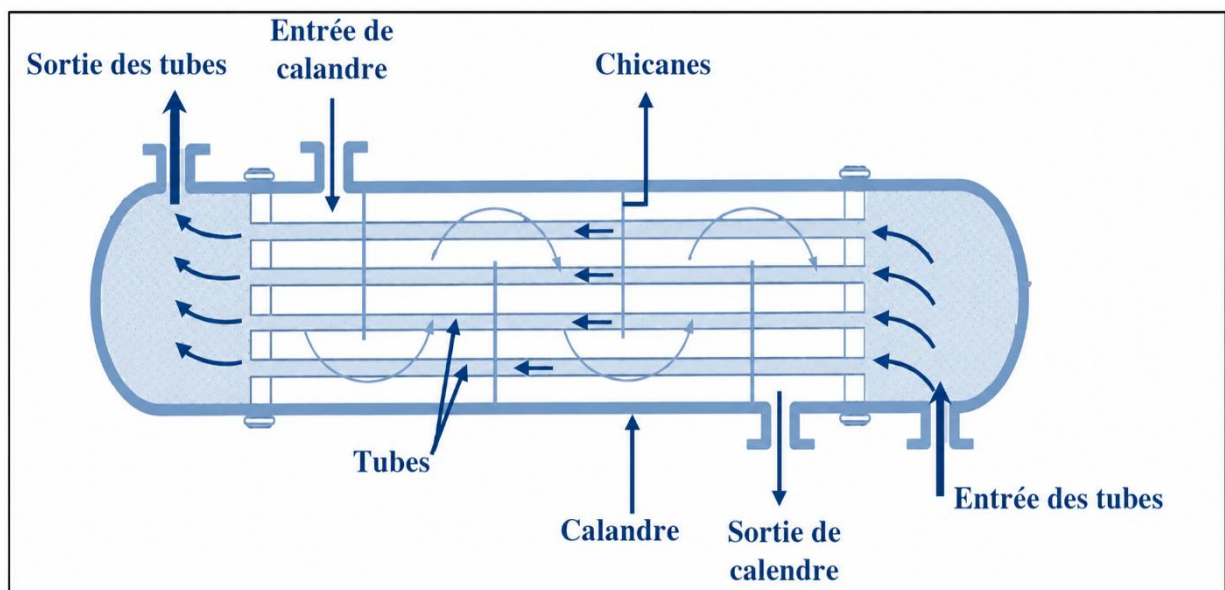


Figure 1. 10:Echangeur a faisceau tubulaire et calandre à tubes droits. [3]

- **Echangeur à ailettes**

Les échangeurs de chaleur à ailettes sont utilisés pour chauffer ou refroidir un liquide à l'aide d'un gaz, ou inversement. Ils sont particulièrement adaptés lorsque l'un des deux fluides est un gaz, car les gaz ont un transfert de chaleur plus faible que les liquides, et les ailettes permettent d'améliorer l'efficacité de l'échange thermique.

Ces échangeurs peuvent fonctionner avec différents fluides, tels que l'eau, la saumure, la vapeur, les huiles (hydraulique, de lubrification), ainsi que les fluides frigorigènes en phase de condensation ou d'évaporation.[5]

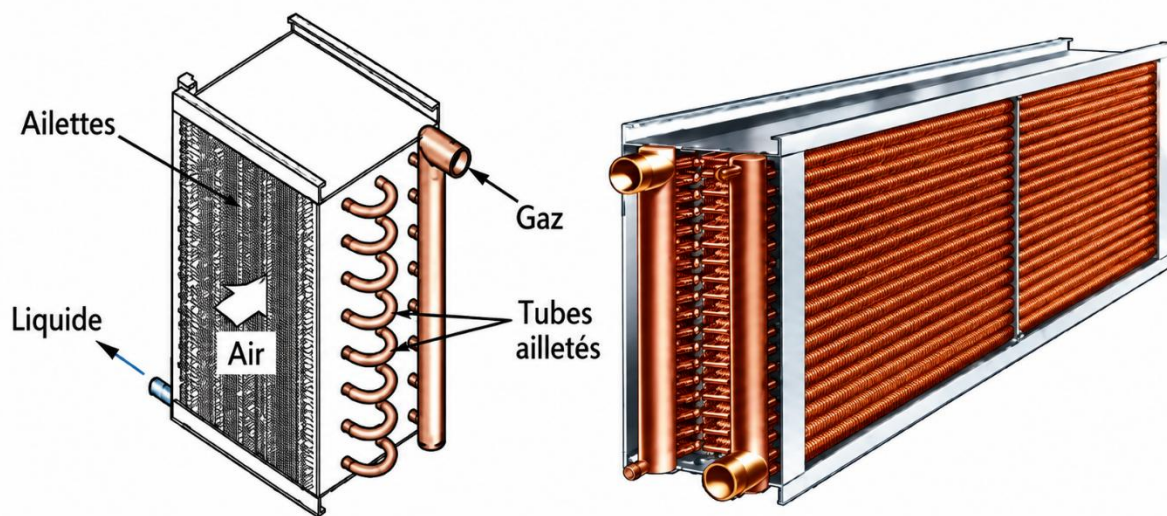


Figure 1. 11:Echangeur à ailettes.[2]

4. Classification des échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés selon différents critères, dont les principaux sont présentés ci-dessous :

4.1 Selon le type de contact

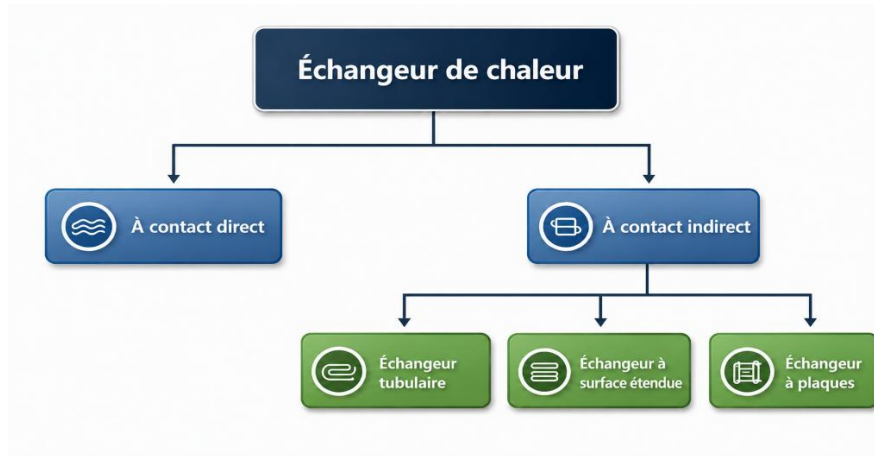


Figure 1. 12: Classification générale des échangeurs de chaleur[4]

• *Échangeurs à contact indirect*

Dans les échangeurs de chaleur à contact indirect, les deux fluides ne se mélangent pas. Ils sont séparés par une paroi solide à travers laquelle la chaleur est transférée. Ce type d'échangeur est utilisé lorsque le contact direct entre les fluides n'est pas souhaité, notamment pour des raisons de sécurité ou pour éviter toute contamination. On rencontre principalement ce mode de transfert dans les échangeurs à surface, ainsi que dans certaines configurations régénératives ou à lit fluidisé.[3]

• *Échangeurs à contact direct*

Les échangeurs de chaleur à contact direct fonctionnent par la mise en contact direct de deux fluides. L'échange thermique se produit alors rapidement, car il n'existe pas de paroi séparatrice entre eux. Dans ce cas, un mélange partiel ou total des fluides peut avoir lieu, selon la conception de l'échangeur et les conditions de fonctionnement. Ce type d'échange est généralement utilisé lorsque le mélange des fluides ne pose pas de problème pour le procédé.[1]

4.2 Selon la nature du matériau de la paroi d'échange

Les échangeurs de chaleur peuvent être fabriqués à partir de :[3]

- **matériaux métalliques** : tels que l'acier, le cuivre, l'aluminium ou des superalliages et métaux réfractaires.
- **matériaux non métalliques** : comme le plastique, la céramique, le graphite ou le verre

4.3 Selon la compacité de l'échangeur

Les échangeurs de chaleur peuvent également être classés selon leur compacité, qui représente la surface d'échange rapportée au volume de l'échangeur :

- **Les échangeurs compacts**

Les échangeurs compacts se définissent par leur capacité à transmettre une grande quantité de chaleur malgré leur petit volume, en raison d'une surface d'échange thermique élevée par rapport au volume. Ils sont notamment utilisés lorsque l'espace est limité ou lorsque l'échange de chaleur doit se faire rapidement, comme c'est le cas des échangeurs à plaques ou à ailettes.[1]

- **Les échangeurs non compacts**

Présentent une densité de surface plus faible et nécessitent donc un volume plus important pour transférer la même quantité de chaleur. Leur rendement en termes de rapport surface/volume est nettement inférieur, mais ils offrent une durabilité et une facilité d'entretien supérieures aux échangeurs de chaleur tubulaires ou à faisceau tubulaire classiques.[4]

4.4 Selon le type de l'écoulement

- *Les échangeurs de chaleur à écoulement co-courant*

Dans ce type d'échangeur, les fluides chaud et froid entrent par la même extrémité et circulent dans la même direction. Le fluide froid reste toujours plus froid que le fluide chaud à la sortie, et les températures des deux fluides évoluent progressivement le long de l'échangeur.[1]

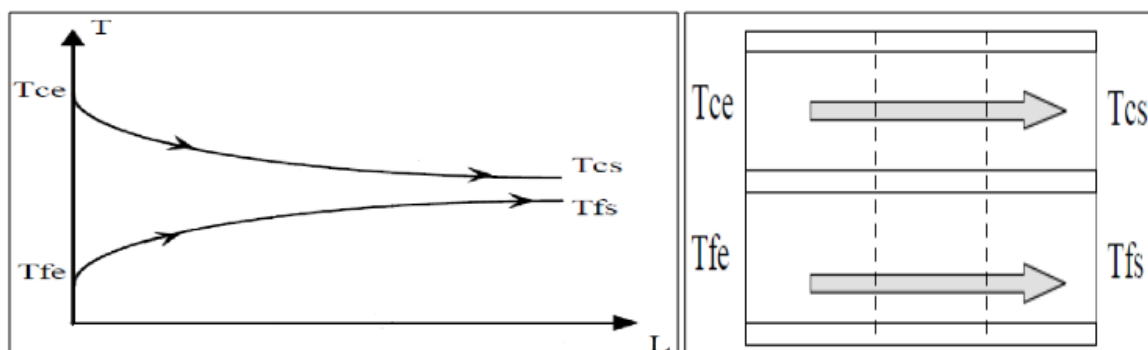


Figure 1. 13:Profil de température et le sens de l'écoulement dans un échangeur co-courant.[3]

- *Les échangeurs de chaleur à écoulement contre-courant*

. Ici, les fluides circulent en sens opposé, ce qui peut permettre au fluide froid d'atteindre une température parfois supérieure à celle du fluide chaud sortant . Cette configuration est thermiquement plus efficace et maximise le transfert de chaleur. [5]

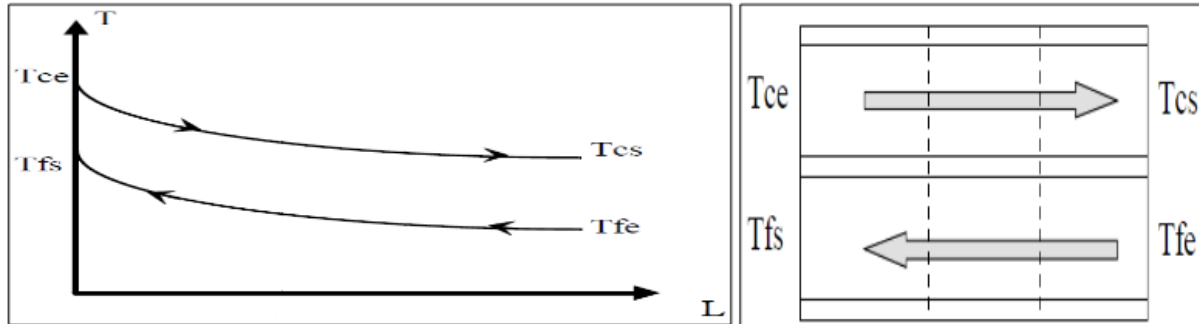


Figure 1. 14:Profil de température et le sens de l'écoulement dans un échangeur contre-courant.[3]

- *Les échangeurs de chaleur à écoulement croisé*

Dans ce cas, un fluide traverse la surface d'échange perpendiculairement à l'autre. Le fluide canalisé circule dans des canaux étroits, tandis que l'autre fluide est partiellement mélangé par des tourbillons, ce qui assure un transfert thermique efficace[3]

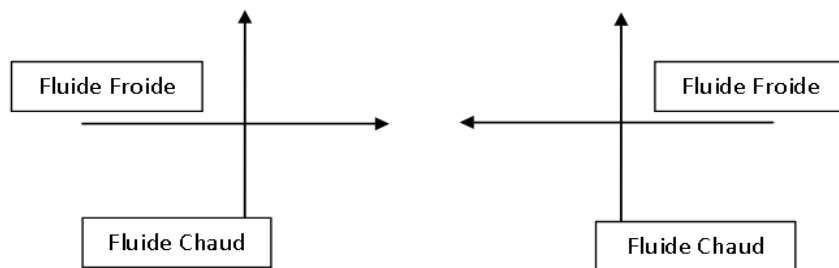


Figure 1. 15:Echangeur à courants croisés .[5]

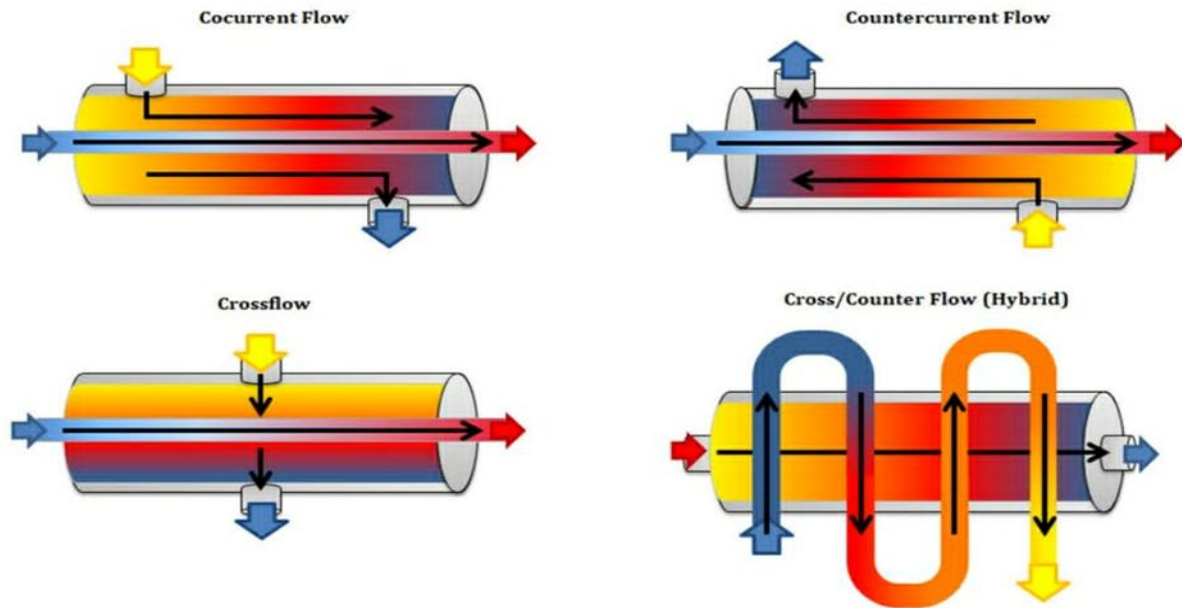


Figure 1. 16: Types d'écoulement.[7]

4.5 Selon le type d'échange

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés selon la présence ou non d'un changement de phase des fluides au cours de l'échange thermique. On distingue ainsi les échangeurs sans changement de phase et ceux avec changement de phase :

- *Échangeur de chaleur sans changement de phase*

Dans ce type d'échangeur, les deux fluides restent dans le même état physique tout au long du transfert thermique. La chaleur passe progressivement d'un fluide à l'autre, entraînant une variation continue de leurs températures sans condensation ni vaporisation.[2]

- *Échangeur de chaleur à changement de phase*

Ici, un des fluides subit une condensation ou une vaporisation, comme dans les évaporateurs, les condenseurs ou les systèmes frigorifiques. Par exemple :

- Un fluide se condense en cédant sa chaleur, tandis que l'autre se vaporise, comme dans les systèmes frigorifiques.
- Le fluide secondaire se vaporise sous l'effet de la chaleur fournie par un fluide primaire restant dans le même état ; il s'agit d'un évaporateur.
- Le fluide primaire se condense en transférant sa chaleur latente à un fluide secondaire plus froid, sans changement d'état de ce dernier.[1]

5. Domaines d'application des échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur interviennent dans un large éventail d'activités industrielles où la gestion thermique joue un rôle essentiel. Ils sont employés, par exemple, pour le traitement thermique de produits sensibles, comme le lait lors des opérations de pasteurisation, mais aussi pour la régulation thermique de fluides visqueux au cours de leur transformation. On les retrouve également dans les procédés de conditionnement thermique des fluides, tels que le préchauffage ou le refroidissement avant certaines étapes de production.

Par ailleurs, les échangeurs de chaleur occupent une place importante dans les systèmes de valorisation de l'énergie thermique, de réduction de l'humidité, ainsi que dans les opérations impliquant des changements d'état, comme l'évaporation, la congélation ou la fusion. Enfin, ils sont largement utilisés pour la dissipation thermique des équipements électroniques, afin d'assurer leur bon fonctionnement et leur fiabilité.[5]

6. Conclusion

Le transfert de chaleur constitue un phénomène fondamental en génie thermique, intervenant dans de nombreuses applications industrielles et domestiques. À travers ses trois modes principaux — la conduction, la convection et le rayonnement — il permet de comprendre et de maîtriser les échanges énergétiques entre les différents systèmes. Les échangeurs de chaleur représentent des équipements essentiels permettant de transférer efficacement l'énergie thermique entre deux fluides sans mélange. Leur diversité de conception (à plaques, tubulaires, à ailettes) ainsi que leurs différentes classifications (selon le contact, l'écoulement, la compacité ou le changement de phase) offrent des solutions adaptées à une large gamme d'applications. Enfin, leur utilisation dans plusieurs domaines, tels que l'industrie, l'énergie, l'agroalimentaire ou le refroidissement des équipements, souligne leur importance dans l'optimisation des performances énergétiques, la réduction des pertes thermiques et l'amélioration de l'efficacité des systèmes thermiques.[3]

Chapitre 02 :
Généralité et Etude bibliographique sur les
nanofluides

Introduction

Les systèmes de transfert de chaleur jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines industriels tels que la production d'énergie, les systèmes de refroidissement électroniques, l'industrie chimique et les échangeurs thermiques. Les fluides caloporteurs conventionnels tels que l'eau, l'huile et l'éthylène glycol sont largement utilisés dans ces systèmes. Cependant, ces fluides possèdent généralement une faible conductivité thermique, ce qui limite l'efficacité globale du transfert de chaleur.

Afin d'améliorer les performances thermiques de ces fluides, les chercheurs ont développé une nouvelle classe de fluides appelée nanofluides. Le concept de nanofluide a été introduit pour la première fois par Choi [8] en (1995) au laboratoire national d'Argonne. Les nanofluides sont des suspensions stables de nanoparticules solides dans un fluide de base. Les nanoparticules utilisées ont généralement une taille comprise entre 1 et 100 nanomètres. L'ajout de nanoparticules dans les fluides de base permet d'améliorer plusieurs propriétés thermo-physiques, notamment la conductivité thermique, la diffusivité thermique et le coefficient de transfert de chaleur. Ces améliorations permettent d'augmenter l'efficacité énergétique des systèmes thermiques.[8]

1. Définition des nanofluides

Un nanofluide est défini comme une suspension colloïdale composée d'un fluide de base dans lequel sont dispersées des nanoparticules solides. Les fluides de base les plus utilisés sont l'eau, l'éthylène glycol, l'huile et les mélanges eau-éthylène glycol.[9]

Les nanoparticules peuvent être classées selon leur composition :

- Métaux : cuivre (Cu), argent (Ag), or (Au)
- Oxydes métalliques : Al_2O_3 , TiO_2 , CuO
- Carbones : nanotubes de carbone (CNT), graphène

L'amélioration des propriétés thermiques des nanofluides est principalement due à la grande surface spécifique des nanoparticules et à leur forte conductivité thermique.[10]

La définition des nanofluides a été introduite par Choi (1995), qui les décrit comme des fluides contenant des nanoparticules dispersées dans un fluide de base afin d'améliorer les propriétés thermiques.[9]

2. Historique et développement des nanofluides

Les recherches sur les nanofluides ont connu une croissance rapide depuis les années 1990. Après l'introduction du concept par Choi en 1995, plusieurs études expérimentales ont montré une augmentation significative de la conductivité thermique.[8]

En 2001, Eastman et ses collaborateurs ont observé une augmentation remarquable de la conductivité thermique d'un nanofluide à base d'éthylène glycol contenant des nanoparticules de cuivre.[11] Par la suite, Buongiorno (2006) a proposé un modèle théorique expliquant le transport des nanoparticules dans les nanofluides. [12]

Aujourd'hui, les nanofluides sont étudiés dans plusieurs domaines scientifiques et industriels, notamment les échangeurs de chaleur, les systèmes solaires thermiques et le refroidissement électronique.[13]

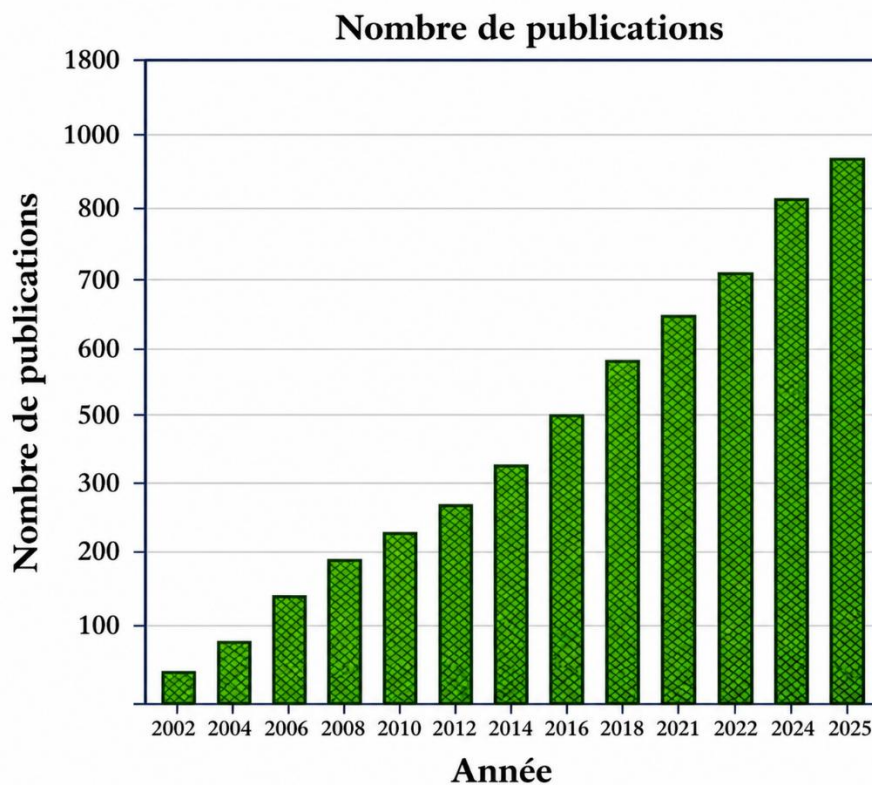


Figure 2.1: Nombre annuel de publication sur les nanofluides (2002-2025)

3. Propriétés thermo-physiques des nanofluides

Les propriétés thermo-physiques des nanofluides jouent un rôle crucial dans leur performance thermique, notamment dans les applications de transfert de chaleur. Ces propriétés dépendent

principalement de la fraction volumique des nanoparticules et des caractéristiques du fluide de base.[10]

1) La Conductivité thermique

La conductivité thermique des nanofluides est généralement supérieure à celle du fluide de base, ce qui améliore le transfert de chaleur. Cette amélioration est attribuée au mouvement brownien des nanoparticules et aux effets de micro-convection.[14]

Le modèle classique de Maxwell est souvent utilisé pour estimer la conductivité thermique [8], [15]

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{(k_{np} + 2k_{bf} - 2\phi(k_{bf} - k_{np}))}{(k_{np} + 2k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_{np}))} \dots\dots\dots(1)$$

Relation de Maxwell modifiées adaptée au cas des nanofluides hybrides :

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \left(\frac{\frac{\phi_1 k_{np1} + \phi_2 k_{np2}}{\phi} + 2(1-\phi)k_{bf} - 2(\phi_1 k_{np1} + \phi_2 k_{np2})}{\frac{\phi_1 k_{np1} + \phi_2 k_{np2}}{\phi} + (2+\phi)k_{bf} - (\phi_1 k_{np1} + \phi_2 k_{np2})} \right) \dots\dots\dots(2)$$

Où :

- k_{nf} : la Conductivité thermique du nanofluide (W/m·K).
- k_{bf} : la Conductivité thermique du fluide de base (W/m·K).
- k_{np} : la Conductivité thermique des nanoparticules (W/m·K).
- k_{np1} : La conductivité thermique des nanoparticules de type 1 (W/m·K).
- k_{np2} : La conductivité thermique des nanoparticules de type 2 (W/m·K).
- ϕ : Fraction volumique du nanofluide dans le fluide de base (%).
- ϕ_1 : la fraction volumique des nanoparticules de type 1 (%).
- ϕ_2 : la fraction volumique des nanoparticules de type 2 (%).

2) La Viscosité

L'ajout de nanoparticules augmente généralement la viscosité, ce qui peut influencer les pertes de charge et la puissance de pompage.[16]

Le modèle d'Einstein (valable pour faibles concentrations) est donné par :

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5 \phi) \dots\dots\dots(3)$$

- μ_{nf} : La Viscosité dynamique du nanofluide Pa·s (kg/m·s).
- μ_{bf} : La Viscosité du fluide de base Pa·s (kg/m·s).

3) La Densité

La densité d'un nanofluide dépend de la densité des nanoparticules et de la fraction volumique utilisée.[17]

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_{bf} + \varphi \rho_{np} \dots \dots \dots (3)$$

- ρ_{nf} : La Densité du nanofluide(kg/m³).
- ρ_{bf} : La Densité du fluide de base (kg/m³).
- ρ_{np} : La Densité des nanoparticules(kg/m³).

4) Chaleur spécifique

La chaleur spécifique détermine la capacité du fluide à stocker l'énergie thermique.[17]

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_{bf} + \varphi (\rho C_p)_{np} \dots \dots \dots (4)$$

Ou:

- $C_{p\ nf}$: La Chaleur spécifique du nanofluide J/(kg·K).
- $C_{p\ bf}$: La Chaleur spécifique du fluide de base J/(kg·K).
- $C_{p\ np}$: La Chaleur spécifique des nanoparticules J/(kg·K).

Les propriétés thermo-physiques des nanofluides résultent d'un compromis entre :
amélioration de la conductivité thermique (avantage),
augmentation de la viscosité (inconvenient).

Le choix optimal de la fraction volumique et du type de nanoparticules est donc essentiel pour maximiser les performances thermiques tout en limitant les pertes hydrauliques. [17]

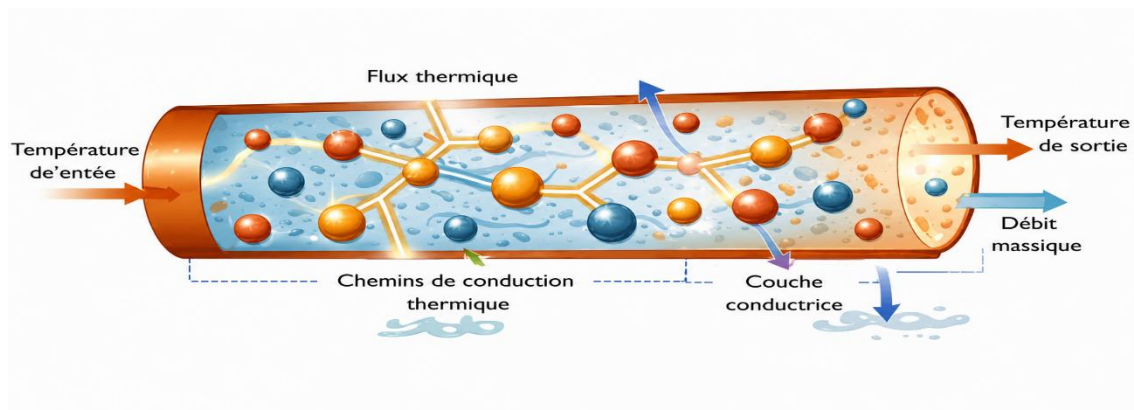


Figure 2. 2:Mécanisme d'amélioration du transfert du chaleur dans un nanofluide.[18]

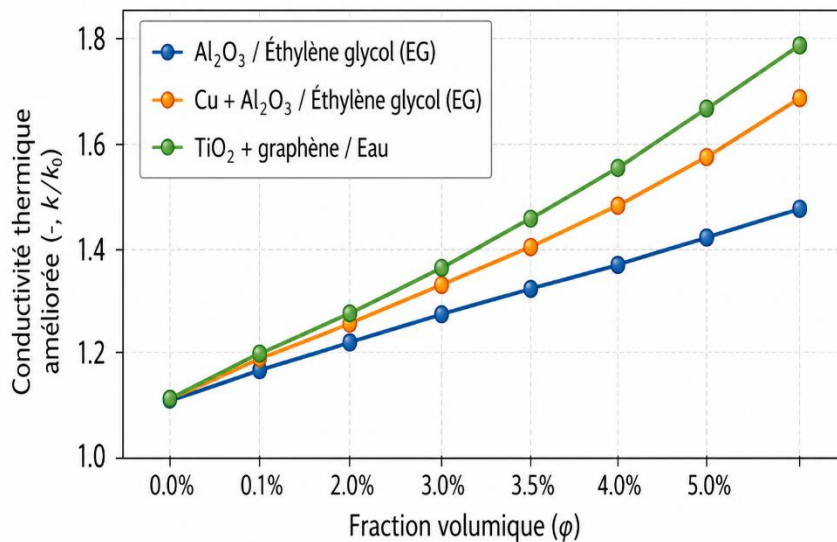


Figure 2. 3:Relation entre la conductivité thermique et la fraction volumique des nanoparticules. [18]

4. Méthodes de préparation des nanofluides

La préparation des nanofluides peut être réalisée selon deux méthodes principales : la méthode en une étape et la méthode en deux étapes.[19]

- **Méthode en une étape**

Dans cette méthode, les nanoparticules sont synthétisées directement dans le fluide de base, ce qui permet d'obtenir une dispersion homogène.[20], [21]

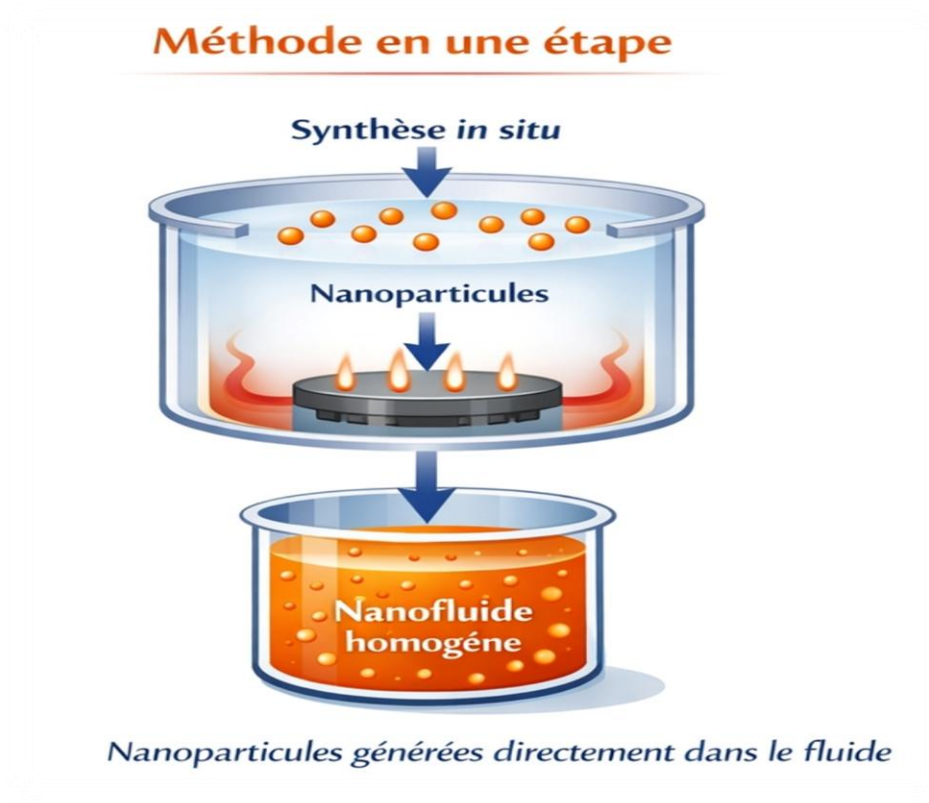


Figure 2. 4: Méthode de préparation des nanofluides en une étape. [18]

- **Méthode en deux étapes**

Cette méthode consiste à produire d'abord les nanoparticules sous forme de poudre, puis à les disperser dans le fluide à l'aide d'agitation mécanique ou ultrasonique.[20]

Méthode en deux étapes



Figure 2. 5: Méthode de préparation des nanofluides en deux étapes.[18]

5. Stabilité des nanofluides

La stabilité est un facteur essentiel pour l'utilisation pratique des nano fluides. Une mauvaise stabilité peut provoquer l'agglomération et la sédimentation des nanoparticules.[20]

Pour améliorer la stabilité des nano fluides, plusieurs techniques peuvent être utilisées :

- l'ultrasonication
- l'ajoute de tensioactifs
- la modification chimique des surfaces des nanoparticules

6. Les Nanofluides hybrides

6.1 Définition

Les nanofluides hybrides sont une nouvelle génération de fluides de transfert thermique obtenus en dispersant deux types différents ou plus de nanoparticules dans un fluide de base comme l'eau, l'éthylène-glycol ou l'huile.

L'objectif est de combiner les propriétés de plusieurs nanoparticules afin d'améliorer les caractéristiques thermiques du fluide (conductivité thermique, coefficient de transfert de chaleur, stabilité, etc.). [22]

Contrairement aux nanofluides classiques, qui contiennent un seul type de nanoparticule, les nanofluides hybrides permettent d'obtenir un effet synergique entre les particules, ce qui améliore la performance thermique dans les systèmes énergétiques et industriels. [22]

6.2 Composition d'un nanofluide hybride

Un nanofluide hybride se définit comme une suspension colloïdale composée principalement de trois éléments essentiels :

Un fluide de base, une première nanoparticule et une seconde nanoparticule. Le fluide de base peut être de nature variée, tel que l'eau (H_2O), l'éthylène-glycol ou encore une huile thermique, choisi en fonction de l'application visée. À ce fluide sont ajoutées deux types de nanoparticules, par exemple l'oxyde d'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de cuivre (CuO) pour la première catégorie, et l'argent (Ag), les nanotubes de carbone (CNT) ou encore la silice (SiO_2) pour la seconde.

Ces nanoparticules sont dispersées à l'échelle nanométrique dans le fluide de base, ce qui permet d'améliorer significativement ses propriétés thermophysiques, notamment la conductivité thermique et les performances de transfert de chaleur [21].

Plusieurs exemples de nanofluides hybrides illustrent ces améliorations.

Le nanofluide Al_2O_3 - CuO /eau, par exemple, associe l'oxyde d'alumine et l'oxyde de cuivre dans un fluide aqueux, ce qui conduit à une amélioration notable du transfert thermique. Ce type de nanofluide est largement utilisé dans les échangeurs de chaleur et les systèmes thermiques, et des études expérimentales ont démontré une augmentation des performances thermiques par rapport aux fluides conventionnels [22][23].

De même, le nanofluide TiO_2 - Ag /eau se distingue par une conductivité thermique élevée et une bonne stabilité, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications de refroidissement électronique et aux systèmes photovoltaïques. Certaines études indiquent que l'ajout de

nanoparticules hybrides peut améliorer la conductivité thermique de plus de 20 % dans certains cas [24].

Le nanofluide CNT- Al_2O_3 /eau, combinant les nanotubes de carbone avec l'oxyde d'alumine, présente une conductivité thermique très élevée ainsi qu'une amélioration significative du coefficient de transfert de chaleur. Il est notamment utilisé dans le refroidissement des composants électroniques et dans les systèmes d'énergie solaire [25][26].

6.3 Applications des nano fluides

Les nano fluides possèdent un large éventail d'applications industrielles.[15]

- **Les Échangeurs de chaleur**

Ils permettent d'augmenter le coefficient de transfert thermique et d'améliorer l'efficacité énergétique.

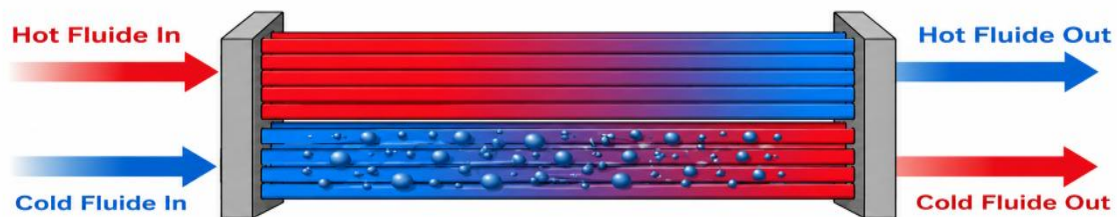


Figure 2. 6: Les nanofluides dans un échangeur de chaleur.[8]

- **L'Énergie solaire**

Les nanofluides sont utilisés dans les capteurs solaires pour améliorer l'absorption de l'énergie solaire



Collecteur solaire avec nanofluide

Figure 2. 7:Capteur solaire à nanofluides. [23]

- **Refroidissement des microprocesseurs**

Les nanofluides contenant des nanoparticules de cuivre ou d'aluminium améliorant le refroidissement des puces électroniques .[24]

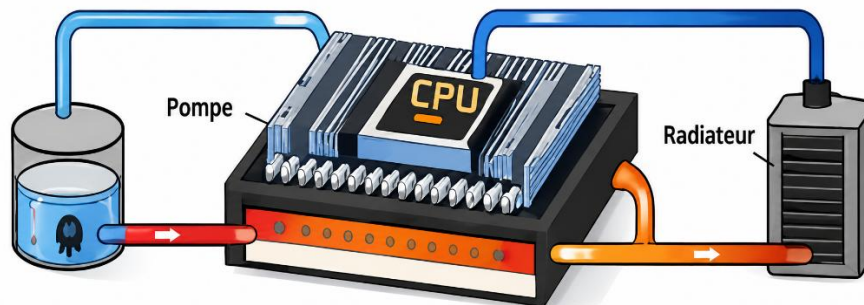


Figure 2. 8:Refroidissement des microprocesseurs .[24]

- **Le Refroidissement électronique**

Nano fluides utilisée pour refroidir équipement électronique de haute puissance que serveurs et unités de télécommunication

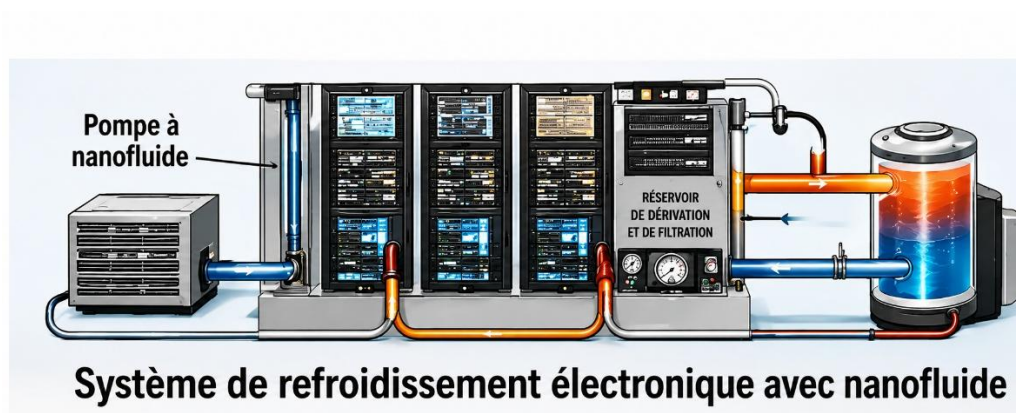


Figure 2. 9:Système de refroidissement électronique avec nanofluide. [25]

- **L'industrie automobile**

Les nanofluides peuvent améliorer les performances des radiateurs et des systèmes de refroidissement des moteurs.[15]



Refroidissement du moteur avec nanofluid

Figure 2. 10:Refroidissement du moteur par nanofluid.[15]

- **Climatisation et HVAC**

Utilisation de nanofluides dans les systèmes de climatisation pour réduire la consommation énergétique et améliorer la performance.[26]



Figure 2. 11:Climatisation et HVAC .[26]

L'amélioration des propriétés thermiques peut atteindre 10 à 40 % selon le type de nanoparticules et la concentration.[27]

7. L'utilisation des Nanofluides dans les échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur représentent une application majeure des nanofluides, dont l'utilisation améliore significativement le coefficient de transfert thermique. Dans les échangeurs bitubes, ils permettent d'optimiser la performance thermique tout en réduisant la taille de l'équipement, bien que l'augmentation de la viscosité et les pertes de charge doivent être prises en compte.[15]

Chapitre 02 : Généralité et Etude bibliographique sur les nanofluides

Les nanofluides hybrides constituent une évolution des fluides caloporteurs, obtenus par la dispersion de deux ou plusieurs types de nanoparticules dans un fluide de base (eau, éthylène-glycol, huile). Cette combinaison exploite les effets synergiques des particules pour améliorer les propriétés thermo-physiques, telles que la conductivité thermique, la stabilité et l'efficacité de transfert de chaleur. Contrairement aux nanofluides mono-particulaires, ils favorisent la formation d'un réseau thermique plus efficace grâce aux interactions entre les différentes nanoparticules.

Des recherches expérimentales et numériques ont montré que les nanofluides hybrides, tels que $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO/eau}$ ou $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{/eau}$, augmentent significativement le coefficient de transfert thermique et le nombre de Nusselt par rapport aux nanofluides classiques ou au fluide de base. Ces performances améliorées expliquent l'intérêt croissant pour leur utilisation dans les échangeurs de chaleur, les radiateurs automobiles, les systèmes solaires thermiques et le refroidissement électronique, où l'optimisation du transfert thermique est cruciale.[28]

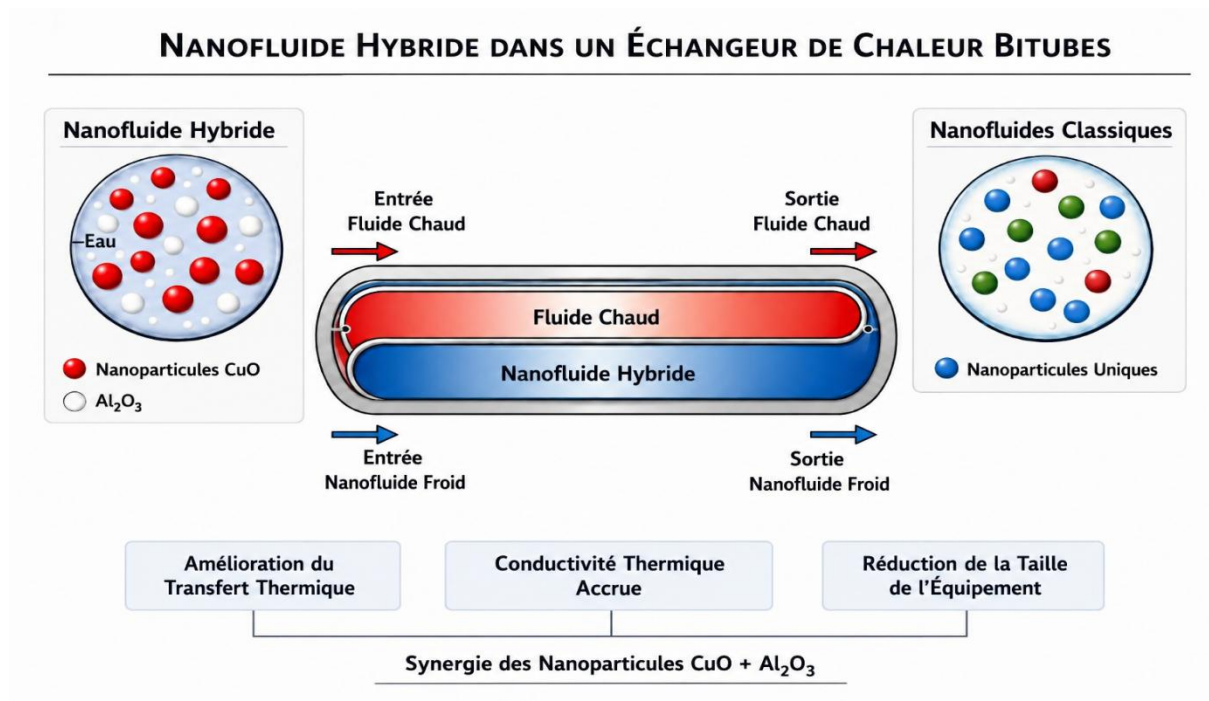


Figure 2. 12: Nanofluides hybrides dans un échangeur de chaleur bitubes .[28]

8. L'utilisation des nanofluides hybrides dans les échangeurs de chaleur

(Brakna & Benzenine, 2024) ont mené une analyse numérique portant sur différents nanofluides hybrides, notamment MgO-MWCNT et $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MWCNT}$, employés dans de l'huile et testés sous diverses concentrations volumiques et ratios de nanoparticules. Selon leurs résultats, l'utilisation de ces nanofluides hybrides a permis d'améliorer de manière significative le taux

de transfert thermique ainsi que le coefficient global d'échange par rapport à l'utilisation d'un fluide simple. Ils ont également observé que toute augmentation du débit ou de la concentration en nanoparticules renforçait davantage l'efficacité du transfert de chaleur. Les auteurs rapportent que le taux maximal de transfert thermique, atteignant 77.8 %, a été obtenu avec le nanofluide hybride Al_2O_3 -MWCNT/huile à une concentration de 0.5 %. Par ailleurs, pour la même concentration avec MgO-MWCNT/huile, le coefficient global d'échange thermique a montré une amélioration notable, atteignant respectivement 76.26 % et 100.82 % pour les deux nanofluides hybrides étudiés. Ils soulignent également que le ratio optimal de nanoparticules pour le nanofluide Al_2O_3 -MWCNT/huile est de (25:75) et que son utilisation comme fluide chaud dans le tube intérieur a permis de maximiser le transfert thermique dans l'échangeur bitube. Enfin, les auteurs concluent que l'emploi du nanofluide hybride Al_2O_3 -MWCNT/huile, avec une concentration volumique de 0.5 % et un ratio (25:75), améliore nettement les performances thermiques d'un échangeur bitube, ce qui le rend particulièrement prometteur pour des applications industrielles diverses.[29]

(Ismael Hasan et al., 2018) ont étudié expérimentalement les performances thermiques d'un échangeur de chaleur à double tube, en considérant des écoulements parallèles et à contre-courant, et en utilisant deux types de nanofluides à base de nanoparticules d' Al_2O_3 et de TiO_2 de 20 nm de diamètre, avec de l'eau déionisée comme fluide de base. Les essais ont été réalisés pour différentes concentrations volumiques et débits, avec des températures d'entrée constantes pour les fluides chaud et froid. Les résultats ont montré que les nanofluides améliorent le transfert de chaleur par rapport à l'eau, notamment à faible débit, et que le taux de transfert thermique augmente avec la concentration en nanoparticules. L'étude a également révélé que le type de nanoparticules influence les performances, le nanofluide Al_2O_3 -eau présentant un meilleur comportement thermique que le TiO_2 -eau, avec un maximum d'amélioration du coefficient de transfert thermique atteint à une concentration volumique de 0,3%.[30]

(Ghulam ridha ali & Khalefa Kadhim, 2022) ont mené une étude numérique visant à améliorer le transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à double tube en contre-courant, équipé d'ailettes rectangulaires longitudinales sur la surface externe du tube intérieur. La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS 20.R1 en utilisant l'approche CFD et la méthode des volumes finis. L'eau chaude s'écoule dans le tube intérieur à 60 °C, tandis que l'eau froide circule dans le tube extérieur à 25 °C, sous un régime d'écoulement laminaire et pour différents débits massiques. Deux types de nanofluides à base de nanoparticules d' Al_2O_3 et de SiO_2 ont été considérés comme fluides caloporteurs dans le canal externe, avec plusieurs concentrations volumiques. Les résultats ont montré que l'augmentation de la concentration en nanofluides

améliore le coefficient de transfert thermique, le nanofluide Al_2O_3 –eau présentant les meilleures performances, au prix d’une augmentation des pertes de charge par rapport à l’eau distillée. [31]

(Chandra et al., 2025) ont étudié l’amélioration du transfert de chaleur dans un échangeur à coque et serpentin hélicoïdal en utilisant un nanofluide hybride Cu–Ni/eau sous régime turbulent. Les résultats montrent que l’augmentation de la concentration en nanoparticules et l’utilisation d’un serpentin en cuivre améliorent significativement les performances thermiques, avec seulement une légère augmentation de la perte de charge. [26]

(Kurahde et al., 2025) L’utilisation du nanofluide TiO_2 /eau améliore significativement le transfert de chaleur dans un échangeur bitube. Une concentration optimale (0,3–0,5 %) permet d’augmenter l’efficacité jusqu’à 23 %. [34]

(Kumar et al., 2025) ont montré que les nanofluides hybrides Cu–MXene améliorent significativement le transfert de chaleur dans un échangeur à double tube, malgré une légère augmentation de la perte de charge. Les nanofluides à base d’eau et de méthanol offrent les meilleures performances thermiques et un fort potentiel pour les applications industrielles. [35]

(Ali et al., 2019) Dans cette étude, on s’est penché sur la façon d’améliorer les performances thermiques d’un échangeur de chaleur à double tube en contre-courant, en utilisant un nanofluide fabriqué à partir d’huile de maïs et de nanoparticules de MgO . Pour obtenir ce nanofluide, on a simplement dispersé des nanoparticules d’oxyde de magnésium dans l’huile de maïs, à trois concentrations différentes : 0,125 %, 0,25 % et 0,5 %. Quand on regarde les résultats, ça saute aux yeux : le mélange MgO -huile transfère mieux la chaleur que l’huile seule. Plus le débit et la concentration de nanoparticules augmentent, plus le coefficient d’échange thermique grimpe. L’envers du décor, c’est qu’on observe aussi une hausse de la perte de charge et que la pompe doit fournir plus de puissance. [36]

(Mezrakchi, 2024) Cet article a expliqué la contribution de la performance thermique d’un échangeur de chaleur en calandre et tubes. Analyse réalisée avec différents nanofluides hybrides tels que CuO – ZnO –water, EG–water, CuO –EG–water, SiO_2 –EG–water et Al_2O_3 –EG–water pour de multiples vitesses d’écoulement ont été évalués. En fonction des valeurs du nombre de Reynolds, du nombre de Nusselt, du facteur de frottement et de la température de sortie. Parallèlement, L’impact du matériau des tubes, Cuivre, Acier inoxydable, Titane et Acier. Tous les nanofluides améliorent le transfert de chaleur comparé au fluide de base. Le nanofluide CuO – ZnO –eau semble être le plus performant thermiquement, abaissant la température de plus de 9 % à faible vitesse. Quand le nombre de Reynolds augmente, le nombre de Nusselt grimpe

et le facteur de frottement baisse. En plus, le cuivre s'avère être le meilleur matériau pour les tubes. [37]

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les nanofluides et les nanofluides hybrides comme une solution prometteuse pour améliorer les performances du transfert de chaleur dans les systèmes thermiques. L'ajout de nanoparticules dans un fluide de base permet d'augmenter certaines propriétés thermo-physiques importantes, notamment la conductivité thermique et le coefficient de transfert de chaleur.

Les nanofluides hybrides, obtenus par la combinaison de plusieurs types de nanoparticules, offrent des performances encore plus élevées grâce à l'effet synergique entre les particules. Plusieurs études expérimentales et numériques ont montré que leur utilisation dans les échangeurs de chaleur, en particulier les échangeurs bitubes, permet d'améliorer significativement l'efficacité thermique.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, certains défis subsistent, tels que la stabilité des suspensions, l'augmentation de la viscosité et les pertes de charge. Ainsi, des recherches supplémentaires restent nécessaires afin d'optimiser leur utilisation dans les applications industrielles et énergétiques.

Chapitre 03 :

Modèle mathématique et Simulation numérique

1. Introduction

Les échangeurs de chaleur jouent un rôle essentiel dans de nombreuses applications industrielles telles que les systèmes énergétiques, les procédés chimiques, ainsi que les installations de chauffage, ventilation et climatisation. Leur fonction principale consiste à assurer le transfert thermique entre deux fluides à différentes températures, généralement sans mélange direct.[38]

Parmi les différents types existants, l'échangeur de chaleur bitube (double pipe) se distingue par sa simplicité de conception, sa robustesse et sa capacité à fonctionner sous des conditions de pression et de température élevées. Le transfert thermique dans ce type d'échangeur s'effectue principalement par convection dans les fluides et conduction à travers la paroi séparatrice.[38]

Cependant, les performances thermiques des échangeurs conventionnels utilisant des fluides classiques (comme l'eau ou l'huile) restent limitées en raison de leur faible conductivité thermique. Afin d'améliorer l'efficacité de ces systèmes, plusieurs techniques ont été développées, notamment l'ajout d'ailettes, l'augmentation de la turbulence ou encore l'utilisation de matériaux spécifiques. Parmi ces solutions, l'utilisation des nanofluides apparaît comme une approche innovante et prometteuse.[39], [40]

Les nanofluides sont des suspensions de nanoparticules (telles que Al_2O_3 , CuO , TiO_2) dans un fluide de base, permettant d'augmenter significativement la conductivité thermique et, par conséquent, le coefficient de transfert de chaleur. De nombreuses études expérimentales et numériques ont montré que l'utilisation des nanofluides peut améliorer le transfert thermique, tout en influençant les pertes de charge.[41]

Avec le développement des outils numériques, la simulation CFD (Computational Fluid Dynamics), notamment à l'aide du logiciel ANSYS Fluent, est devenue un moyen efficace pour analyser et optimiser les performances thermiques des échangeurs sans recourir à des expériences coûteuses.

Dans ce contexte, ce chapitre vise à étudier l'amélioration de l'efficacité thermique d'un échangeur de chaleur bitube par l'utilisation de nanofluides, en s'appuyant sur une approche numérique basée sur la simulation CFD.

2. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'impact de l'utilisation des nanofluides sur les performances thermiques d'un échangeur de chaleur bitube à l'aide d'une simulation numérique sous ANSYS Fluent.[42]

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Étudier le comportement thermique et hydrodynamique d'un échangeur bitube en utilisant un fluide classique, à savoir l'eau et l'huile, comme cas de référence.[43]
- Analyser l'effet de l'introduction des nanofluides sur :
 - la distribution de température.
 - le coefficient de transfert thermique.[44]
- Évaluer l'influence des paramètres principaux tels que :
 - La fraction volumique des nanoparticules.
 - La température d'entrée.[45]
- Comparer les performances entre fluide classique et nanofluide afin de quantifier l'amélioration obtenue.[46]
- Valider les résultats obtenus par comparaison avec des travaux de la littérature scientifique.[48]

3. Présentation du code de calcul ANSYS

ANSYS est un logiciel de simulation numérique largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie pour analyser et prédire le comportement des systèmes physiques. Basé sur la méthode des volumes finis, il permet de modéliser différents phénomènes tels que le transfert de chaleur, la mécanique des fluides (CFD) et les contraintes mécaniques. Dans le cadre de ce travail, ANSYS est employé pour simuler le fonctionnement de l'échangeur de chaleur bitube, en étudiant l'influence des nanofluides sur les performances thermiques. Grâce à ses outils avancés de maillage, de résolution et de post-traitement, il offre des résultats précis et fiables, facilitant ainsi l'interprétation scientifique des phénomènes étudiés.

4. Présentation de la géométrie

4.1 Géométrie de l'échangeur de chaleur bitube

L'échangeur de chaleur étudié est un échangeur de type bitube amélioré, constitué de deux tubes concentriques avec des ailettes longitudinales internes fixées sur le tube central afin d'augmenter la surface d'échange thermique.[49], [50]

4.2 Importance du choix géométrique

Le choix de la géométrie constitue une étape essentielle dans la modélisation numérique et l'analyse des systèmes thermiques. En effet, les dimensions et la forme de l'échangeur influencent directement les phénomènes physiques liés à l'écoulement des fluides et au transfert de chaleur. Dans le cas d'un échangeur de chaleur bitube, la géométrie détermine plusieurs paramètres importants tels que la surface d'échange thermique, le régime d'écoulement laminaire, la distribution de la température ainsi que les pertes de charge. Une augmentation de la surface d'échange permet généralement d'améliorer l'efficacité du transfert thermique, tandis que le régime d'écoulement influence le coefficient de transfert de chaleur et les performances globales de l'échangeur. Ainsi, un choix géométrique approprié contribue à optimiser les performances thermiques, réduire la consommation énergétique et assurer une simulation numérique réaliste et fiable sous ANSYS Fluent. À l'inverse, une mauvaise conception géométrique peut conduire à des résultats imprécis et non représentatifs du comportement réel du système.[51]

4.3 Description de la géométrie

L'échangeur thermique étudié est constitué de deux tubes concentriques formant une configuration à double tube. Le tube interne, de diamètre $\varnothing = 19.945$ mm, est destiné à l'écoulement du fluide chaud (eau), tandis que le tube externe, de diamètre $\varnothing = 42.6$ mm, contient le fluide froid représenté par le nanofluide. Entre les deux tubes se trouve un espace annulaire permettant l'échange de chaleur entre les deux fluides. Afin d'améliorer les performances thermiques de l'échangeur, des ailettes longitudinales sont fixées autour de la surface extérieure du tube interne. Ces ailettes jouent un rôle important dans l'intensification du transfert thermique en augmentant la surface d'échange, en favorisant la turbulence de l'écoulement et en améliorant le coefficient global de transfert de chaleur.[52]

4.4 Dimensions principales

Les dimensions géométriques de l'échangeur thermique étudié ont été choisies afin d'assurer une bonne représentation du système réel et d'optimiser le transfert de chaleur. La longueur totale de l'échangeur est fixée à 1000mm. L'épaisseur de la paroi externe est de 3.7mm, tandis que celle de la paroi interne est de 1.14mm. Des ailettes longitudinales de hauteur 6mm sont également intégrées dans la géométrie afin d'augmenter la surface d'échange thermique et d'améliorer les performances thermiques de l'échangeur.

4.5 Domaine de calcul

Le domaine de calcul utilisé dans cette simulation comprend plusieurs zones physiques représentant les différentes parties de l'échangeur thermique. Il inclut le fluide chaud circulant dans la zone interne, le nanofluide s'écoulant dans l'espace annulaire, les ailettes solides ainsi que la paroi du tube séparant les deux fluides. La modélisation est réalisée en trois dimensions (3D) afin de représenter avec précision l'influence des ailettes sur l'écoulement des fluides et sur le transfert thermique au sein de l'échangeur.[52]

4.6 Configuration de l'écoulement

Dans cette étude, les deux fluides circulent en régime contre-courant, c'est-à-dire dans des directions opposées. Cette configuration est largement utilisée dans les échangeurs thermiques en raison de son efficacité élevée dans le transfert de chaleur. En effet, l'écoulement en contre-courant permet de maintenir une différence de température importante entre les deux fluides le long de l'échangeur, ce qui améliore l'échange thermique et augmente les performances globales du système.[53]

4.7 Description de la figure

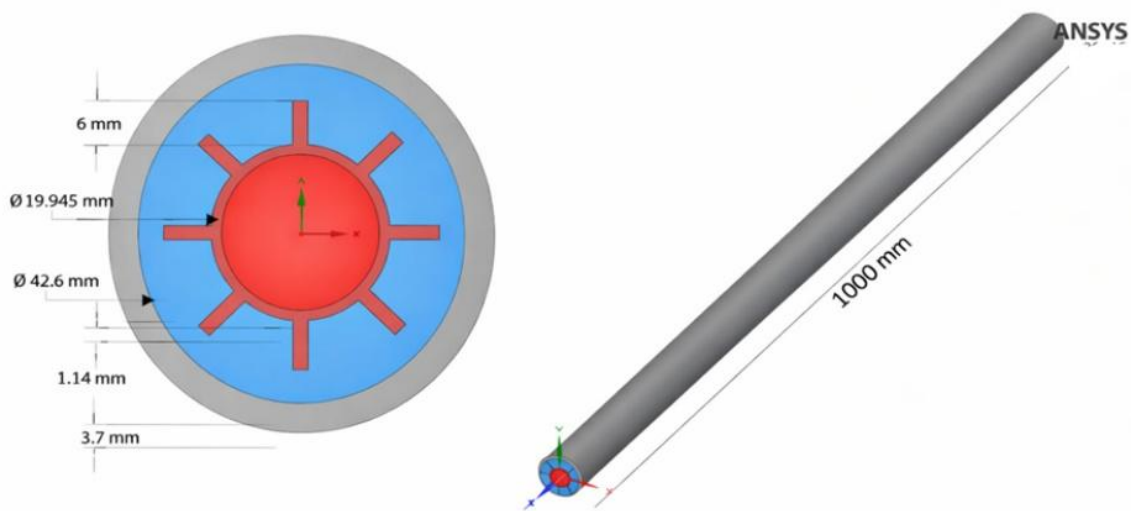


Figure 3. 1: Configuration du modèle CFD de l'échangeur de chaleur bitube .

Cette figure présente une vue en coupe transversale ainsi qu'une représentation tridimensionnelle de l'échangeur thermique étudié. Elle met en évidence les principaux éléments géométriques du système, notamment le tube interne destiné à l'écoulement du fluide, l'espace annulaire situé entre les deux tubes, ainsi que les ailettes longitudinales utilisées pour

améliorer le transfert thermique. La figure illustre également la longueur totale de l'échangeur, qui constitue un paramètre important influençant les performances thermiques et hydrodynamiques du dispositif.

4.8 Génération de la géométrie sous ANSYS

La géométrie de l'échangeur a été réalisée à l'aide du module Design Modeler du logiciel ANSYS fluent.[49]

Les étapes principales sont :

- ✓ Création de deux cylindres concentriques
- ✓ Ajout des ailettes longitudinales autour du tube interne
- ✓ Définition des volumes fluides (tube interne + espace annulaire)
- ✓ Création du domaine solide (tube int + ailettes ,tube ext)
- ✓ Vérification de la géométrie (pas d'intersections, géométrie propre)[51]

5. Type de nanofluides utilisé

Dans ce travail, des nanofluides à base d'huile de maïs ont été utilisés comme fluide caloporteur. Les nanoparticules sélectionnées sont Al_2O_3 , MWCNT, CuO et MgO, en raison de leur conductivité thermique élevée et de leur stabilité dans les milieux huileux. Une étude comparative a également été réalisée avec un nanofluide hybride (Al_2O_3 -MWCNT) afin d'évaluer l'effet synergique des nanoparticules sur les performances thermiques.[54], [55]

6. Propriétés Physique :

Matiere	Conductivité (W/m·K)	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique(J/kg·K)	Viscosité Kg/m.s
Huile de maïs	0.167	916.4	2154	0.008368
Eau	0.6	998.2	4182	0.001003

Tableau 3.1:Propriétés thermophysique des fluides de base.[56]

Matiere	Conductivité (W/m·K)	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg·K)
Al2O3	36	3890	880
MWCNT	1500	2100	710
MgO	50.1	3580	980
CuO	20	6500	535.6

Tableau 3.2: Propriétés thermophysique des nanoparticules utilisées.[56]

7. Maillage du modele:

Le maillage constitue une étape essentielle pour garantir la précision des résultats.

- Type de maillage :

Maillage non structuré (tétraédrique)

Raffinement au niveau :

- ✓ des ailettes
- ✓ des parois
- ✓ des zones de fort gradient thermique
- Test d'indépendance du maillage :

Durant cette phase , on a réalisé plusieurs maillages (fin, moyen, grossier) afin de vérifier que les résultats exprimés par la température à la sortie ne varient pas significativement avec sa densité

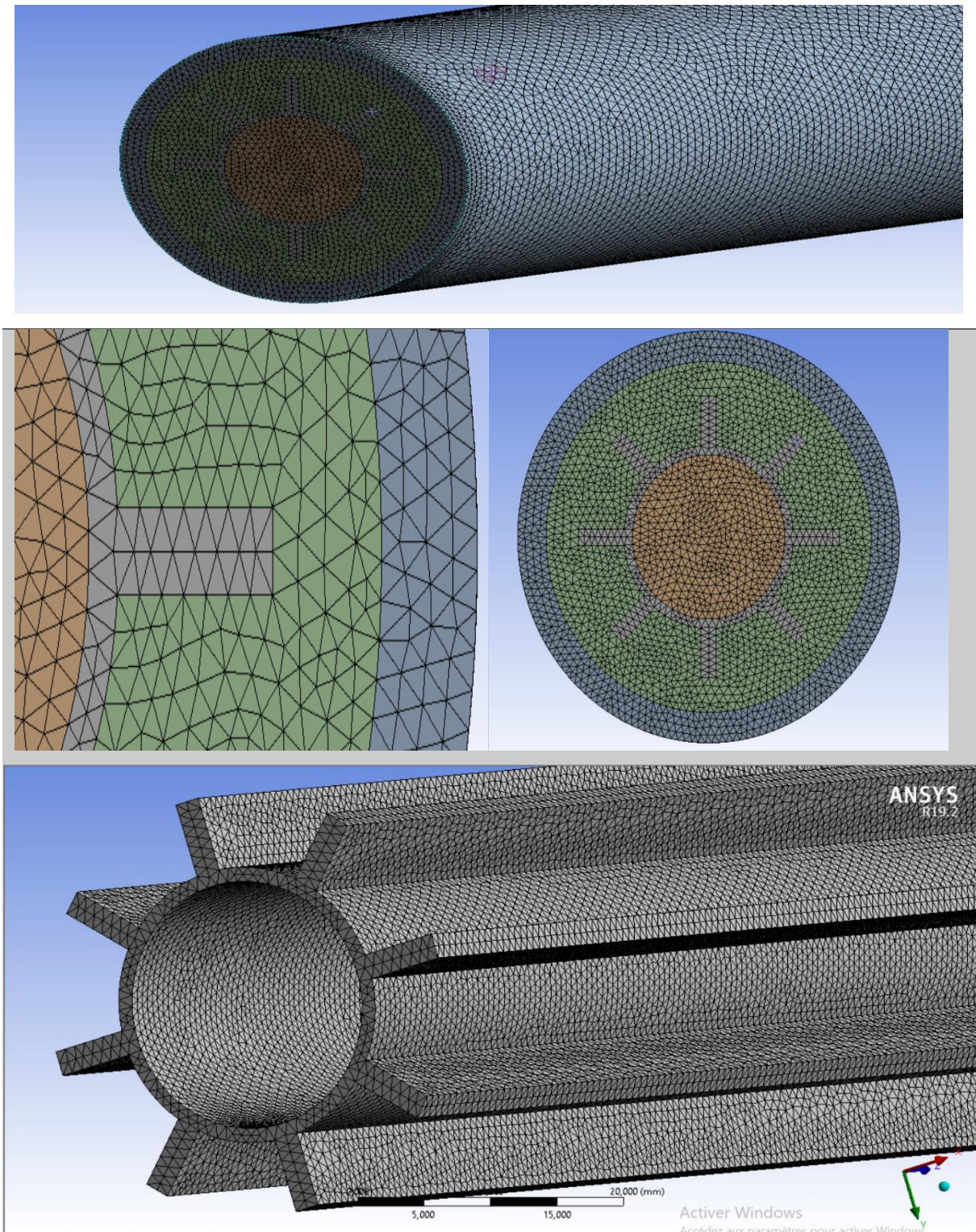


Figure 3. 2:Maillage du modèle.

8. Modèles Mathématiques

- Type d'écoulement : Laminaire
- Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis (FVM) est une méthode numérique utilisée pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Cette

méthode repose sur la discrétisation du domaine de calcul en un ensemble de petits volumes de contrôle appelés cellules ou mailles.

Dans chaque volume de contrôle, les équations gouvernantes sont intégrées afin d'assurer la conservation des grandeurs physiques à travers tout le domaine de calcul. Les flux de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sont calculés aux faces des cellules.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux simulations de mécanique des fluides numérique (CFD), car elle garantit une bonne précision et une conservation physique des propriétés du fluide. Le logiciel ANSYS Fluent utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations de Navier–Stokes et de transfert thermique.

- Équations gouvernantes

Continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(1) [57]$$

Quantité de mouvement :

x-axis

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots(2)$$

y-axis

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots(3) [57]$$

z-axis

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \dots\dots\dots(4)$$

Énergie :

$$U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \nabla^2 T + \left(-\frac{\partial}{\partial x} (uT) - \frac{\partial}{\partial y} (vT) - \frac{\partial}{\partial z} (wT) \right) \dots\dots\dots(5)$$

Le taux de transfert de chaleur Φ peut être exprimé par l'équation suivante [58]. En supposant que le système est bien isolé, la chaleur perdue par le fluide chaud est entièrement absorbée par le fluide froid, en négligeant les pertes de charge :

$$\Phi = \Phi_h = \Phi_c = \dot{m} C_p \Delta T \dots\dots\dots(6) [58]$$

Où :

Φ_h et Φ_c représentent les taux de transfert thermique du fluide chaud et du fluide froid, respectivement.

Le coefficient global de transfert thermique U est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$U = \frac{\Phi}{S \cdot \Delta T_{lm}} \dots\dots\dots(7) [59]$$

où S est la surface interne du tube intérieur et ΔT_{lm} est la différence de température moyenne logarithmique.

La différence de température moyenne logarithmique (LMTD) est donnée par :

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \dots\dots\dots(8) [60]$$

Où :

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$$

Le nanofluide est considéré comme un fluide monophasique homogène.[61]

- **Densité**

$$\rho_{nf} = \varphi_1 \rho_{np1} + \varphi_2 \rho_{np2} + (1 - \varphi) \rho_{bf} \dots\dots\dots(9)[60]$$

- ρ_{nf} : la densité du nanofluide hybride (kg/m^3).
- φ : la fraction volumique des nanoparticules (%).
- φ_1 : la fraction volumique des nanoparticules de type 1 (%).
- φ_2 : la fraction volumique des nanoparticules de type 2 (%).
- ρ_{bf} : la densité du fluide de base (kg/m^3).
- ρ_{np1} : la densité des nanoparticules de type 1 (kg/m^3).
- ρ_{np2} : la densité des nanoparticules de type 2 (kg/m^3).

- **Chaleur spécifique**

$$(\rho C_p)_{nf} = \varphi_1 \rho_{np1} \cdot C_{p np1} + \varphi_2 \rho_{np2} \cdot C_{p np2} + (1 - \varphi) \rho_{bf} \cdot C_{p bf} \dots\dots\dots(10)[60]$$

- $C_{p nf}$: La Chaleur spécifique du nanofluide hybride $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
- $C_{p np1}$: La Chaleur spécifique des nanoparticules de type 1 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
- $C_{p np2}$: La Chaleur spécifique des nanoparticules de type 2 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
- $C_{p bf}$: La Chaleur spécifique du fluide de base $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

- **Conductivité thermique :**

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \left(\frac{\frac{\varphi 1k_{np1} + \varphi 2k_{np2}}{\varphi} + 2(1-\varphi)k_{bf} - 2(\varphi 1k_{np1} + \varphi 2k_{np2})}{\frac{\varphi 1k_{np1} + \varphi 2k_{np2}}{\varphi} + (2+\varphi)k_{bf} - (\varphi 1k_{np1} + \varphi 2k_{np2})} \right) \dots \dots \dots (11)[60]$$

- k_{np} : La conductivité thermique du nanofluide hybride (W/m·K).
- k_{np1} : La conductivité thermique des nanoparticules de type 1 (W/m·K).
- k_{np2} : La conductivité thermique des nanoparticules de type 2 (W/m·K).
- k_{bf} : La conductivité thermique du fluide de base (W/m·K).

- **Viscosité dynamique (modèle de Brinkman)**

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5 \varphi) \dots \dots \dots (12)[60]$$

- μ_{nf} : La viscosité dynamique du nanofluide hybride Pa·s (kg/m·s).
- μ_{bf} : La viscosité dynamique du fluide de base Pa·s (kg/m·s).

9. Conditions aux limites

Les conditions aux limites appliquées dans cette étude sont définies afin de reproduire le fonctionnement réel de l'échangeur thermique. À l'entrée du fluide chaud, une température constante et un débit massique sont imposés. Concernant le fluide froid, la température d'entrée est fixée, tandis que le débit massique varie entre **0.01, 0.015, 0.02, 0.025** et **0.03 kg/s** afin d'étudier l'influence du débit sur les performances thermiques de l'échangeur. Pour les parois solides, une condition de non-glissement est appliquée, ce qui signifie que la vitesse du fluide au contact des parois est nulle. De plus, un transfert thermique est assuré entre les deux fluides à travers les parois de séparation, permettant l'échange de chaleur entre le fluide chaud et le fluide froid.

10. Conditions de fonctionnement

L'écoulement est considéré laminaire, stationnaire et incompressible. Les conditions aux limites imposées ont une vitesse uniforme et une température constante à l'entrée. Les parois sont supposées non glissantes. Les propriétés thermophysiques des nanofluides sont supposées constantes, et le rayonnement thermique est négligé. Le nanofluide est modélisé comme un fluide monophasique homogène avec une fraction volumique donnée.

11.Conclusion

Dans ce chapitre, une modélisation numérique de l'écoulement et du transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur a été présentée. La géométrie du système ainsi que le maillage adopté ont été décrits, suivis par la formulation des équations gouvernantes basées sur la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.[61]

Le choix du nanofluide, basé sur des nanoparticules telles que Al_2O_3 , CuO et MgO dispersées dans l'huile, a été justifié par leurs propriétés thermophysiques favorables à l'amélioration des performances thermiques. Le modèle monophasique a été retenu afin de simplifier la simulation tout en garantissant des résultats fiables.[56]

Les conditions de fonctionnement et les hypothèses simplificatrices adoptées ont permis de définir un cadre clair pour la simulation numérique sous ANSYS.[49]

Ainsi, ce chapitre constitue une base essentielle pour l'analyse des résultats qui sera présentée dans le chapitre suivant, où l'impact des nanofluides sur les performances thermiques de l'échangeur sera étudié et interprété.

Chapitre 04 :

Résultats et Discussions

1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter et analyser l'ensemble des résultats obtenus à partir de la simulation numérique réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. Cette étude repose sur la modélisation de l'écoulement et du transfert thermique au sein d'un échangeur de chaleur bitube, en utilisant différents types de nanofluides hybrides.

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer de manière approfondie l'influence de l'introduction des nanoparticules dans le fluide de base sur les performances dynamique et thermiques du système. Pour cela, plusieurs paramètres clés sont examinés, notamment la distribution de la température, le coefficient de transfert de chaleur, ainsi que la perte de charge.

Une attention particulière est portée au traitement d'un fluide conventionnel comme l'huile et des nanofluides de type hybrides, afin de mettre en évidence les améliorations potentielles. L'effet de la concentration volumique des nanoparticules et des conditions d'écoulement en régime laminaire est également analysé.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de profils, de contours et de graphes, permettant une interprétation claire du comportement thermique et hydrodynamique du système. Cette analyse permettra ainsi de tirer des conclusions pertinentes sur l'intérêt de l'utilisation des nanofluides dans les échangeurs de chaleur.

2. Étude d'indépendance du maillage

Afin de garantir la précision et la fiabilité des résultats numériques, une étude d'indépendance du maillage a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. Cette étape est essentielle dans toute simulation numérique, car la qualité du maillage influe directement sur la résolution des équations de transfert thermique et de mécanique des fluides.

Dans ce contexte, plusieurs maillages non structurés de différentes densités ont été générés pour le domaine de calcul de l'échangeur de chaleur bitube. Le nombre total d'éléments a été progressivement augmenté afin d'évaluer son effet sur les résultats obtenus.

Le paramètre choisi pour cette validation est la température de sortie du fluide froid (T_f), étant donné son importance dans l'évaluation des performances thermiques du système.

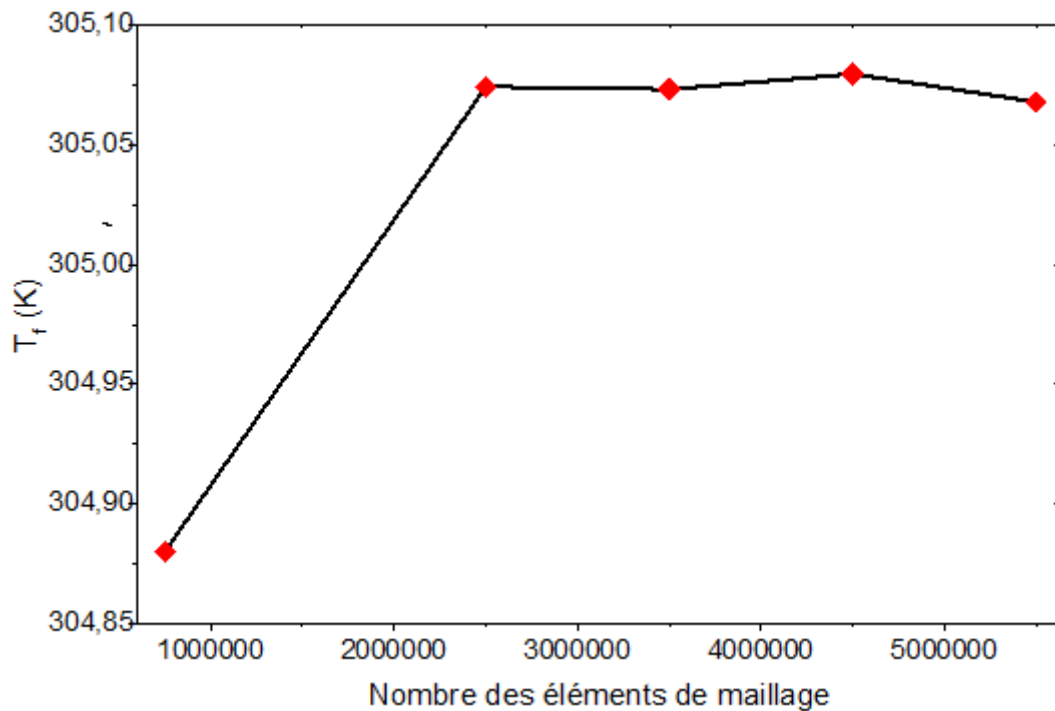


Figure 4. 1: Température de sortie de fluide froid en fonction du nombre d'élément.

3. Validation du modèle numérique

Afin de valider les résultats numériques obtenus avec le logiciel ANSYS Fluent, nous avons vérifié le modèle actuel en le comparant à un modèle numérique d'un échangeur de chaleur tridimensionnel à double tube et à contre-courant.

De plus, nous avons comparé le taux de transfert thermique obtenu numériquement avec celui obtenu par Z. K. Kadhing et Ban Ghulam. [57]

Cette comparaison, basée sur le débit massique d'eau circulant dans l'échangeur de chaleur, a permis d'obtenir une marge d'erreur de 7,5 % sur le taux de transfert thermique, ce qui indique une bonne concordance..

3. 1 Validation par le débit

Afin de renforcer la validation du modèle numérique, une étude de l'influence du débit sur le transfert thermique a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. Cette analyse permet de vérifier la cohérence physique des résultats obtenus.

Le taux thermique Φ a été étudié en fonction du débit massique du fluide. Les résultats sont présentés sous forme de courbe ($\Phi = f(\text{débit})$).

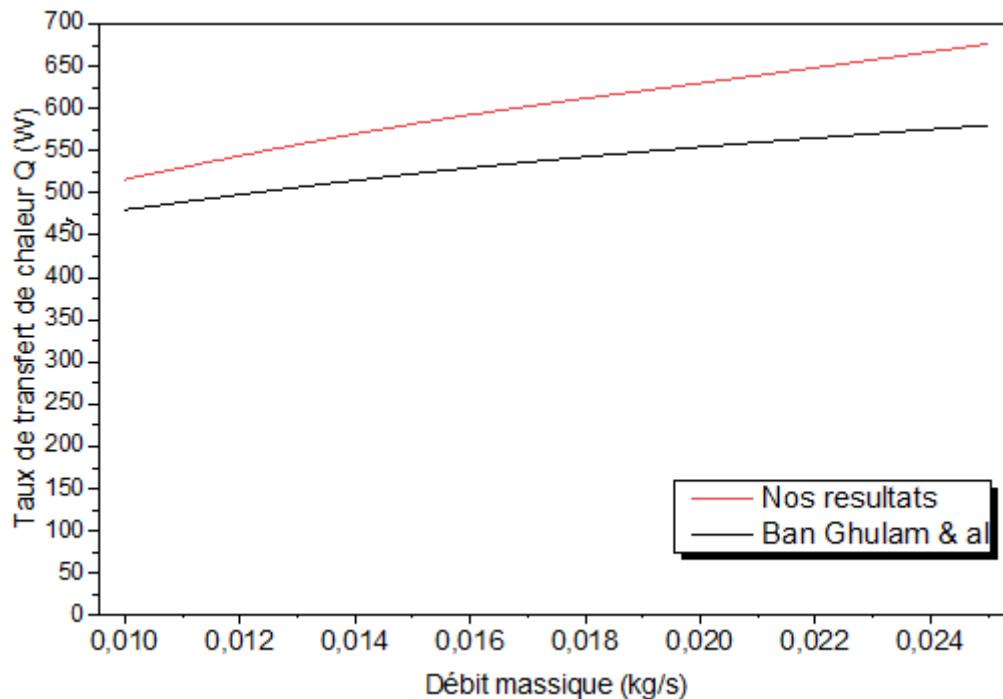


Figure 4. 2: Variation du taux de transfert thermique en fonction du débit massique : Comparaison avec les résultats de Ban Ghulam et al. [61]

3. 2Analyse des résultats

Les résultats montrent que le taux thermique évolue de manière cohérente avec la variation du débit. En effet, lorsque le débit augmente, la quantité de chaleur échangée varie en fonction du temps de contact entre le fluide et la paroi de l'échangeur.

Dans certains cas, l'augmentation du débit entraîne une amélioration du transfert thermique en raison de l'intensification des échanges convectifs. Cependant, une augmentation excessive du débit peut réduire le temps de résidence du fluide, ce qui limite l'échange thermique. Cette tendance observée est conforme aux principes fondamentaux du transfert de chaleur, ce qui confirme la validité physique du modèle numérique.

3. 3Conclusion de la validation

Les résultats obtenus à partir de l'étude du maillage et de l'influence du débit montrent une bonne stabilité numérique ainsi qu'une cohérence physique du modèle.

Par conséquent, le modèle développé sous ANSYS Fluent peut être considéré comme fiable pour l'analyse du transfert thermique dans l'échangeur de chaleur bitube.

Après validation du modèle numérique, nous passons à l'analyse détaillée des résultats thermiques, notamment la distribution de la température.

4. Résultats et discussions

4.1 Effet de différents types de nanofluides hybrides

Dans cette étude, nous avons utilisé des nanofluides hybrides $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MWCNT}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CuO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ constitués de nanoparticules dispersées dans un fluide de base afin d'améliorer le transfert de chaleur et les performances de l'échangeur.

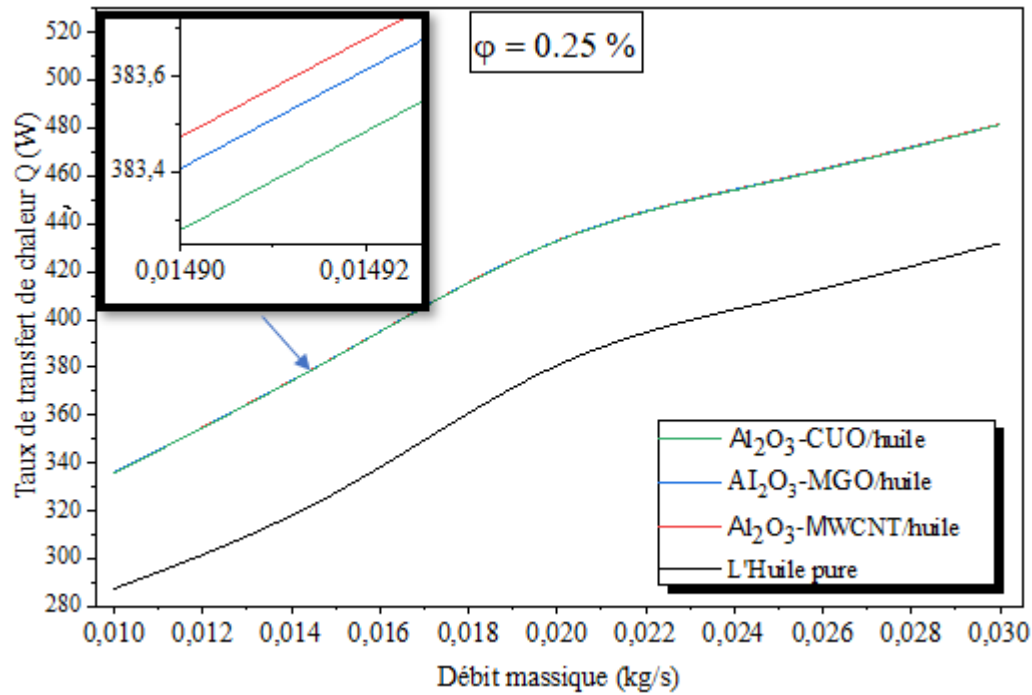


Figure 4. 3: Taux de transfert de chaleur en fonction de débit.

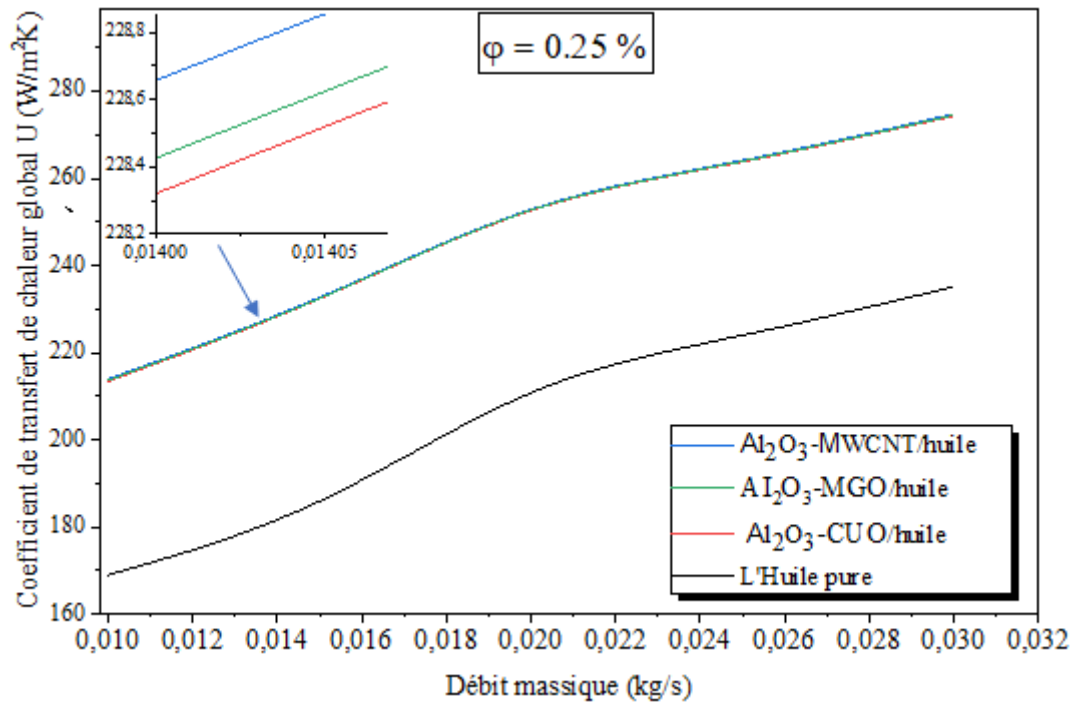


Figure 4. 4:coefficient de transfert de chaleur en fonction de débit.

Les figures (4.3) et (4.4) présentent l'effet des différents types de nanofluides hybrides à une concentration volumique fixe de $\phi = 0,25 \%$ sur les performances thermiques de l'échangeur de chaleur. Les résultats montrent l'évolution du taux de transfert de chaleur Φ ainsi que du coefficient global de transfert de chaleur U en fonction du débit massique. On remarque que pour tous les fluides étudiés, l'augmentation du débit massique entraîne une augmentation progressive de Φ et de U , ce qui indique une amélioration de l'échange thermique à l'intérieur de l'échangeur. L'huile pure présente toujours les performances les plus faibles en raison de sa faible conductivité thermique. En revanche, l'ajout de nanoparticules hybrides améliore considérablement le transfert thermique grâce à l'augmentation de la conductivité thermique et à l'intensification des échanges d'énergie dans le fluide. Parmi les nanofluides étudiés, le nanofluide hybride Al_2O_3 -MWCNT/huile offre les meilleures performances thermiques, avec les valeurs les plus élevées de Φ et de U , suivi par Al_2O_3 -MGO/huile puis Al_2O_3 -CUO/huile. Cette amélioration importante est principalement due aux excellentes propriétés thermiques des nanotubes de carbone MWCNT, qui facilitent fortement le transport de chaleur. Les zooms intégrés dans les graphes permettent de mieux visualiser les faibles différences entre les nanofluides aux faibles débits massiques. Ainsi, ces résultats démontrent que le choix du type de nanoparticules hybrides joue un rôle essentiel dans l'amélioration des performances

thermiques de l'échangeur de chaleur, et que le nanofluide $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MWCNT/huile}$ constitue la meilleure option parmi les fluides testés.

4.2 Effet de la concentration volumique des nanoparticules

Puisque le nanofluide hybride $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MWCNT/huile}$ a présenté les meilleures performances thermiques parmi les nanofluides étudiés, il a été choisi pour analyser l'effet de la concentration volumique des nanoparticules.

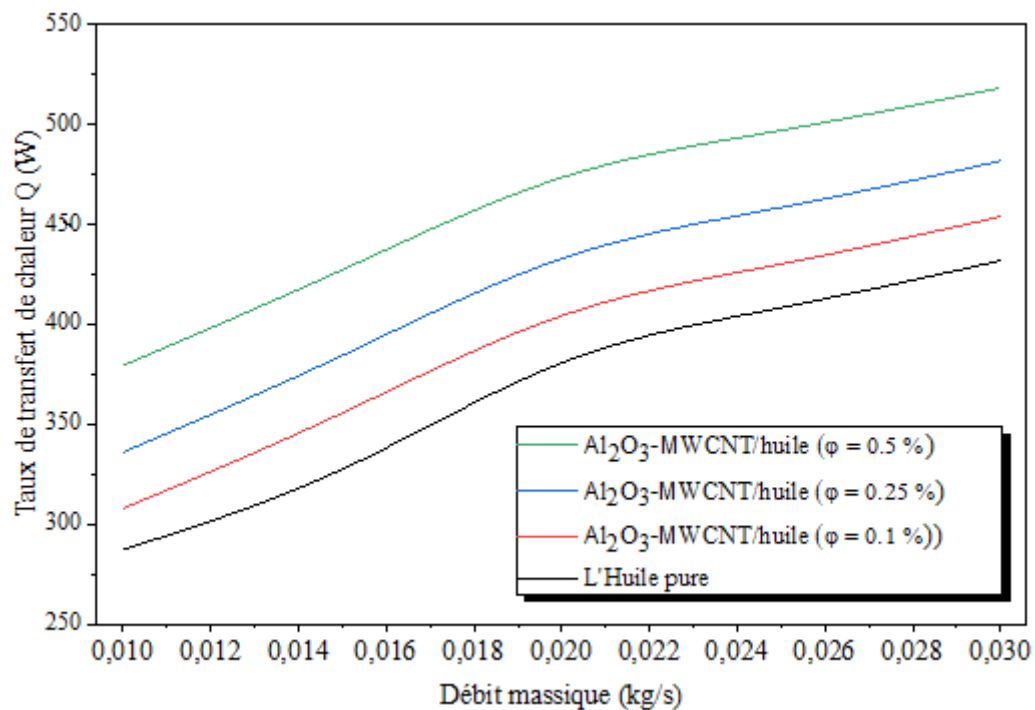


Figure 4. 5: Taux de transfert de chaleur en fonction de débit.

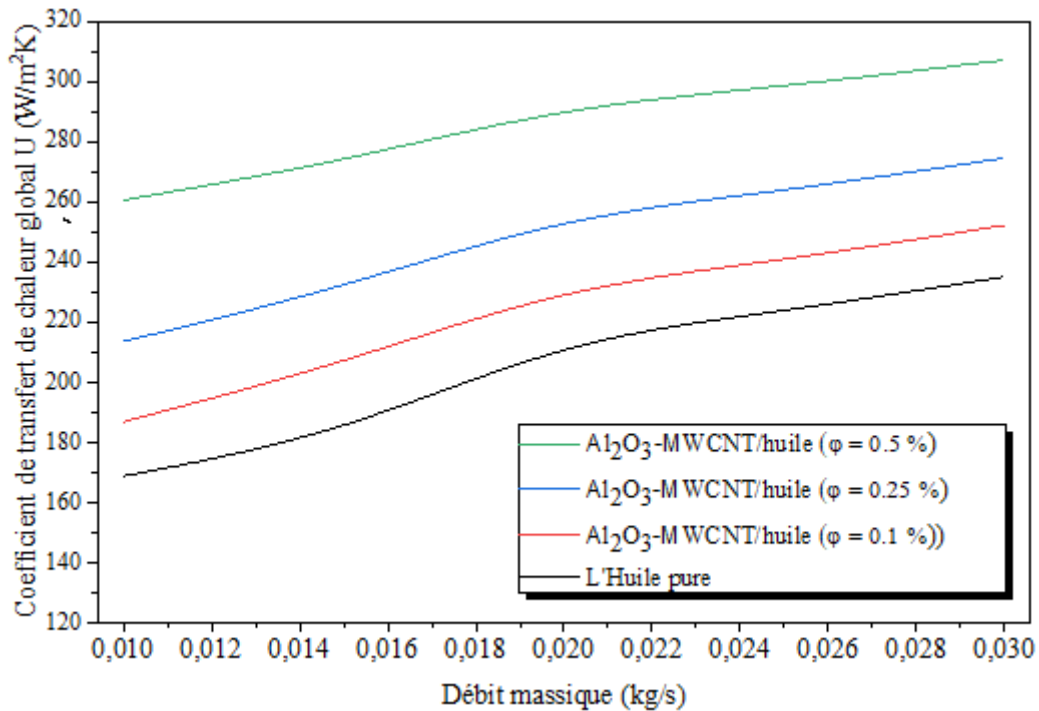


Figure 4. 6:coefficient de transfert de chaleur en fonction de débit.

Les figures (4.5) et (4.6) montrent clairement l'effet de la concentration des nanoparticules hybrides $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MWCNT}$ dispersées dans l'huile sur les performances thermiques de l'échangeur de chaleur. On observe que lorsque le débit massique augmente de **0,010 à 0,030 kg/s**, le taux de transfert de chaleur ainsi que le coefficient global de transfert de chaleur augmentent progressivement pour tous les fluides étudiés. Cette augmentation s'explique par l'amélioration de la circulation du fluide, qui favorise le mélange thermique et réduit la résistance au transfert de chaleur.

L'huile pure présente les valeurs les plus faibles, tandis que les nanofluides hybrides donnent de meilleurs résultats grâce à la présence des nanoparticules, qui améliorent la conductivité thermique du fluide de base. Parmi les concentrations étudiées, le nanofluide hybrides $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MWCNT/huile}$ à **0,5 %** donne les meilleures performances, suivi de **0,25 %**, puis de **0,1 %**. Cela montre que l'augmentation de la concentration des nanoparticules permet d'améliorer l'échange thermique, car les particules facilitent le transport de l'énergie thermique à l'intérieur du fluide.

Cependant, l'augmentation de la concentration volumique entraîne également une augmentation de la viscosité du nanofluide hybrides. Ainsi, la concentration de **0,5 %** présente une viscosité plus élevée, ce qui peut provoquer une augmentation des pertes de charge et nécessiter une puissance de pompage plus importante. En revanche, la concentration de **0,25%**

offre un bon compromis entre l'amélioration du transfert thermique et une viscosité relativement plus faible, ce qui permet d'obtenir des performances thermiques satisfaisantes avec une moindre résistance à l'écoulement.

Ainsi, ces résultats confirment que l'utilisation d'un nanofluide hybride permet d'améliorer efficacement le transfert de chaleur et d'augmenter le rendement thermique de l'échangeur par rapport à l'huile pure.

4.3 Effet de la fraction de chaque nanoparticule dans le nanofluide hybride

Le choix de la concentration est justifié par le fait qu'elle offre un bon compromis entre l'amélioration du transfert thermique et le maintien de propriétés d'écoulement acceptables. En effet, cette concentration permet d'augmenter la conductivité thermique du nanofluide hybrides tout en conservant une viscosité relativement faible par rapport à la concentration.

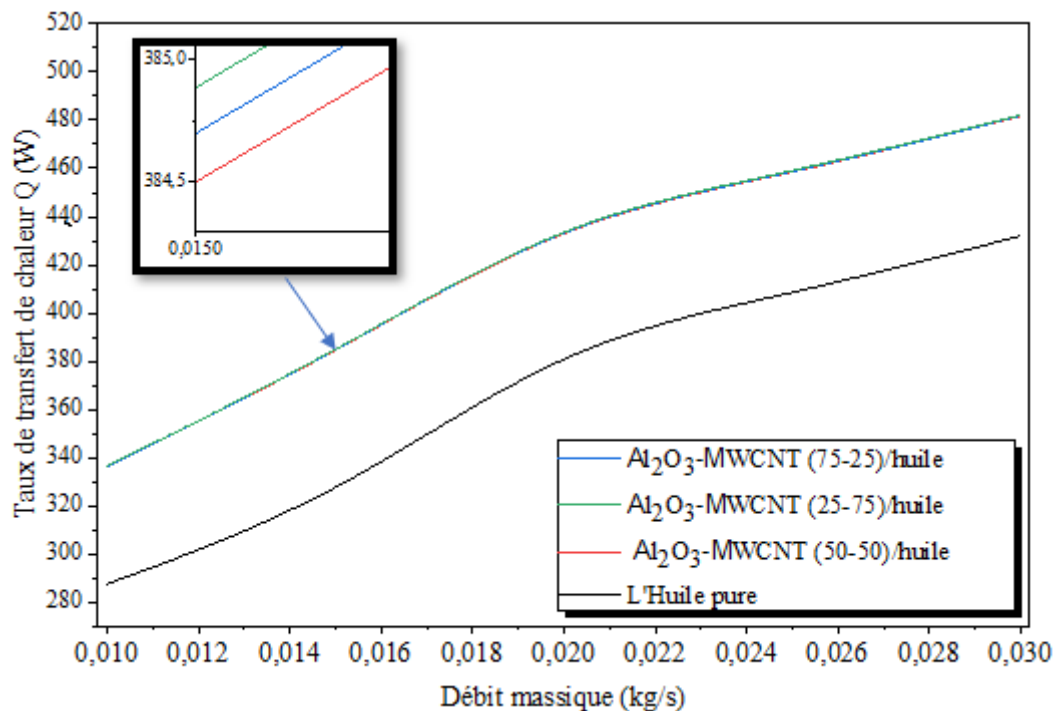


Figure 4. 7: Taux de transfert de chaleur en fonction de débit.

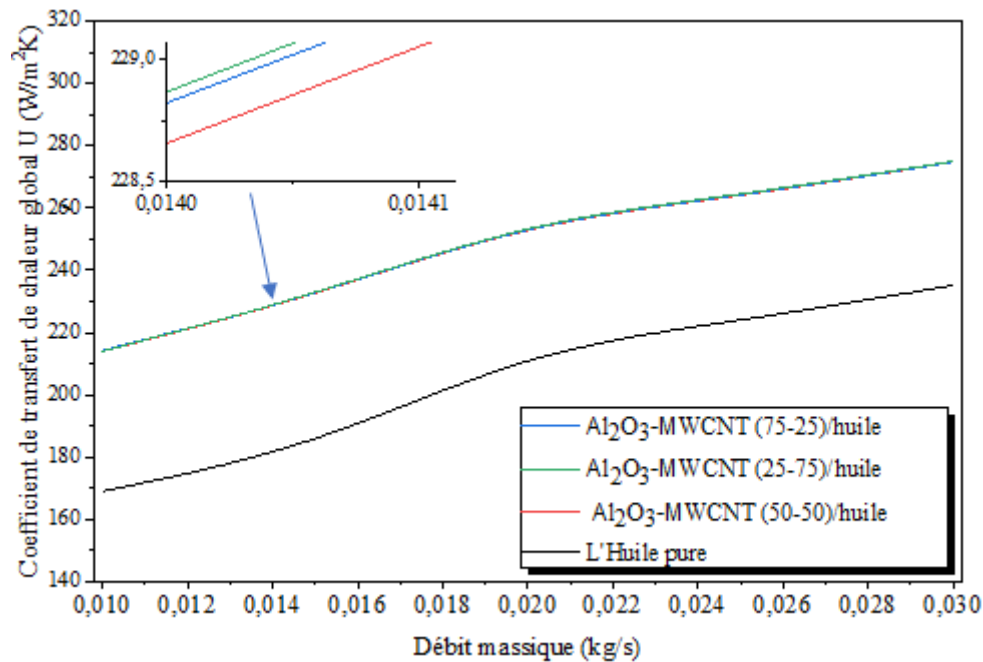


Figure 4. 8: Coefficient de transfert de chaleur en fonction de débit.

Les figures (4.7) et (4.8) illustrent l'effet des différentes proportions du nanofluides hybride Al_2O_3 -MWCNT sur les performances thermiques de l'échangeur de chaleur, en analysant l'évolution du taux de transfert de chaleur Φ et du coefficient global de transfert de chaleur U en fonction du débit massique. Les résultats montrent que l'augmentation du débit massique de **0,010 à 0,030 kg/s** entraîne une augmentation continue des valeurs de Φ et de U pour tous les fluides étudiés, ce qui traduit une amélioration de l'échange thermique à mesure que le fluide circule plus rapidement dans l'échangeur. L'huile pure présente les valeurs les plus faibles, alors que les nanofluides hybrides donnent des performances nettement supérieures grâce à l'amélioration de la conductivité thermique provoquée par la présence des nanoparticules. Parmi les proportions étudiées, le mélange Al_2O_3 -MWCNT **(25-75)/huile** présente les meilleures performances thermiques, suivi du mélange **(75-25)/huile** puis du mélange **(50-50)/huile**. Cela indique que l'augmentation de la proportion de nanotubes de carbone MWCNT dans le nanofluides améliore davantage le transfert thermique, car les MWCNT possèdent une conductivité thermique très élevée favorisant le transport rapide de la chaleur. Les agrandissements intégrés dans les graphes permettent de visualiser précisément les faibles écarts entre les différentes proportions aux faibles débits massiques. Ainsi, ces résultats démontrent que la composition du nanofluides hybride influence fortement les performances thermiques de l'échangeur et que le mélange riche en MWCNT représente la configuration la plus efficace pour améliorer le transfert de chaleur par rapport à l'huile pure.

4.4 Effet de localisation de nanofluide hybride

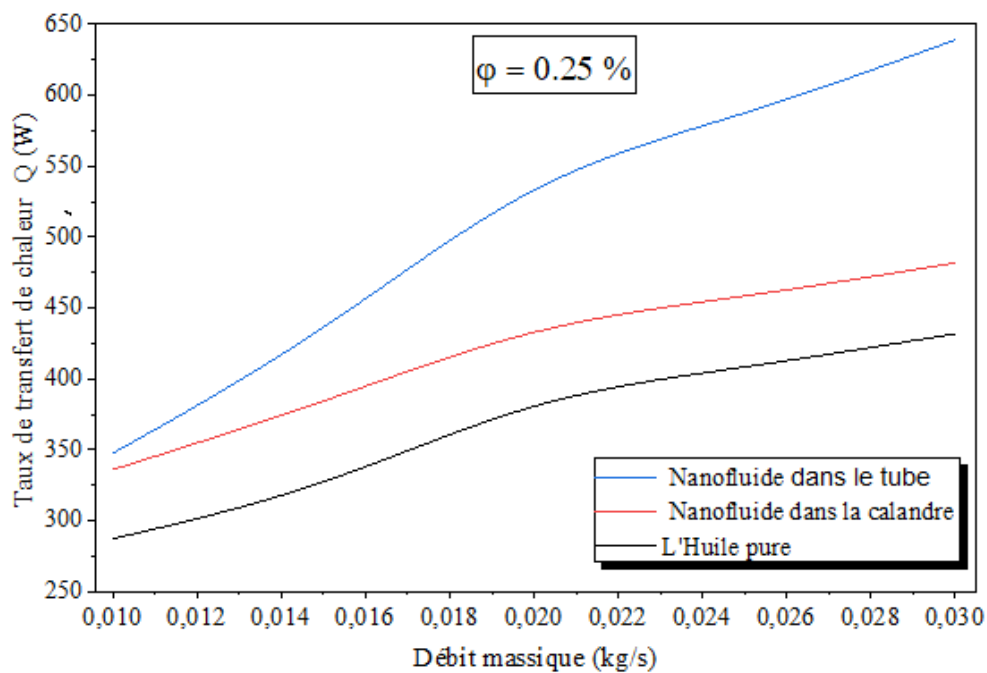


Figure 4. 9: Taux de transfert de chaleur en fonction de débit.

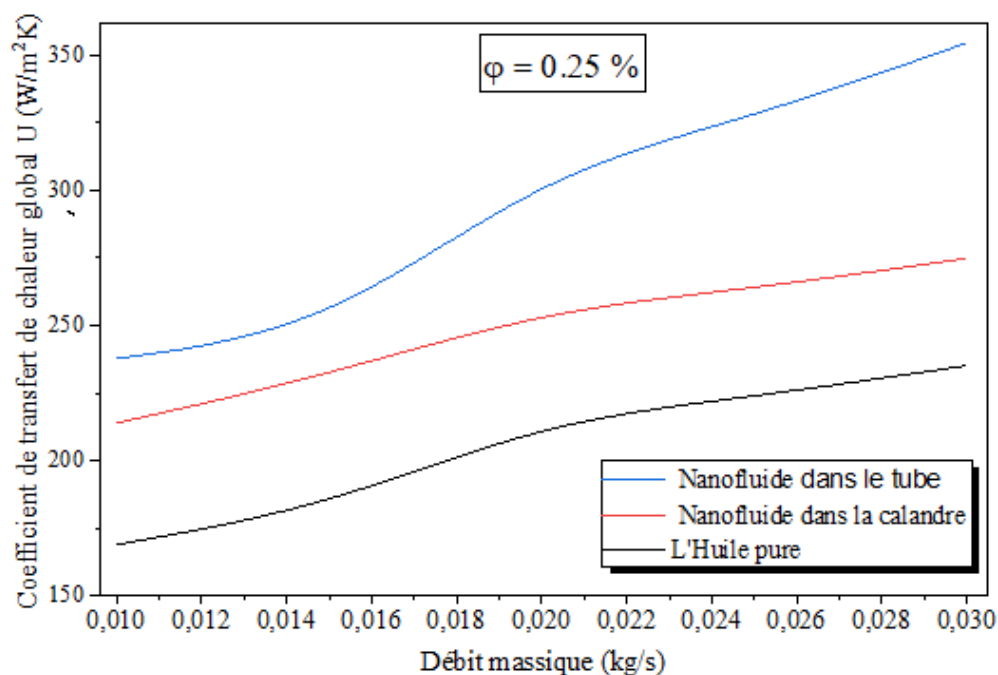


Figure 4. 10: coefficient de transfert de chaleur en fonction de débit.

Les figures (4.9) et (4.10) présentent l'effet de localisation de nanofluides hybrides Al_2O_3 -MWCNT à une concentration volumique fixe de $\phi = 0,25 \%$ sur les performances thermiques de l'échangeur de chaleur. On remarque que les performances thermiques changent selon la localisation du nanofluide dans l'échangeur.

Les courbes montrent que le nanofluide circulant dans le tube (courbe bleue) donne les valeurs les plus élevées du taux et du coefficient de transfert de chaleur. Cela s'explique par une meilleure intensité d'échange thermique à l'intérieur du tube et une augmentation de la convection forcée. Lorsque le nanofluide circule dans la calandre (courbe rouge), les performances restent meilleures que celles de l'huile pure, mais inférieures au cas précédent. L'huile pure (courbe noire) présente les résultats les plus faibles à cause de sa faible conductivité thermique. Cette amélioration s'explique par le fait que l'écoulement du nanofluide dans le tube est plus rapide et plus turbulent. L'augmentation de la turbulence réduit la résistance thermique et améliore la convection forcée, ce qui augmente le transfert de chaleur. De plus, le nanofluide possède une meilleure conductivité thermique que l'huile pure, ce qui renforce davantage les échanges thermiques dans le tube.

Donc, l'effet de localisation montre que le placement du nanofluide dans le tube améliore davantage les performances thermiques de l'échangeur par rapport à son placement dans la calandre.

5. Distribution de la température

La distribution de température obtenue à partir de la simulation ANSYS met en évidence un gradient thermique bien défini le long de l'échangeur. La température maximale atteint environ **333 K** au niveau de l'entrée du fluide chaud, tandis que la température minimale avoisine **298 K** niveau de l'entrée du fluide froid. Cette variation progressive confirme l'existence d'un transfert de chaleur efficace entre les deux fluides. La continuité du gradient thermique indique que l'échangeur fonctionne dans des conditions stables, sans discontinuité ni perturbation majeure dans le processus de transfert thermique.

Afin d'analyser le comportement thermique de l'échangeur de chaleur bitube, une étude de la distribution de la température a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS. Les résultats sont présentés sous forme de contours thermiques permettant de visualiser le transfert de chaleur dans différentes configurations. Cette analyse permet d'évaluer l'efficacité thermique du système et l'influence des structures internes sur les performances de l'échangeur.

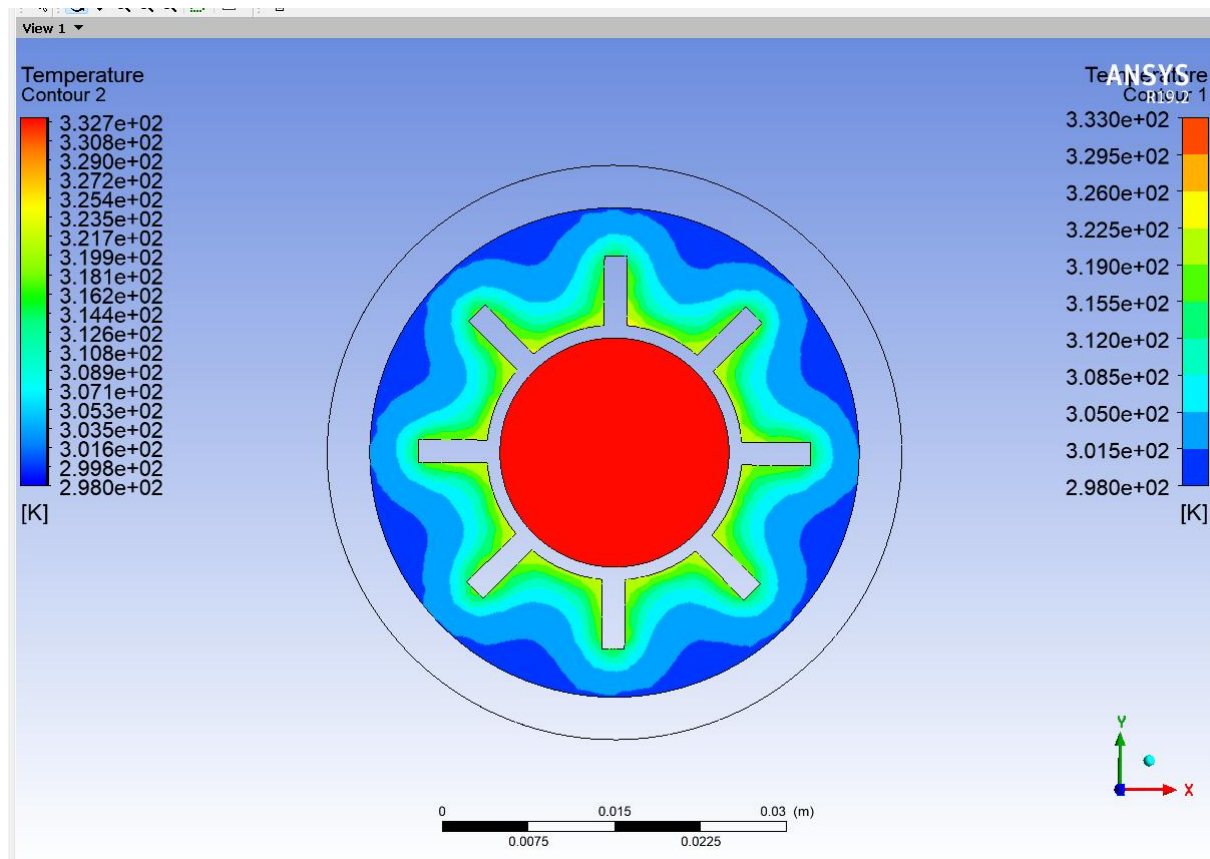


Figure 4. 11:Champ de température radial dans un échangeur bitube équipé d'ailettes longitudinales à $x=0$.

- **Interprétation :**

La figure (4.1) présente la distribution de la température à l'intérieur de l'échangeur de chaleur. La zone centrale représentée en couleur rouge correspond à l'entrée du tube intérieur, où circule le fluide chaud (l'eau). Cette région possède la température la plus élevée, atteignant environ **333K**. En s'éloignant du centre vers la région annulaire contenant le fluide froid (l'huile de maïs), la température diminue progressivement. Cette diminution est représentée par les différentes couleurs allant du jaune et vert jusqu'au bleu, indiquant l'existence d'un gradient thermique entre les deux fluides. On remarque également que les ailettes disposées autour du tube intérieur favorisent le transfert thermique en augmentant la surface d'échange. Cela permet une diffusion plus efficace de la chaleur du fluide chaud vers le fluide froid. Les zones proches des ailettes présentent des températures plus élevées que les régions éloignées, ce qui confirme l'efficacité des ailettes dans l'amélioration du transfert de chaleur. Les températures minimales sont observées près de la paroi externe de l'échangeur, où la température atteint environ **298K**. Cette distribution montre un transfert thermique progressif et stable entre l'eau chaude et l'huile de maïs, ce qui valide le bon comportement thermique du modèle numérique.

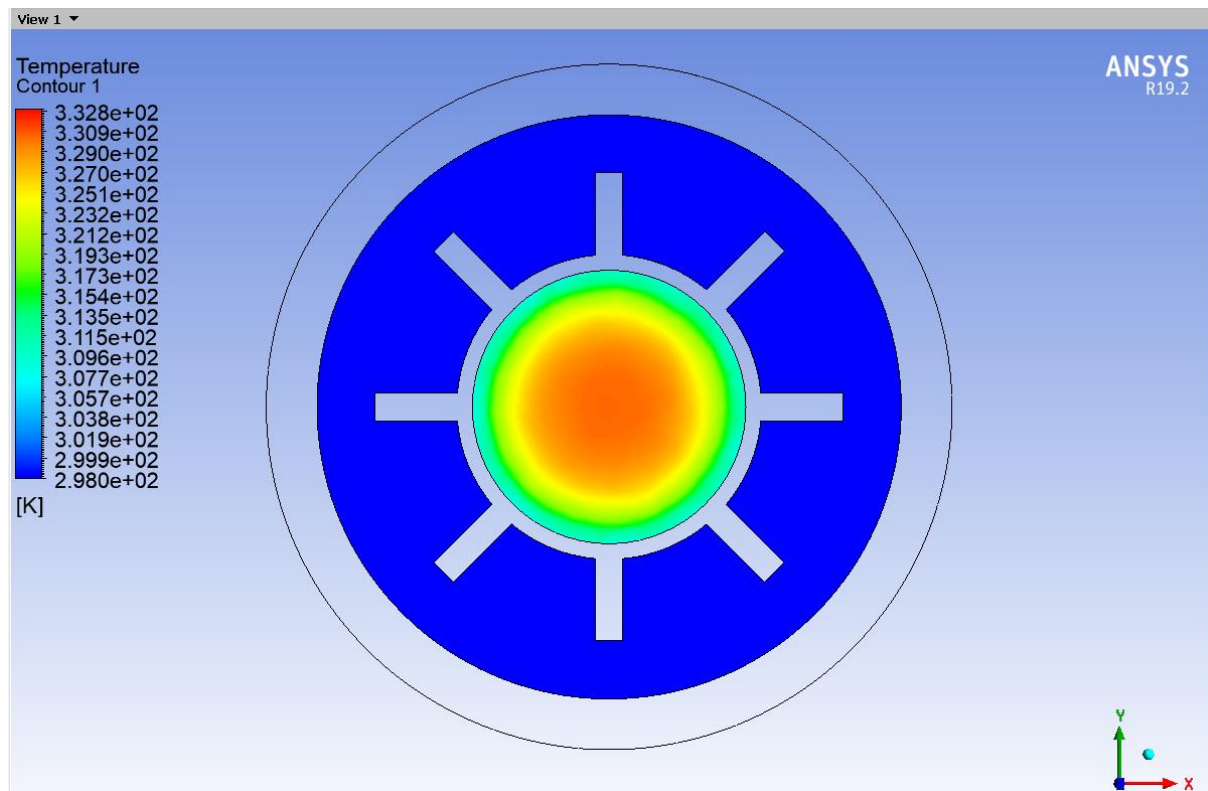


Figure 4. 12:Champ de température radial dans un échangeur bitube équipé d'ailettes longitudinales à $x=1\text{m}$

La figure (4.12) montre la distribution de température dans un échangeur de chaleur à double tube muni d'ailettes longitudinales. La température est élevée dans le tube interne où circule le fluide chaud, puis elle diminue progressivement vers le tube externe contenant le fluide froid. Les ailettes longitudinales améliorent le transfert thermique en augmentant la surface d'échange entre les deux fluides.

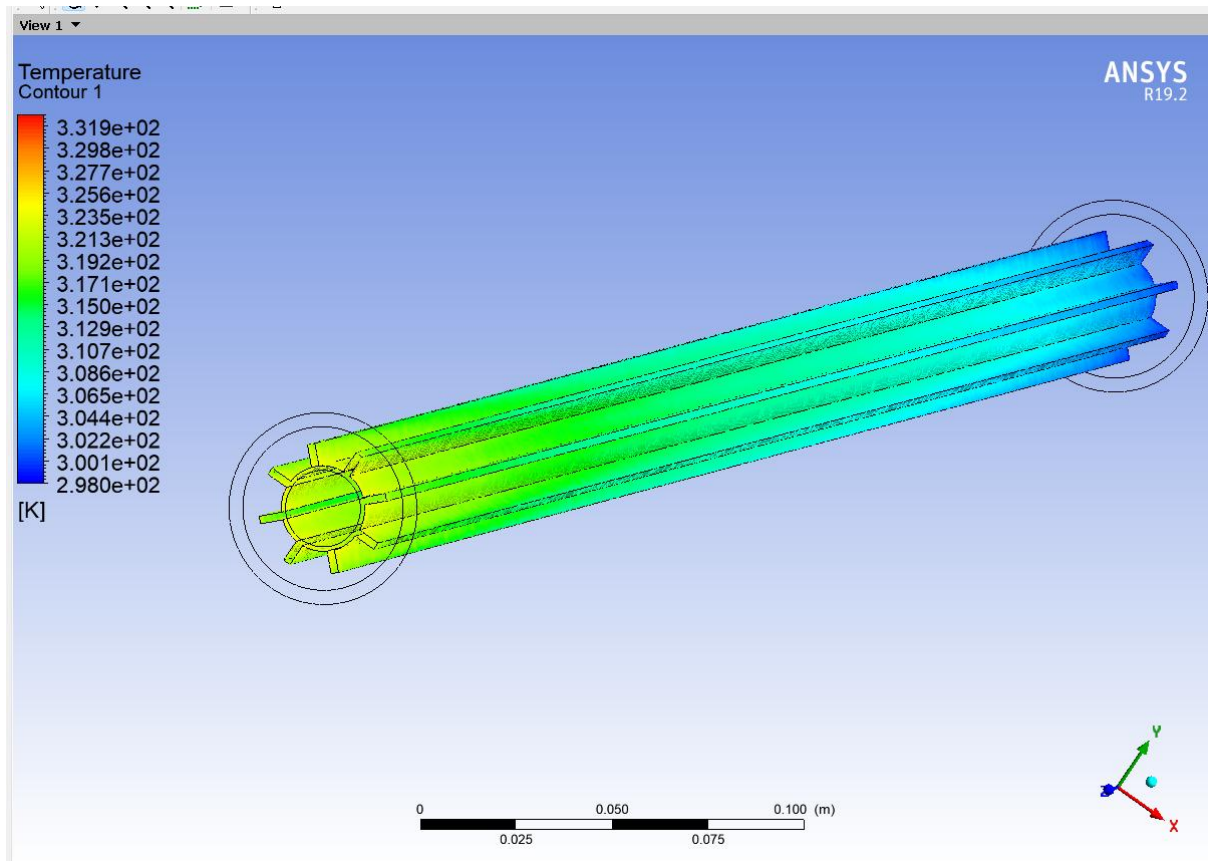


Figure 4. 13: Distribution de la température de tube intérieur avec ailettes longitudinales.

La figure (4.13) présente la distribution de la température dans un échangeur de chaleur tubulaire muni d'ailettes, obtenue par simulation numérique à l'aide du logiciel ANSYS R19.2. Le fluide chaud s'écoule à l'intérieur du tube central, avec une température élevée à l'entrée (zone jaune, ≈ 330 K) qui diminue progressivement le long de l'axe longitudinal jusqu'à la sortie (zone bleue, ≈ 300 K). Cette diminution traduit un transfert de chaleur du fluide chaud vers le milieu extérieur, en l'occurrence l'eau.

Le mécanisme de transfert thermique repose principalement sur une convection interne entre le fluide chaud et la paroi du tube, suivie d'une conduction thermique à travers la paroi et les ailettes, puis d'une convection externe entre la surface des ailettes et le fluide froid environnant. Les ailettes, bien que non traversées par le fluide, augmentent significativement la surface d'échange thermique, ce qui permet d'améliorer le flux de chaleur transféré.

La distribution régulière du champ de température indique un régime d'écoulement et de transfert thermique stable, sans perturbations majeures. Ce profil thermique met en évidence l'efficacité de la configuration à ailettes pour intensifier les échanges thermiques et optimiser les performances globales de l'échangeur.

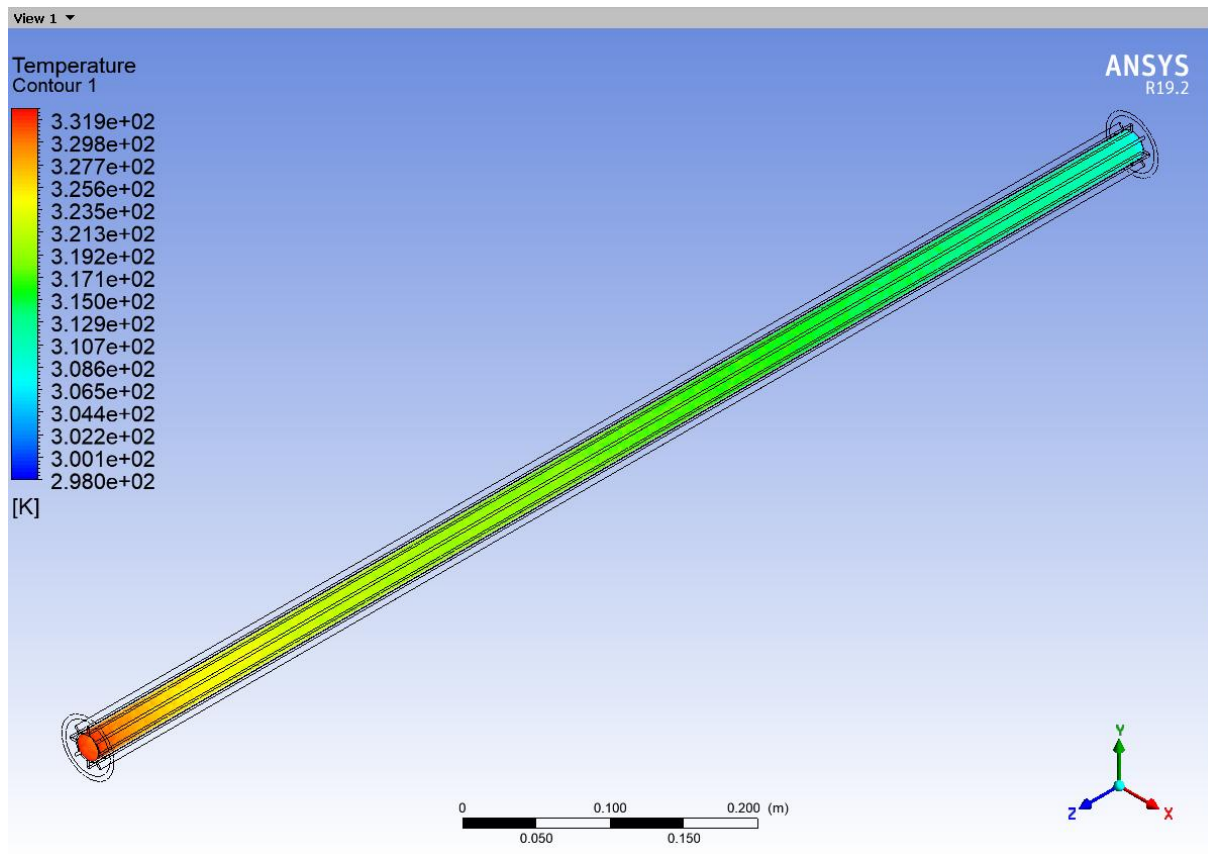


Figure 4. 14:Distribution de la température du fluide intérieur le long de l'échangeur (vue longitudinale).

. La figure (4.14) présente la distribution de la température dans l'échangeur thermique tubulaire obtenue à l'aide du logiciel ANSYS. On observe que la température est maximale à l'entrée du tube (côté gauche), où la couleur rouge-orangé correspond à une valeur d'environ 332 K ($\approx 59^\circ\text{C}$). Le long de l'échangeur, la température diminue progressivement vers la sortie (côté droit), en passant du jaune au vert puis au bleu clair, pour atteindre environ 300 K ($\approx 27^\circ\text{C}$). Cette évolution continue de la température traduit le transfert progressif de chaleur du fluide chaud vers le fluide froid à travers la paroi de l'échangeur. La répartition régulière des isothermes met en évidence un échange thermique homogène ainsi qu'un écoulement stable sur toute la longueur du tube. Cette distribution confirme le bon fonctionnement de l'échangeur thermique et montre que le transfert de chaleur s'effectue de manière efficace entre les deux fluides.

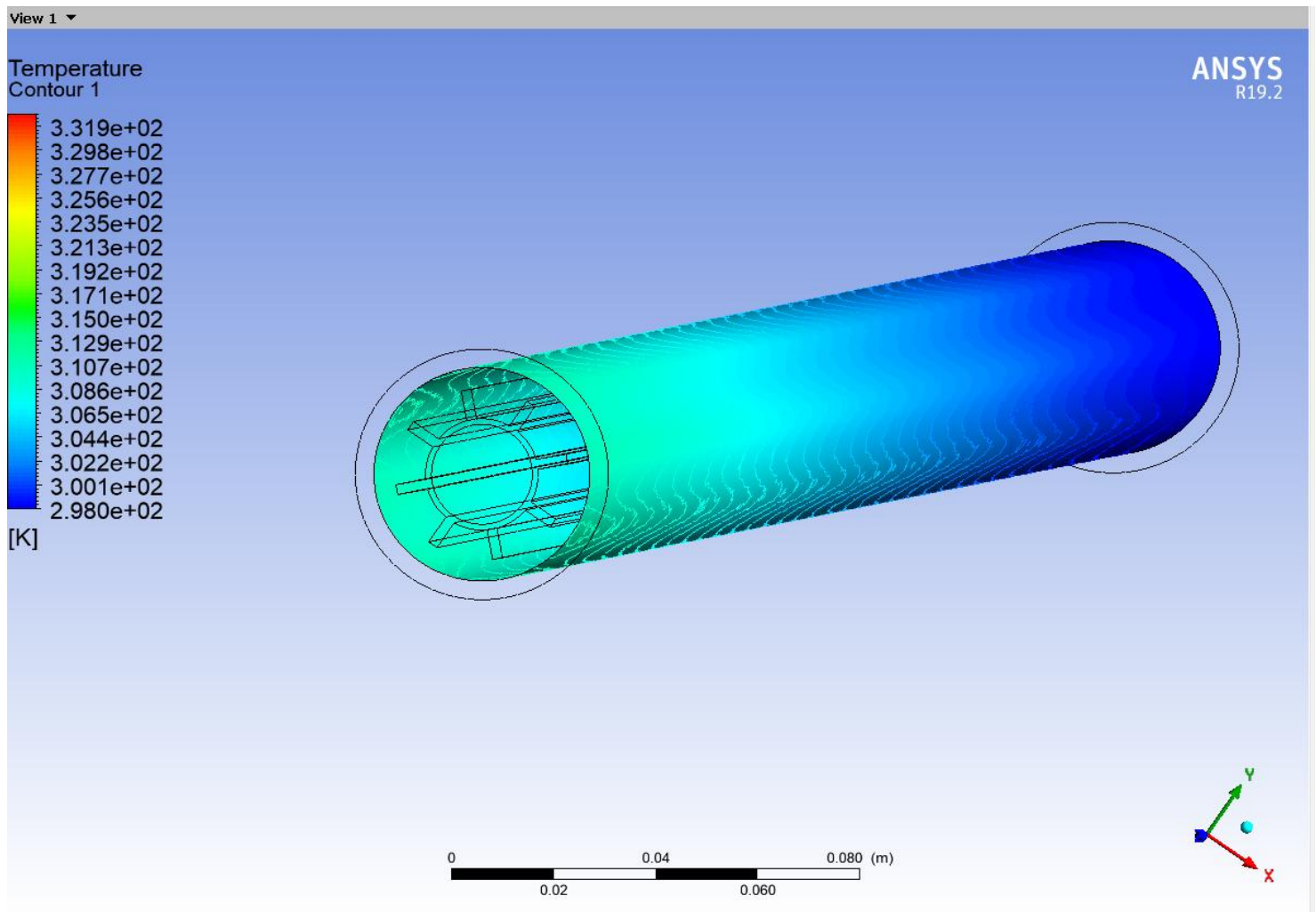


Figure 4. 15:Distribution de la température en coupe avec ailette.

La figure (4.15) représente la distribution de la température le long de l'échangeur thermique. La zone bleue correspond à l'entrée de l'huile froide, où la température est minimale, proche de 298 k. Au fur et à mesure de l'écoulement dans l'échangeur, la température de l'huile augmente progressivement sous l'effet du transfert thermique provenant du fluide chaud circulant dans le tube intérieur.

Cette augmentation de température est représentée par la transition des couleurs du bleu vers le vert, indiquant que l'huile absorbe progressivement la chaleur au cours de son passage dans l'échangeur. La zone verte observée à la sortie correspond ainsi à une température plus élevée de l'huile, ce qui confirme l'efficacité de l'échange thermique entre les deux fluides.

On remarque également que la variation de température est régulière tout au long de l'échangeur, ce qui traduit une bonne répartition thermique et une stabilité de l'écoulement. Les ailettes internes contribuent aussi à améliorer le transfert de chaleur en augmentant la surface d'échange thermique entre les fluides.

Analyse globale

L'analyse des résultats montre l'existence d'un gradient thermique bien défini le long de l'échangeur. La température diminue progressivement entre l'entrée et la sortie, ce qui confirme un transfert de chaleur efficace. Les vues en coupe montrent également une distribution homogène de la température, indiquant une bonne diffusion thermique.

L'introduction des ailettes internes joue un rôle important en perturbant l'écoulement du fluide et en augmentant la turbulence. Cela favorise le mélange thermique et améliore le transfert de chaleur. De plus, l'utilisation d'un nanofluide hybride contribue à améliorer les propriétés thermophysiques du fluide, notamment sa conductivité thermique, ce qui permet d'optimiser davantage les performances de l'échangeur.

En conclusion, l'étude de la distribution de la température confirme l'efficacité thermique de l'échangeur de chaleur bitube. Le gradient thermique progressif, la répartition homogène de la température et l'effet des structures internes démontrent l'amélioration du transfert thermique. L'utilisation des ailettes et du nanofluide hybride représente une solution efficace pour optimiser les performances des systèmes d'échange de chaleur.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude numérique du transfert thermique dans un échangeur de chaleur bitube utilisant des nanofluides hybrides a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. Les résultats obtenus ont permis d'analyser l'influence des différents paramètres de fonctionnement sur les performances thermiques de l'échangeur.

L'étude de validation a montré une bonne concordance entre les résultats numériques obtenus et les données de la littérature, ce qui confirme la fiabilité du modèle numérique adopté ainsi que la qualité du maillage utilisé. L'analyse de l'indépendance du maillage a également permis de garantir la précision des simulations tout en optimisant le temps de calcul.

Les contours de température obtenus montrent une amélioration significative du transfert de chaleur lors de l'utilisation des nanofluides hybrides par rapport au fluide de base. Cette

Chapitre 04 : Résultats et Discussions

amélioration est principalement liée à l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides hybrides, favorisant ainsi les échanges thermiques à l'intérieur de l'échangeur.

Par ailleurs, les résultats ont mis en évidence l'influence du débit et de la concentration volumique des nanoparticules sur le comportement thermique de l'écoulement. Une augmentation du débit entraîne une intensification des échanges thermiques, tandis que l'augmentation de la concentration des nanoparticules améliore davantage les performances thermiques du système.

En conclusion, cette étude confirme l'intérêt des nanofluides hybrides dans l'amélioration des performances des échangeurs de chaleur. Les résultats obtenus constituent une base importante pour le développement et l'optimisation des systèmes thermiques utilisant les nanofluides hybrides dans différentes applications industrielles.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au cours de ce travail, une étude thermique d'un échangeur de chaleur à double tube a été réalisée afin d'analyser le comportement du transfert de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid. Cette étude a permis de mieux comprendre les phénomènes de convection et de conduction intervenant dans les échanges thermiques ainsi que l'influence des conditions d'écoulement sur les performances de l'échangeur.

La modélisation numérique réalisée avec le logiciel ANSYS Fluent a permis de visualiser la distribution de la température et d'étudier l'évolution thermique des fluides à l'intérieur de l'échangeur. Les simulations effectuées ont montré que le débit joue un rôle important dans l'efficacité du transfert thermique et dans la variation des températures de sortie.

Les résultats obtenus ont permis de constater que l'augmentation ou la diminution du débit influence directement l'échange thermique entre les deux fluides. L'étude des températures de sortie a ainsi permis d'évaluer les performances thermiques de l'échangeur dans différentes conditions de fonctionnement.

Ce travail représente également une application pratique des connaissances acquises dans le domaine du transfert de chaleur et de la mécanique des fluides, tout en mettant en évidence l'importance des outils de simulation numérique dans l'analyse et l'optimisation des systèmes thermiques.

Enfin, cette étude ouvre la voie à d'autres recherches portant sur l'amélioration des performances des échangeurs thermiques, notamment par l'utilisation de nouveaux fluides ou par la modification de certains paramètres géométriques et thermiques.

Référence

- [1] S. M. Rafik, « Simulation Thermique D'un Echangeur De Chaleur A Faisceau Tubulaire Et Calandre ».
- [2] A. D. P. P. PAR, U. A. HALLOYSITIQUE, et M. CHIMIQUÉMENT, « Mémoire de fin d'études DE MASTER ACADEMIQUE », Université d'Alger, 2021.
- [3] E. Rahima, « Domaine : Sciences et Technologies Filière : Génie des procédés Spécialité : Génie chimique ».
- [4] A. AMROUNE, « Mémoire de fin d'étude ».
- [5] B. Malek et T. Fatine, « Filière : Génie des Procédés Spécialité : Génie Chimique ».
- [6] P. Tobaly, « Échangeurs de chaleur », *Licence professionnelle thesis, IUT of St Denis, GPI*, p. 10-11, 2002.
- [7] H. RAGUEB et A. KHALDI, « Mémoire de fin d'étude ».
- [8] S. U. S. Choi et J. Eastman, « Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles », in *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, janv. 1995.
- [9] S. U. Choi, « Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles », in *ASME international mechanical engineering congress and exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 1995, p. 99-105.
- [10] S. K. Das, S. U. S. Choi, W. Yu, et T. Pradeep, « Convection in nanofluids », *Nanofluids. Wiley*, p. 209-296, 2007.
- [11] N. Joudeh et D. Linke, « Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists », *Journal of Nanobiotechnology*, vol. 20, n° 1, p. 262, juin 2022, doi: 10.1186/s12951-022-01477-8.
- [12] J. Buongiorno, « Convective transport in nanofluids », 2006.
- [13] S. Kakaç et A. Pramuanjaroenkij, « Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids », *International journal of heat and mass transfer*, vol. 52, n° 13-14, p. 3187-3196, 2009.
- [14] P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, et J. A. Eastman, « Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) », *International journal of heat and mass transfer*, vol. 45, n° 4, p. 855-863, 2002.
- [15] S. K. Das, S. U. Choi, W. Yu, et T. Pradeep, *Nanofluids: Science and Technology*. Wiley, 2007. [En ligne]. Disponible sur: <https://books.google.fr/books?id=QpbOpMSpXpYC>
- [16] D. A. Brakna et H. Benzenine, « Computational analysis of hybrid nanofluid flow in a Double-Tube heat exchanger: a numerical study », *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 10, n° 3, p. 479-487, 2024.
- [17] C. T. Nguyen *et al.*, « Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? », *International journal of thermal sciences*, vol. 47, n° 2, p. 103-111, 2008.
- [18] B. C. Pak et Y. I. Cho, « Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles », *Experimental Heat Transfer an International Journal*, vol. 11, n° 2, p. 151-170, 1998.
- [19] R. R. Sahoo et J. Sarkar, « Heat transfer performance characteristics of hybrid nanofluids as coolant in louvered fin automotive radiator », *Heat and Mass transfer*, vol. 53, n° 6, p. 1923-1931, 2017.
- [20] M. S. Patil, J.-H. Seo, S.-J. Kang, et M.-Y. Lee, « Review on synthesis, thermo-physical property, and heat transfer mechanism of nanofluids », *Energies*, vol. 9, n° 10, p. 840, 2016.
- [21] T. Hu, J. Zhang, J. Xia, X. Li, P. Tao, et T. Deng, « A review on recent progress in preparation of medium-temperature solar-thermal nanofluids with stable dispersion », *Nanomaterials*, vol. 13, n° 8, p. 1399, 2023.
- [22] H. Akoh, Y. Tsukasaki, S. Yatsuya, et A. Tasaki, « Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate », *Journal of Crystal Growth*, vol. 45, p. 495-500, 1978.

Références

- [23] D. P. Kshirsagar et M. A. Venkatesh, « A review on hybrid nanofluids for engineering applications », *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, p. 744-755, janv. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.637.
- [24] M. A. Akhavan-Behabadi, M. Saeedinia, et S. M. Hashemi, « An Empirical Study on Heat Transfer Characteristics of CuO/Base Oil Nanofluid Flow in a Tube With Coiled Wire Inserts », in *Engineering Systems Design and Analysis*, 2010, p. 549-555.
- [25] S. K. Das, N. S. D. Putra, P. Thiesen, et W. Roetzel, « Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids », *Journal of heat transfer*, vol. 125, n° 4, p. 567-574, 2003.
- [26] W. Yu, D. M. France, S. U. Choi, et J. L. Routbort, « Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications. », Argonne National Laboratory (ANL), 2007.
- [27] J. J. Wang, R. T. Zheng, J. W. Gao, et G. Chen, « Heat conduction mechanisms in nanofluids and suspensions », *Nano Today*, vol. 7, n° 2, p. 124-136, 2012.
- [28] L. S. Sundar, K. V. Sharma, M. K. Singh, et A. C. M. Sousa, « Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor—a review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, p. 185-198, 2017.
- [29] N. A. Zainal, R. Nazar, K. Naganthran, et I. Pop, « MHD mixed convection stagnation point flow of a hybrid nanofluid past a vertical flat plate with convective boundary condition », *Chinese Journal of Physics*, vol. 66, p. 630-644, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2020.03.022>.
- [30] D. A. Brakna et H. Benzenine, « Computational Analysis of Hybrid Nanofluid Flow in a Double-Tube Heat Exchanger: A Numerical Study », *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 10, n° 3, p. 479-487, 2024, doi: 10.22055/jacm.2024.45368.4368.
- [31] M. Ismael Hasan, M. Dakhel Salman, et A. Lateef Thajeel, « Enhancement of Thermal Performance of Double Pipe Heat Exchanger By Using Nanofluid », *Journal of Engineering and Sustainable Development*, vol. 22, n° 02, p. 150-165, 2018, doi: 10.31272/jeasd.2018.2.91.
- [32] B. Ghulam ridha ali et Z. Khalefa Kadhim, « Analysis study of nano fluids and longitudinal fins on the heat transfer in the counter flow double pipe heat exchanger », *Wasit Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, n° 2, p. 44-56, 2022, doi: 10.31185/ejuow.vol10.iss2.288.
- [33] D. S. Chandra, G. S. Murthy, et S. K. Francis, « Enhancement of Heat Transfer in Counter Flow Shell and Helical Coil Tube Heat Exchanger (SHCHE) Using Ni-Cu Hybrid Nano Fluid Under Turbulent Flow Regime by Varying Volume Concentration , Pitch , Flow Rate and Coil Material », vol. 73, n° 10, p. 1-11, 2025, doi: 10.18311/jmmf/2025/49581.
- [34] D. S. Chandra, G. S. Murthy, S. K. Francis, et D. Sriramsetti, « Enhancement of Heat Transfer in Counter Flow Shell and Helical Coil Tube Heat Exchanger (SHCHE) Using Ni-Cu Hybrid Nano Fluid Under Turbulent Flow Regime by Varying Volume Concentration, Pitch, Flow Rate and Coil Material. », *Journal of Mines, Metals & Fuels*, vol. 73, n° 10, 2025.
- [35] A. S. Kurhade, G. D. Siraskar, et M. M. Darade, « Enhancement in Heat Transfer with Nanofluids in Double-Pipe Heat Exchangers », vol. 73, n° 1, p. 165-172, 2025, doi: 10.18311/jmmf/2025/47225.
- [36] K. R. Kumar, M. R. Chandan, B. Kiran, et A. H. Shaik, « Novel Cu-MXene hybrid nanofluids for the experimental investigation of thermal performance in double pipe heat exchanger », p. 1-24, 2025.
- [37] A. Y. M. Ali, H. I. Elqady, et M. R. El-marghany, « Effect of Using MgO-Oil Nanofluid on the Performance of a Counter-Flow Double Pipe Heat Exchanger », vol. 801, p. 193-198, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.801.193.
- [38] R. Al Mezrakchi, « Investigation of various hybrid nanofluids to enhance the performance of a shell and tube heat exchanger », vol. 12, n° December 2023, p. 235-255, 2024, doi: 10.3934/energy.2024011.
- [39] A. S. Alhulaifi, « Computational Fluid Dynamics Heat Transfer Analysis of Double Pipe Heat Exchanger and Flow Characteristics Using Nanofluid TiO₂ with Water », *Designs*, vol. 8, n° 3, p. 39, 2024.
- [40] M. J. Hasan, S. F. Ahmed, et A. A. Bhuiyan, « Geometrical and coil revolution effects on the performance enhancement of a helical heat exchanger using nanofluids », *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 35, p. 102106, 2022.

Références

- [41] M. Molana, « A comprehensive review on the nanofluids application in the tubular heat exchangers », *Am. J. Heat Mass Transf*, vol. 3, n° 5, p. 352-381, 2016.
- [42] S. P. Behera, A. Ghosh, S. K. Nayak, et S. K. S. Parashar, « Thermal performance study of heat exchanger by applying nanofluids », *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [43] A. Fluent, « Ansys fluent theory guide », (No Title), 2023.
- [44] A. Fluent, « Ansys fluent theory guide », (No Title), 2023.
- [45] M. Ben-Halima, A. Redjem, S. Dehimi, et A. Bensaid, « Assessment and mapping of areas at risk of flooding using a combined AHP and GIS multi-criteria analysis model—case study of Sidi Aissa city (Algeria) », *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 2025.
- [46] Z. I. D. Islam, « L'intensification des échanges thermiques dans les échangeurs de chaleur par nano fluides" Application à un échangeur double enveloppes" ».
- [47] A. Hosseini Naeini, J. Baghbani Arani, A. Narooei, R. Aghayari, et H. Maddah, « Nanofluid thermal conductivity prediction model based on artificial neural network », *Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology*, vol. 4, n° 2, p. 41-46, 2016.
- [48] A. Kahli, R. Sahnouni, O. Mordjane, A. Boumahdaf, et H. Chenchouni, « Assessing Forest Burn Severity, Post-Fire Recovery, Vegetation Shifts, and Forest Resilience Across Mediterranean-Type Woodlands », *Journal of Sustainable Forestry*, vol. 45, n° 3, p. 225-254, 2026.
- [49] A. S. Alhulaifi, « Computational Fluid Dynamics Heat Transfer Analysis of Double Pipe Heat Exchanger and Flow Characteristics Using Nanofluid TiO₂ with Water », *Designs*, vol. 8, n° 3, p. 39, 2024.
- [50] S. Khalatbari, P. Jalili, B. Jalili, et D. D. Ganji, « Investigating the improvement of heat transfer and flow characteristics of hybrid nanofluids: A comprehensive review », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, p. 09544089251318785, 2025.
- [51] G. Canbolat, « Numerical and Theoretical Investigation of Thermal Performance in Double Pipe Heat Exchanger Using Nanofluids with Integrated CFD and ANN Methods », *Arabian Journal for Science and Engineering*, p. 1-18, 2026.
- [52] M. Béjean, F. Kletz, et J.-C. Moisdon, « Création de valeur organisationnelle et technologies de l'information à l'hôpital: le cas du dossier patient informatisé », *Gestion et management public*, vol. 64, n° 2, p. 9-24, 2018.
- [53] M. Anila et G. D. Pradeepini, « A review on parkinson's disease diagnosis using machine learning techniques », *IJERT*, vol. 9, p. 330-334, 2020.
- [54] G. Huminic et A. Huminic, « Application of nanofluids in heat exchangers: a review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 8, p. 5625-5638, 2012.
- [55] C. T. Nguyen, G. Roy, C. Gauthier, et N. Galanis, « Heat transfer enhancement using Al₂O₃—water nanofluid for an electronic liquid cooling system », *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, n° 8-9, p. 1501-1506, 2007.
- [56] E. V. Timofeeva, W. Yu, D. M. France, D. Singh, et J. L. Routbort, « Nanofluids for heat transfer: an engineering approach », *Nanoscale research letters*, vol. 6, n° 1, p. 182, 2011.
- [57] Z. khalefa Kadhim, « Analysis study of nano fluids and longitudinal fins on the heat transfer in the counter flow double pipe heat exchanger », *Wasit Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, n° 2, p. 44-56, 2022.
- [58] S. A. Nada, R. M. El-Zoheiry, M. Elsharnoby, et O. S. Osman, « Enhancing the thermal performance of different flow configuration minichannel heat sink using Al₂O₃ and CuO-water nanofluids for electronic cooling: an experimental assessment », *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 181, p. 107767, 2022.
- [59] T. K. Murtadha, A. A. dil Hussein, A. A. Alalwany, S. S. Alrwashdeh, et A. M. Al-Falahat, « Improving the cooling performance of photovoltaic panels by using two passes circulation of titanium dioxide nanofluid », *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 36, p. 102191, 2022.
- [60] P. M. Kumar *et al.*, « Study on the photovoltaic panel using nano-CeO₂/Water-based Nanofluid », *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 18, n° 8, p. 6215-6224, 2024.
- [61] M. R. Khan *et al.*, « Numerical simulation and mathematical modeling for heat and mass transfer in MHD stagnation point flow of nanofluid consisting of entropy generation », *Scientific Reports*, vol. 13, n° 1, p. 6423, 2023.

Références

- [62] Z. khalefa Kadhim, « Analysis study of nano fluids and longitudinal fins on the heat transfer in the counter flow double pipe heat exchanger », *Wasit Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, n° 2, p. 44-56, 2022.