

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 Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master  
Domaine : Science et Technologie  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Energétique  
Thème

**Analyse numérique tridimensionnelle du comportement thermique d'un échangeur de chaleur à tube spiralé équipé de chicanes**

**Présenté Par :**

- 1) Melle. MAGHRAOUI Fatna Loudjine
- 2) Melle. BOUHASSIDA Souad Nourelhane

**Devant le jury composé de :**

Pr. BENSAD Bourassia

UAT.B. B (Ain Temouchent) Président

Mr. GUENDOZ Bouhelal

UAT.B. B (Ain Temouchent) Examineur

Pr. BENZENINE Hamidou

UAT.B. B (Ain Temouchent) Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

# REMERCIEMENTS

Louange à Allah, le Tout-Puissant, qui nous a comblées de ses bienfaits, guidées tout au long de notre parcours et nous a permis d'achever ce travail.

Nous exprimons nos plus sincères remerciements à **Monsieur le Professeur Hamidou BENZENINE**, de l'Université de Aïn Témouchent, pour nous avoir proposé ce sujet de projet, ainsi que pour son encadrement bienveillant, ses conseils pertinents, sa disponibilité constante et ses encouragements tout au long de cette aventure scientifique.

Nos remerciements s'adressent également à **Madame** le Professeur Bourassia BENZAAD, de la même université, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider notre jury. Sa présence témoigne de l'intérêt qu'il porte à notre travail, et nous lui en sommes profondément reconnaissantes.

Nous adressons aussi notre vive gratitude à **Monsieur** guendouz **BOUHALEL**, qui a accepté d'évaluer ce mémoire en tant que membre du jury. Son regard critique et ses remarques constructives seront, sans aucun doute, une grande valeur ajoutée à notre travail.





## Dédicace

À la mémoire de mon père **MAQRABOU** Hamida , qui reste une source infinie d'inspiration.

À ma mère, **SAD** Hasnia, pour son amour et son soutien indéfectible.

À mes sœurs, **Fatima El Zehra** et **Kheira**, ainsi qu'à sa fille **Hoor** et son mari **BENBAH** Mohammed.

À mon frère, **Kamel**, et sa femme **LAKHDARI** Hafida, ainsi qu'à leurs enfants jumeaux, **Mohammed** et **Meriem**.

Et ma chère amie **BOLLARAF** Fatna.

Votre présence et votre affection ont illuminé mon parcours.

**MAQRABOU** Fatna Loudjine

dédie ce mémoire avec tout mon amour, ma reconnaissance et mon respect :

À mon père et ma mère, piliers de ma vie, pour leurs innombrables sacrifices, leur patience et leur amour sans limite.

À mes sœurs {**wissam** et **dounia**} et à mon frère {**mohammed elhabib**} , pour leur présence rassurante, leur affection et leur soutien constant.

À toute ma famille {**bouhass**, source de force, d'équilibre et d'inspiration.

À mes cousines {**sihem**, **amina** et **sakina**, **mohammed**} , pour leurs encouragements, leur joie de vivre et leur complicité.

Et tout particulièrement, à ma grand-mère bien-aimée, dont les prières m'ont toujours accompagnée, et dont la tendresse éclaire chacun de mes pas. Que ce travail soit à la hauteur de tout l'amour et de la foi que vous m'avez portés.

Merci infiniment. **Souad Nourelhane**



## Résumé

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs d'ingénierie essentiels, largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels pour assurer le transfert thermique entre deux fluides.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons pris comme modèle de référence un échangeur de type faisceau tubulaire à calandre. Une étude numérique a été menée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent sur deux configurations d'échangeurs à tubes spiralés, ayant des dimensions extérieures identiques.

La première configuration concerne un échangeur à tubes spiralés simple, tandis que la seconde intègre cinq chicanes, ajoutées dans le but d'améliorer les performances de transfert thermique. L'étude porte sur la variation de la température de sortie en fonction de la vitesse du fluide, avec une comparaison détaillée entre les deux modèles.

**Mots-clés :** Échangeur de chaleur, transfert thermique, échangeur à tubes spiralés, échangeur à faisceau et calandre, méthode des volumes finis, ANSYS Fluent, fluide, vitesse, chicanes.

## Abstract

Heat exchangers are essential engineering devices widely used across various industrial sectors to facilitate heat transfer between two fluids. In this study, a shell-and-tube heat exchanger is taken as the reference model. A numerical investigation was carried out using ANSYS Fluent software on two spiral tube heat exchanger configurations with identical outer dimensions.

The first configuration features a simple spiral tube design, while the second includes five baffles, added to enhance heat transfer performance. The study focuses on the variation of outlet temperature with respect to fluid velocity, with a comparative analysis between the two models.

**Keywords :** Heat exchanger, heat transfer, spiral tube heat exchanger, shell and core heat exchanger, finite volume method, ANSYS Fluent, fluid, velocity, baffles.

## المخلص

تُعد المبادلات الحرارية من الأجهزة الهندسية الأساسية، وتُستخدم على نطاق واسع في العديد من القطاعات الصناعية لضمان انتقال الحرارة بين مائعين. في هذا البحث، تم اعتماد مبادل حراري من نوع الغلاف والحزمة الأنبوبية كنموذج مرجعي. وقد أُجريت دراسة عددية باستخدام برنامج ANSYS Fluent على تصميمين لمبادلات حرارية بأنابيب حلزونية، لهما أبعاد خارجية متطابقة. التصميم الأول يعتمد على أنبوب حلزوني بسيط، بينما يتضمن التصميم الثاني خمس حواجز داخلية (عوازل) لتحسين أداء نقل الحرارة.

تركز الدراسة على تغيير درجة حرارة المخرج بالنسبة لسرعة المائع، مع إجراء مقارنة بين النموذجين.  
**الكلمات المفتاحية:** المبادل الحراري، انتقال الحرارة، المبادل الحراري الأنبوبي الحلزوني، المبادل الحراري الغلافي واللب، طريقة الحجم المحدود، ANSYS Fluent، السوائل، السرعة، الحواجز

## LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATION

S	Surface du transfert de chaleur	(m <sup>2</sup> )
V	Le volume de fluide	(m <sup>3</sup> )
T	Temp	(s)
M	La masse	(kg)
Θ	La vitesse de fluide	(m/s)
D <sub>int</sub>	Le diamètre intérieur	(m)
D <sub>ext</sub>	Le diamètre extérieur	(m)
ρ	La masse volumique	(kg/m <sup>3</sup> )
ṁ <sub>f</sub>	Le débit massique de l'eau froide	(m <sup>2</sup> /s)
d	La densité	
k	Coefficient globale du transfert de chaleur	W/m <sup>2</sup> . °C
L	Longueur du tube	(m)
C <sub>p</sub>	Chaleur massique à pression constante	(J/kg K)
NUT	Nombre d'unités de transfert	sans dimension
C <sub>min</sub>	La plus faible valeur entre	(J/Kg.°C)
C <sub>c</sub>	Capacité thermique du fluide chaude	(J/Kg.°C)
C <sub>f</sub>	Capacité thermique du fluide froid	(J/Kg.°C)
Q <sub>v</sub>	Le débit volumétrique	(m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>m</sub>	Le débit massique	(kg/s)
q	Le flux thermique	(W)
q̇	La densité de flux thermique	(W/m <sup>2</sup> )
Q	La quantité de chaleur	(J)
R	La résistance thermique	(K/W)
e	L'épaisseur du matériau	(m)
h	Coefficient d'échange convectif	
λ	Conductivité thermique du fluide	W/m.°C
T <sub>ce</sub>	Température du fluide chaude à l'entrée	(°C)
T <sub>cs</sub>	Température du fluide chaude à la sortie	(°C)
T <sub>fe</sub>	Température du fluide froide à l'entrée	(°C)
T <sub>fs</sub>	Température du fluide froide à la sortie	(°C)



# Sommaire



# TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Introduction générale.....	01
Chapitre I: Concepts de Base sur les Échangeurs de Chaleur et le Transfert d'Énergie Thermique.....	03
I.1 Introduction.....	03
I.2 Transfert de chaleur.....	03
I.2.1 Conduction.....	03
I.2.2 La convection.....	04
I.2.3 Le Rayonnement.....	05
I.3 Principe de fonctionnement et son rôle d'un échangeur de chaleur.....	06
I.4 Critères de classement des échangeurs de chaleur.....	07
I.4.1 Selon le type de contact.....	07
I.4.1.a Échangeurs à contact direct.....	07
I.4.1.b Échangeurs à contact indirect.....	07
I.4.2 Selon le type d'échange.....	07
I.4.2.a Échangeur sans changement de phase.....	07
I.4.2.b Échangeur avec changement de phase.....	07
I.4.3 Selon Classement fonctionnel.....	08
I.4.4 Selon la compacité de l'échangeur.....	08
I.4.5 Selon la nature du matériau de la paroi d'échange.....	08
I.4.5.a Les échangeurs métalliques.....	08
I.4.5.b Les échangeurs non métallique.....	08
I.4.6 Selon leur principe de fonctionnement.....	08
I.4.6.a Échangeurs de chaleur indirects.....	08
I.4.6.b Échangeurs de chaleur directs.....	10
I.4.7 Selon la disposition des écoulements.....	10
I.4.7.a Écoulement contre-courant.....	19
I.4.7.b Écoulement co-courant.....	11
I.4.7.c Écoulement courant croise.....	11
I.5 Technologie des échangeurs thermiques.....	11
I.5.1 Échangeurs à plaques.....	12
I.5.1.a Échangeurs surface primaire.....	13
I.5.1.b Échangeurs de chaleur à surface secondaire sont.....	14
I.5.2 Les échangeurs tubulaires.....	13
I.5.3 Échangeur Monotube.....	16
I.5.4 Échangeur coaxiale.....	17
I.5.5 Échangeur multitubulaire.....	18
I.5.5.a Échangeur à tubes séparés.....	18
I.5.5.b Échangeur à tubes rapprochés.....	18
I.5.5.c Échangeur à tubes ailettes.....	19
I.5.6 Échangeur à tubes et calandre.....	19
I.5.7 Échangeur de chaleur spiralée.....	20

I.6 Les éléments échangeur à tubes.....	21
I.6.1 La calandre.....	21
I.6.2 La chicane.....	21
I.6.2.a Les chicanes transversales.....	22
I.6.2.b Les Chicanes longitudinales.....	22
I.6.3 Boîtes de distribution ou chambres de distribution.....	23
I.6.4 Faisceau.....	23
I.6.5 Plaques tubulaires.....	23
I.7 L'encrassement des équipements d'échange thermique.....	24
I.8 Définition de l'encrassement.....	25
I.9 Type d'encrassement.....	25
I.9.1 Encrassement particulaire.....	25
I.9.2 Encrassement dû à la corrosion.....	25
I.9.3 Entartrage.....	26
I.9.4 Encrassement biologique.....	26
I.9.5 Encrassement par réaction chimique.....	26
I.9.6 Encrassement par solidification.....	26
I.10 Conséquence de l'encrassement.....	27
I.11 Processus encrassement.....	27
I.12 Détection de l'encrassement.....	27
I.13 Méthode de nettoyage.....	28
I.14 Applications des échangeurs de chaleur.....	28
I.14 Conclusion.....	29
Chapitre II:Étude bibliographique approfondie sur les échangeurs de chaleur et les progrès en matière.....	30
II.1 Introduction.....	30
II.2 Quelques travaux sur les échangeurs de chaleur.....	30
II.3 CONCLUSION.....	46
Chapitre III: Modélisation physique de l'échangeur, formulation des équations fondamentales et mise en œuvre d'une résolution numérique avec ANSYS FLUENT (Workbench 2023 R2).progrès en matière d'optimisation thermique.....	48
III.1 Introduction.....	48
III.2 Les grandeurs physiques.....	48
III.2.1 Le debit.....	48
III.2.2 La densité(d).....	48
III.2.3 La viscosité.....	48
III.2.4 Le nombre de Reynolds (Re).....	48
III.2.5 Le nombre de Prandtl.....	49
III.2.6 Nombre de Nusselt.....	49
III.2.7 Diamètre hydraulique.....	50
III.3 Les grandeurs thermiques.....	50
III.3.1 La chaleur (Q).....	50
III.3.2 Champ de température.....	50
III.3.3 La chaleur spécifique.....	50
III.3.4 Flux thermique.....	50
III.3.5 Conductivité thermique.....	51
III.3.6 Résistance.....	51
III.3.7 Coefficient d'échange convectif.....	51
III.4 Type de transfert de chaleur.....	51
III.4.1 Conduction.....	51

III.4.2 Convection.....	52
III.4.3 Rayonnement.....	52
III.5 Etude d'un échangeur de chaleur.....	52
III.5.1 Hypothèse spécifiques.....	53
III.5.2 Équations de gouvernantes.....	53
III.5.3 Méthode de nombre d'unité de transfert( NUT).....	53
III.5.4 Méthode de différence logarithmique moyenne ( $\Delta TLM$ ).....	55
III.5.5 La perte de charge.....	55
III.6 Méthode des volumes finis.....	58
III.6.1 Les étapes de volume finis.....	58
III.7 Présentation du logiciel ANSYS FLUENT.....	60
III.8 Présentation du problème.....	61
III.9 Les conditions aux limites :.....	64
III.10 Conclusion.....	65
Chapitre IV: Analyse des résultats de simulation d'optimisation thermique.....	67
IV .1 Introduction.....	67
IV.2 Présentation et discussion des résultats.....	67
Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	81
Références.....	



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : Exemples de conductivité des matériaux (23).....	19
Tableau 02 : Exemples de coefficient de convection des thermique (23).....	20
Tableau 03 : L'efficacité de l'échangeur ( $\epsilon$ ).....	54
Tableau 04 : Autre équation pour calculer le nombre de NUT.....	54
Tableau 05 : Les dimension de l'échangeur de chaleur.....	61
Tableau 06: variation de température de sortie des deux côtes en fonction de vitessed'entrée.....	67
Tableau 07 : variation de température de sortie des deux côtes en fonction de vitesse d'entrée.....	69
Tableau 08: variation de température en fonction de l'écoulement.....	70
Tableau 09: variation de température en fonction de l'écoulement.....	71

# LISTE DES FIGURES

Figure 1: Le transfert de chaleur par conduction .....	3
Figure 2 : transfert de chaleur par convection .....	4
Figure 3 : le transfert de chaleur par rayonnement .....	6
Figure 4: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur .....	6
Figure 5: Cowpers en fonctionnement discontinu .....	9
Figure 6 : Échangeur de chaleur coaxial en fonctionnement à courant parallèle.....	9
Figure 7 : Tour de refroidissement par voie humide.....	10
Figure 8 : Profils de température d'un échangeur de Chaleur coaxial fonctionnant à contre-courant.....	10
Figure 9 : Profils de température d'un échangeur de chaleur coaxial fonctionnant en co-courant.....	11
Figure 10 : Profil de température pour une seule rangée de tubes avec courants croisés mélanges d'un cote .....	11
Figure 11 : Les avantages et les inconvénients d'échangeurs à plaque .....	12
Figure 12 : Echangeur à plaques .....	12
Figure 13 : Plaques picotée .....	13
Figure 14 : Échangeur à plaque .....	13
Figure 15 : Échangeur PLATULAIRE.....	14
Figure 16 : Échangeur COMPABLOC .....	15
Figure 17 : Échangeur PACKINO .....	15
Figure 18 : Échangeur LAMELLAIRE .....	16
Figure 19 Échangeur monotube en serpenti.....	16
Figure 20 : Échangeur de chaleurs tubulaires coaxiale.....	17
Figure 21 : Les avantages et les inconvénients d'Échangeur coaxial.....	17
Figure 22 : Les avantages et les inconvénients d'Échangeur multitubulaire existant sous plusieurs forme .....	18
Figure 23 : Échangeur de chaleur multitubulaire à tubes séparés .....	18
Figure 24 : Échangeur de chaleur multitubulaire à tubes rapprochés.....	19
Figure 25 : Les avantages et les inconvénients d'échangeur à tubes ailette .....	19
Figure 26 : Échangeur de chaleur à tubes en U et calandre .....	20
Figure 27 : Les avantages et les inconvénients, Applications d'Échangeur de chaleur spiralée .....	21
Figure 28 : Echangeur à tubes et calandre .....	22
Figure 29 : Types de chicanes .....	23
Figure 30 : Boites de distribution ou chambres de distribution. ....	23
Figure 31 : plaques tubulaires .....	24
Figure 32 : exemple sur l'encrassement.....	25
Figure 33 : Formation de dépôt .....	26
Figure 34 :échangeur de chaleur à tube spiralé.....	30
Figure 35 :un échangeur de chaleur à double tube concentrique(ccc).....	32
Figure 36 :Un modèle 3D d'un échangeur de chaleur.....	33

Figure 37 :Coupe transversale d'un échangeur de chaleur à calandre et tubes.....	35
Figure 38 : échangeur de chaleur à calandre et tubes(mmm).....	36
Figure 39 : échangeurs de chaleur à double tube en spirale.....	38
Figure 40 :Les schémas de principe des échangeurs de chaleur géothermiques à tube en U et à tube spiralé.....	39
Figure 41 :Modèle tridimensionnel des échangeurs de chaleur géothermiques conventionnels à tube en U et à tube spiralé.....	40
Figure 42 :Représentation schématique d'un échangeur de chaleur à ruban spiralé incliné....	42
Figure 43 :Vue schématique de l'échangeur de chaleur à microcanaux.....	43
Figure 44:Vue schématique de l'installation expérimentale.....	44
Figure45 : shema de principe du dispositif experimental .....	45
Figure 46 :Échangeur de chaleur à calandre et à tubes avec angle de chicane.....	45
Figure 47 : Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à co-courant.....	56
Figure 48: Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à contre-courant.....	56
Figure 49 : Le flux de chaleur.....	57
Figure 50 : Discrétisation en volumes finis dans le cas monodimensionne.....	59
Figure 51 : DDescription bidimensionnel d'un volume fini.....	59
Figure 52 : Les étapes de volume finis.....	60
Figure 53 : interface de logiciel Ansys workbench.....	60
Figure 54 : schéma descriptif du model du premier cas « simple, sans chicane » : (a) présentation simple , (b) présentation avec maillage.....	62
Figure 55 : schéma descriptif du model du deuxième cas « contenant cinq chicanes » : (a) présentation simple , (b) présentation avec maillage.....	63
Figure 56 : variation de température de fluide en fonction de vitesse d'entrée, a cote chaud, b cote froid.....	68
Figure 57 : variation de température de fluide en fonction de vitesse d entree ,a cote chaud, b cote froid.....	69
Figure 58 : Echangeur de chaleur a tube spiralé.....	72
Figure 59 : Echangeur de chaleur à tube spiralé avec des chicanes.....	75
Figure 60 : Ecoulement Co courant.....	78



# ***Introduction générale***

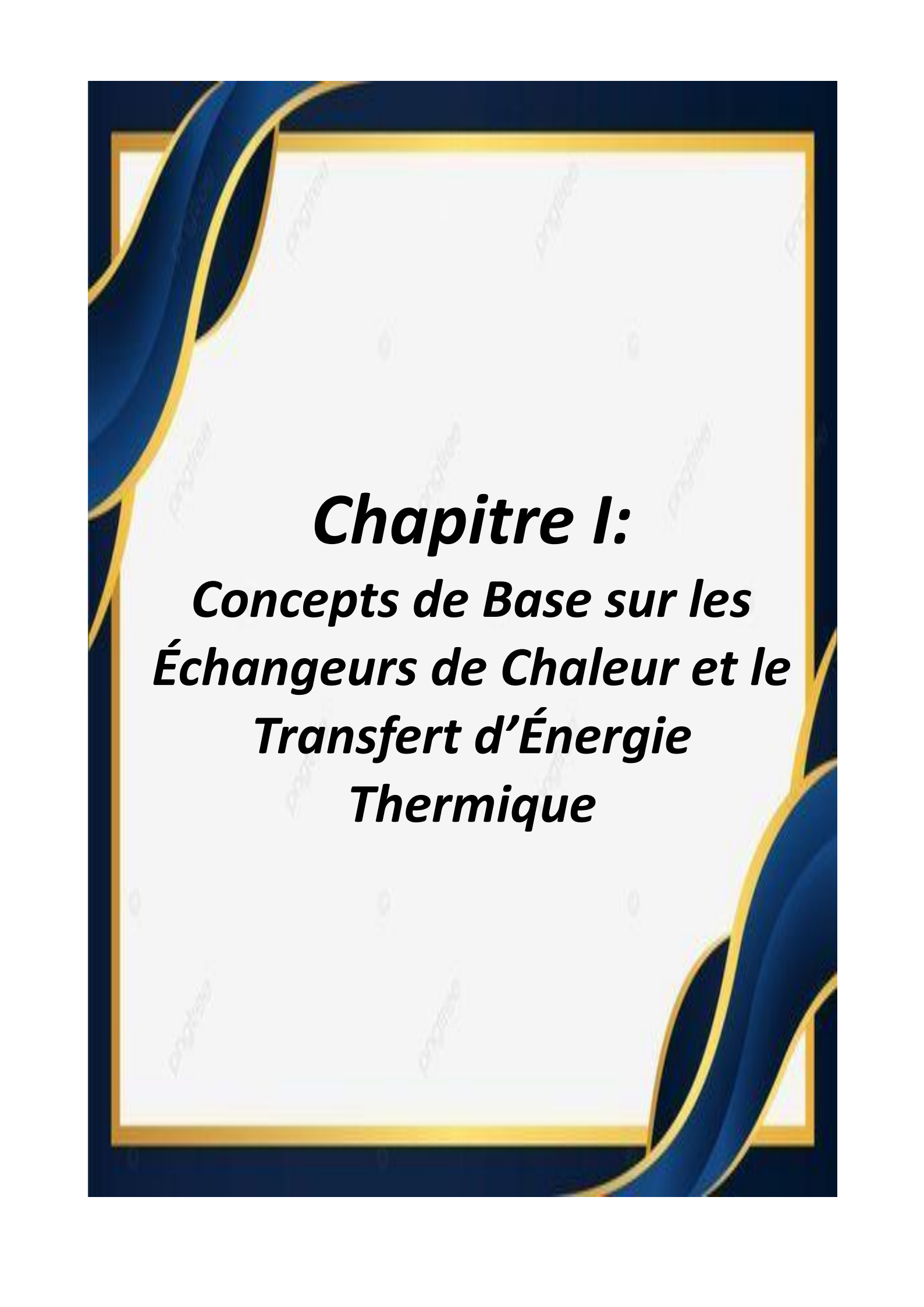
### Introduction Générale

Les technologies thermiques et énergétiques, c'est l'étude des dispositifs d'échange de chaleur permet d'optimiser le rendement et la durabilité des systèmes. L'optimisation du transfert de chaleur est un enjeu majeur pour de nombreuses applications industrielles. Les échangeurs de chaleur, dispositifs conçus pour faciliter les échanges thermiques entre fluides à différentes températures, occupent ainsi une place centrale. Parmi les nombreuses configurations existantes, les échangeurs à tube spiralé, qu'ils soient simples ou dotés de chicanes, présentent une conception unique favorisant une amélioration significative des performances thermiques grâce à leur architecture enroulée.

L'étude de ces équipements requiert une analyse approfondie de leurs caractéristiques géométriques et thermo physiques, ainsi que des paramètres influant sur les conditions d'écoulement et d'échange thermique. Afin d'optimiser leur fonctionnement, cette recherche se focalise sur la simulation numérique d'un échangeur de chaleur à tube spiralé, dans ses versions simples et à chicanes. L'objectif est de perfectionner ses performances en ajustant divers paramètres clés, notamment la température d'entrée du fluide chaud, l'espacement entre les spires et les débits des fluides.

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres, suivis d'une conclusion générale :

- ✓ Chapitre I: Concepts de Base sur les Échangeurs de Chaleur et le Transfert d'Énergie Thermique
- ✓ Chapitre II: Étude bibliographique approfondie sur les échangeurs de chaleur et les progrès en matière
- ✓ Chapitre III : Modélisation physique de l'échangeur, formulation des équations fondamentales et mise en œuvre d'une résolution numérique avec ANSYS FLUENT (Workbench 2023 R2).
- ✓ Chapitre IV : Analyse des résultats de simulation



***Chapitre I:***  
***Concepts de Base sur les***  
***Échangeurs de Chaleur et le***  
***Transfert d'Énergie***  
***Thermique***

## I.1 Introduction

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs thermiques essentiels qui permettent le transfert d'énergie entre deux fluides à des températures différentes. Leur principe de fonctionnement repose sur la circulation de ces fluides à travers des conduits séparés par une paroi conductrice, favorisant ainsi l'échange thermique sans contact direct. Indispensables dans de nombreux secteurs industriels, tels que la production d'énergie, l'ingénierie chimique, ou encore la réfrigération, ces systèmes optimisent l'efficacité énergétique et réduisent les pertes thermiques. Leur conception varie en fonction des applications, offrant une diversité de technologies adaptées aux besoins spécifiques des industries modernes.

## I.2 Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur ou le transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les deux corps.

On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur : [1]

### I.2.1 Conduction

Elle est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux au repos, ou encore entre deux milieux en contact physique. (Les atomes se transmettent la chaleur de proche en proche) [1]

Le transfert de chaleur par conduction caractérise tous les transferts de chaleur qui s'effectuent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes. C'est le cas des surfaces d'échange des échangeurs de chaleur [1]

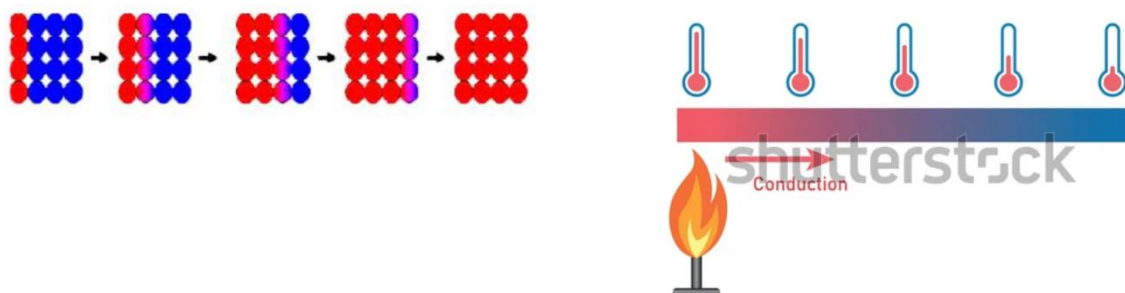


Figure 1: Le transfert de chaleur par conduction [31][25]

Le flux de transfert de chaleur dépend de la conductivité thermique du produit

Tableau 01 : Exemples de conductivité des matériaux[2]

Matériaux	Valeur pour une Température de 20°C
Aluminium (pureté de 99,9%)	237
Carbone	129
Platine	71,6
Acier doux	46
Acier inoxydable (18% Chrome, 8% Nickel)	26
Bois de pin (parallèle aux fibres)	0,36
Bois de pin (perpendiculaire aux fibre)	0,15

**I.2.2 La convection**

Elle Consiste en une transmission de chaleur par le mouvement réel des molécules en raison d'une différence de température. C'est un Processus caractéristique des liquides et des gaz : les particules proches d'une source de chaleur présentent une température plus élevée et, par conséquent, une densité inférieure par rapport aux autres, ces particules s'élèvent l'intérieur du fluide et sont remplacées par des particules plus froides. Ainsi, une transmission de chaleur se produit par l'intermédiaire du mouvement des différentes particules

Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses.[1]

Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz. La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques [1]

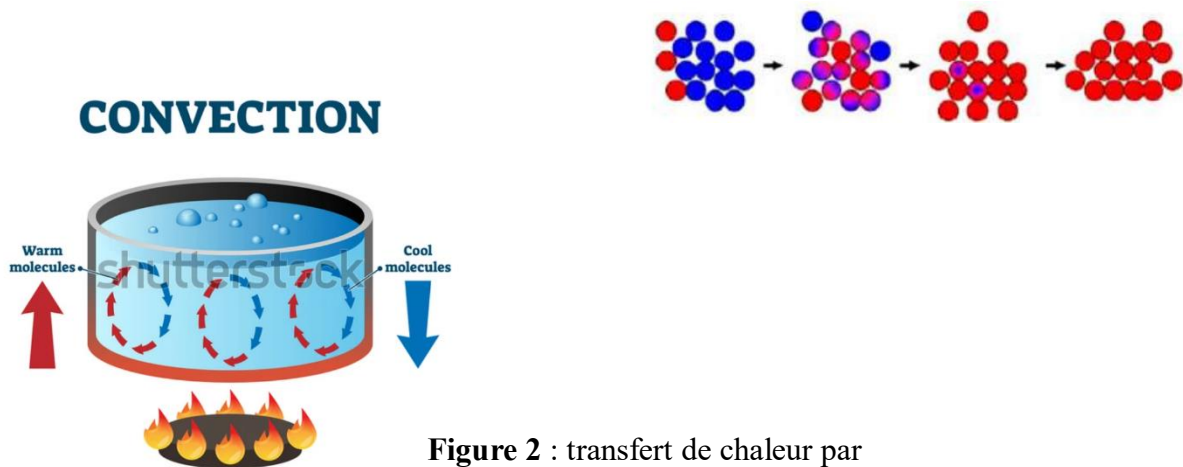


Figure 2 : transfert de chaleur par convection [31][25]

Il y a deux types de transmission de chaleur par convection : la convection naturelle due à une différence de densité et la convection forcée due à l'action d'appareils mécaniques, tels que pompes ou compresseurs.[1]

- Le flux du transfert de chaleur dépend de la nature chimique du produit.
- Plus la surface d'échange est importante, plus le transfert de chaleur est important.
- Plus l'écoulement est turbulent, plus le transfert de chaleur est rapide.

**Tableau02** : Exemples de coefficient de convection des thermique[2]

Fluide	$h_{ed}, h_{id}$ [W/m <sup>2</sup> K]
Eau de rivière	3 000 – 12 000
Eau de mer	1 000 – 3 000
Eau refroidissement (tour)	3 000 – 6 000
Eau de ville (dureté faible)	3 000 – 5 000
Eau de ville (dureté élevée)	1 000 – 2 000
Condensant vapeur d'eau	1 500 – 5 000
Vapeur d'eau (sans traces)	4 000 – 10 000
Liquide chauffage	5 000
Vapeur d'eau (traces d'huile)	2 000 – 5 000
Air, gaz industriels	5 000 – 10 000
Fumées	2 000 – 5 000
Vapeur organique	5 000
Liquide organique	5 000
Hydrocarbures lourds	5 000
Liquide organique bouillant	2 5000

### I.2.3 Le Rayonnement

Le rayonnement c'est l'écoulement de chaleur par ondes électromagnétique d'un corps haute température vers un corps à température plus basse. Il y a un rayonnement lorsque les corps sont séparés par des molécules soit lorsqu'ils se trouvent dans le vide

Le rayonnement permet le transfert de chaleur sans aucun intermédiaire matériel (comme le soleil qui transmet la chaleur vers les planètes). [1]

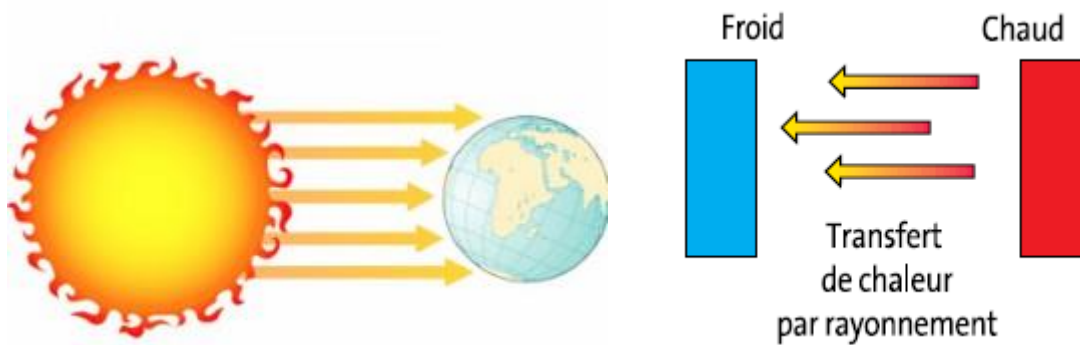


Figure 3 : le transfert de chaleur par rayonnement [32][33]

### I.3 Principe de fonctionnement et son rôle d'un échangeur de chaleur

Le principe général d'un échangeur de chaleur consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduites qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi, le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid[3]

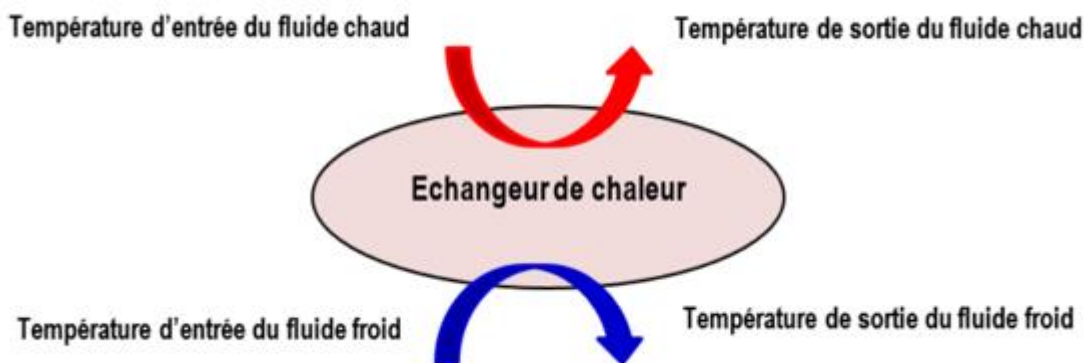


Figure 4: Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur [3]

Les échangeurs de chaleur dans l'industrie peuvent assurer de nombreuses fonctions. Voici leurs principaux rôles :[4]

- Préchauffer ou refroidir un liquide ou un gaz, par exemple de l'air.
- Récupérer de l'énergie thermique (de la chaleur). Une fonction très intéressante, si vous vous intéressez comme nous à la performance énergétique de vos installations.
- Réfrigérer, c'est-à-dire dissiper l'énergie produite vers un milieu extérieur. Lorsqu'on refroidit grâce à l'air, on parle d'aéroréfrigérant, qui peut être sec ou humide.

- Capturer ou émettre de l'énergie thermique. Dans ce cas, l'échangeur est en charge de capturer l'énergie et la transmettre vers l'endroit où elle sera utilisée. Exemple concret : nos radiateurs, qui capturent la chaleur du système de chauffage et la transmettent vers l'air ambiant des pièces que nous chauffons.
- Condenseurs. L'échangeur assure la condensation partielle ou totale d'un gaz.
- Évaporateurs. L'échangeur assure tout ou partie de l'évaporation d'un liquide.

### I.4 Critères de classement des échangeurs de chaleur

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs, les principaux sont les suivants :

#### I.4.1 Selon le type de contact

Dans cette classification, on distingue deux configurations :

##### I.4.1.a Échangeurs à contact direct

Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent presque la même température finale.

##### I.4.1.b Échangeurs à contact indirect

Dans ce cas, les deux fluides s'écoulent à l'intérieur de l'échangeur dans des espaces séparés par une paroi, le plus souvent métallique. [5]

#### I.4.2 Selon le type d'échange

On distingue les échangeurs de chaleur monophasiques et diphasiques :

##### I.4.2.a Échangeur sans changement de phase

Correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des deux fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait un changement de phase. Les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur.

##### I.4.2.b Échangeur avec changement de phase

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents :

- L'un des deux fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.
- Le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.

- Le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état.[5]

### I.4.3 Selon Classement fonctionnel

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; Suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre Alors les différents cas suivants :

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- Un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs
- Les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapocondenseurs.[6]

### I.4.4 Selon la compacité de l'échangeur

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. Un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à  $700 \text{ m}^2 / \text{m}^3$  ; cette valeur est susceptible de varier de  $500$  à  $800 \text{ m}^2 / \text{m}^3$  . (5)

### I.4.5 Selon la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi :

#### I.4.5.a Les échangeurs métalliques

En acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires.

#### I.4.5.b Les échangeurs non métalliques

En plastique, céramique, graphite, verre, etc.[7]

### I.4.6 Selon leur principe de fonctionnement

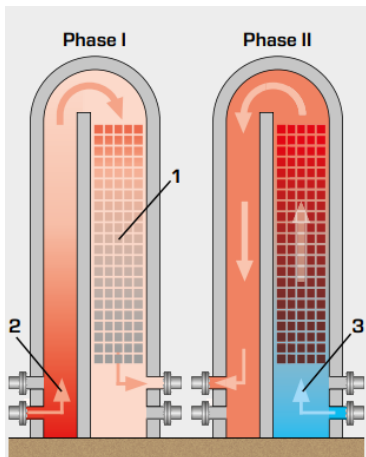
#### I.4.6.a Échangeurs de chaleur indirects

##### ➤ Régénérateurs

- cowpers des hauts fourneaux
- échangeurs thermiques rotatifs

Dans les régénérateurs, du fluide chaud et du fluide froid circulent alternativement dans les réservoirs thermiques. Le transfert de chaleur se fait de manière indirecte, étant donné que le flux thermique est d'abord transféré à un fluide de stockage puis transmis avec un décalage

dans le temps au fluide cible.[8]



Phase I : la masse de stockage 1 est chauffée par le gaz de fumée 2

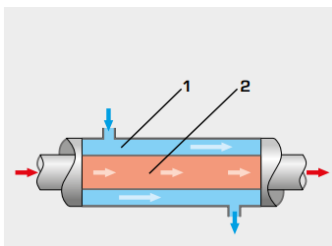
Phase II : l'air froid 3 est acheminé auprès de la masse de stockage chauffée au préalable et se chauffe à son contact

Figure 5: Cowpers en fonctionnement discontinu [8]

➤ **Récupérateurs**

- échangeurs de chaleur coaxiale
- échangeurs de chaleur à faisceau tubulaire
- échangeurs de chaleur à plaques

Les récupérateurs sont traversés simultanément de manière stationnaire par deux fluides. Les flux de fluide peuvent être acheminés à courant parallèle, à contre-courant et à courants croisés. Une paroi sépare les flux de fluide : elle sert de surface de transfert. La chaleur est transférée indirectement du fluide chaud à la paroi de séparation, et de la paroi de séparation au fluide froid, sans délai. (8)



- 1 tube externe,
- 2 tubes internes ;
- Fluide chaud,
- Fluide froid

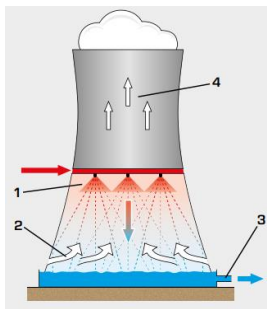
Figure 6 : Échangeur de chaleur coaxial en fonctionnement à courant parallèle[8]

**I.4.6.b Échangeurs de chaleur directs**

➤ **Échangeurs de chaleur par contact direct**

- tour de refroidissement par voie humide
- refroidissement intermédiaire dans les laminoirs

Les échangeurs de chaleur par contact direct mettent en contact deux fluides de températures différentes, et les mélangent. Le transfert de chaleur et de masse a lieu directement.[8]



- 1- brouillard d'eau chaude,
- 2- entrée d'air,
- 3- eau refroidie,
- 4- air humide

Figure 7 : Tour de refroidissement par voie humide[8]

## I.4.7 Selon la disposition des écoulements

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories :

Même sens « co-courants ».

Sens contraire « contre-courant ».

Ou bien les vecteurs vitesses sont perpendiculaire l'un à l'autre ; il s'agit cette fois de « courant croisés »

### I.4.7.a Écoulement contre-courant

En écoulement à contre-courant, le fluide froid sort à l'endroit où entre le fluide chaud. Lorsque l'échangeur de chaleur est bien conçu, on peut même obtenir une température de sortie plus élevée du côté froid que du côté chaud [9]

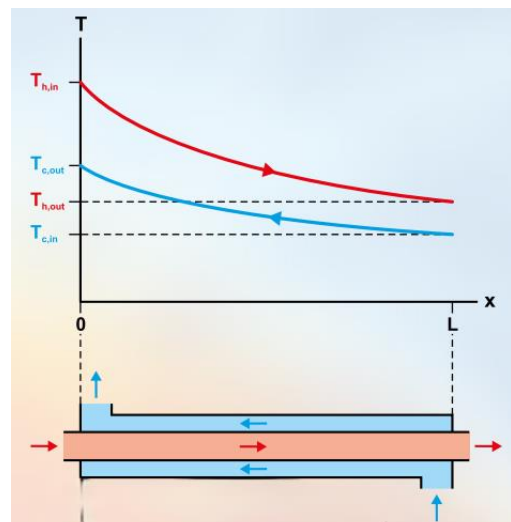
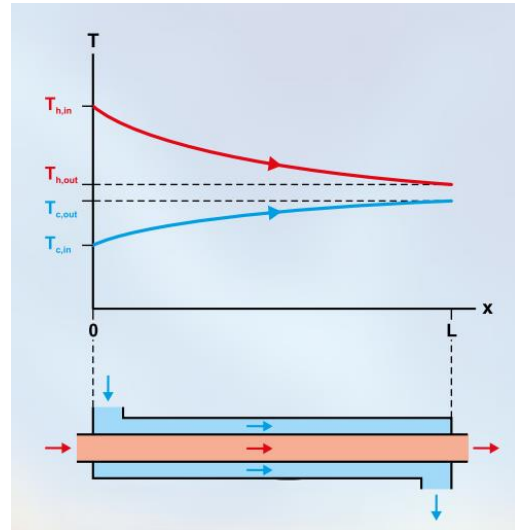


Figure 8 : Profils de température d'un échangeur de Chaleur coaxial fonctionnant à contre-courant[9]

**I.4.7.b Écoulement co-courant**

Cela n'est pas possible lorsque l'échangeur de chaleur fonctionne à co-courant. La température de sortie du côté froid peut atteindre au maximum la température de sortie du côté chaud. Les fluides s'écoulent l'un à côté de l'autre dans le même sens.[9]

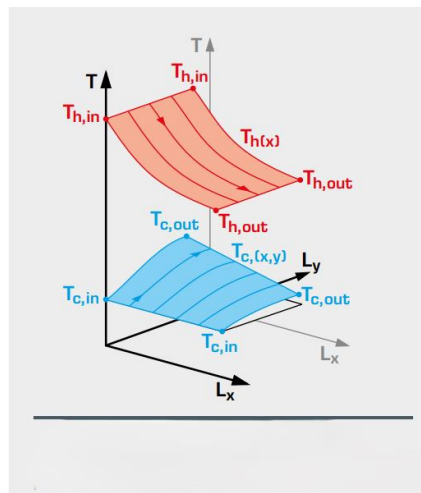


**Figure 9 :** Profils de température d'un échangeur de chaleur coaxial fonctionnant en co-courant[9]

**I.4.7.c Écoulement courant croise**

La troisième variante est constituée par l'écoulement croisé utilisé en particulier pour la thermostatique exacte d'un produit sensible à la température.

Afin de profiter au mieux des avantages présentés par les différentes géométries d'écoulement, on les utilise souvent en combinaison. Ainsi, pour la thermostatisation rapide et fiable de grandes quantités de produits chimiques agressifs, on utilise un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires.[9]



**Figure 10 :** Profil de température pour une seule rangée de tubes avec courants croises mélanges d'un cote [8]

**I.5 Technologique des échangeurs thermiques**

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

### I.5.1 Echangeurs à plaques

À surface primaire ou à surface secondaire (avec des ailettes). Les échangeurs à plaques ont les meilleures performances thermiques. Cependant leur efficacité importante a fait qu'ils sont actuellement largement utilisés pour des applications diverses. On les rencontre dans l'industrie du froid et de la cryogénie, dans l'industrie chimique et pétrochimique, dans l'industrie pharmaceutique, dans l'industrie alimentaire.[10]

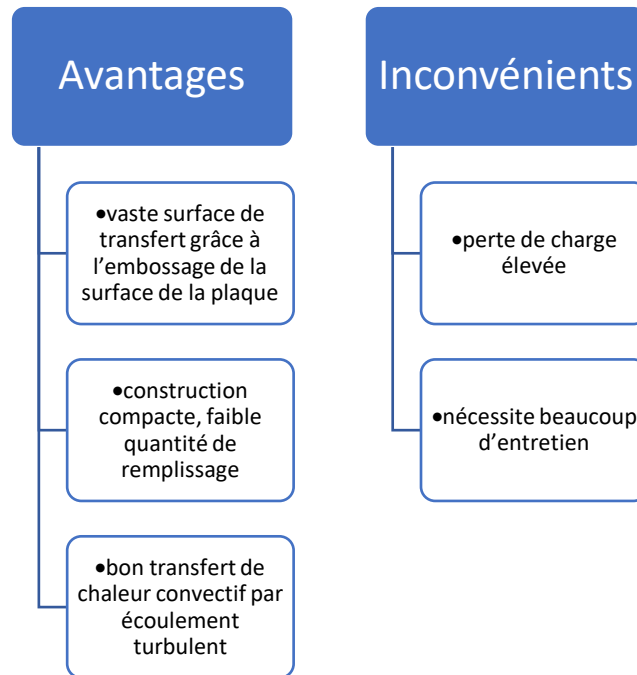


Figure 11 : Les avantages et les inconvénients d'échangeurs à plaques[8]

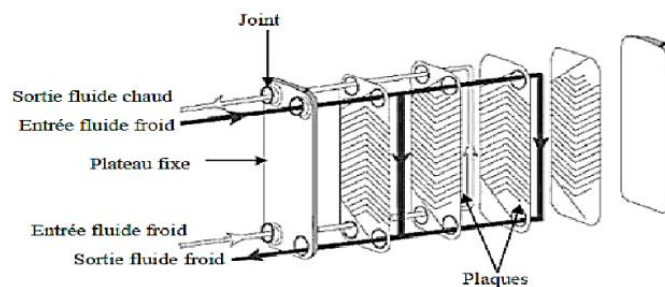


Figure 12 : Echangeur à plaques.[11]

On distingue trois familles d'échangeurs à plaques suivant la géométrie du canal de circulation des fluides :

- Échangeurs à surface primaire.

- Échangeurs à surface secondaire[3]

### I.5.1.a Échangeurs surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques nervurées ou picotées. Le dessein ci-dessous formé a deux rôles :

- Intensification du transfert de chaleur (par augmentation de la turbulence),
- Tenue à la pression (par multiplication des points de contact.[3])

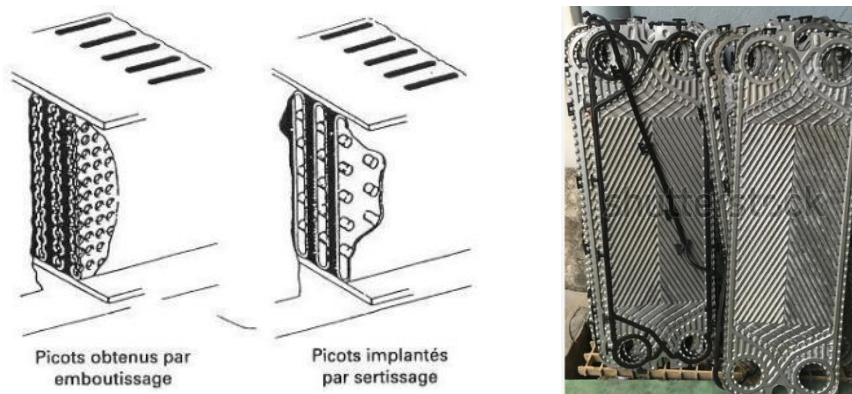


Figure 13 : Plaques picotées[3]

### ➤ Échangeur à plaques et joints

L'échangeur de chaleur à plaque est constitué de plaques, de tubes ou de gaufrages, de faible épaisseur en aluminium ou matière plastique qui séparent les veines d'air, le matériau utilisé pour la fabrication des plaques est de l'aluminium, de l'acier inoxydable ou un matériau synthétique.

Les plaques sont assemblées, et les courants sont généralement croisés, afin de maximiser l'échange convectif, les plaques peuvent être gaufrées et créer de la sorte une turbulence.[3]

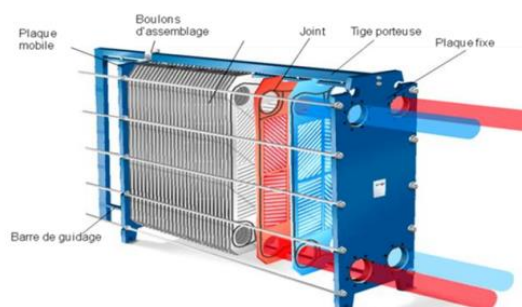


Figure 14 : Échangeur à plaques[3]

### 1.5.1.b Échangeurs de chaleur à surface secondaire sont

Constitués d'un empilement de tôles ondulées, formant des ailettes, séparées par des tôles planes. Ils peuvent être fabriqués selon deux techniques principales : [3]

#### ➤ Échangeurs à plaques serties

Ils sont composés de tôles planes parallèles, entre lesquelles sont insérées des ailettes pour maximiser le transfert thermique. [3]

#### ➤ Échangeurs à plaques soudées ou brasées

Les échangeurs de chaleur à plaques soudées sont assemblés par brasage d'acier inoxydable. Ils ne comportent ni cadre ni tirant. Le fluide circule à contre-courant et la chaleur est transférée par conduction à travers les plaques. Différents types sont disponibles. [12]

#### ○ Échangeurs patulaires

Il s'agit d'un ensemble de plaques plates embouties. Il existe plusieurs types de dispositifs : certains sont constitués d'une cavité plate équipée de spoilers, d'autres de broches embouties et soudées. [12]

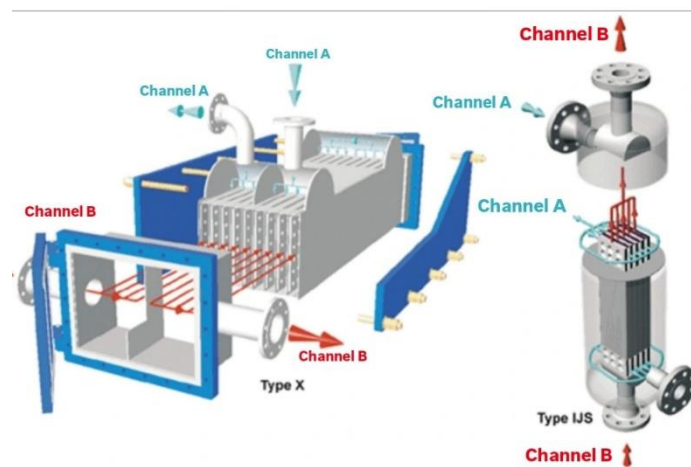


Figure 15 : Échangeur PLATULAIRE [13]

#### ○ Échangeur COMPABLOC

Il est constitué d'un ensemble de plaques carrées embouties et soudées entre elles. L'ensemble est inséré dans un gabarit dont les plaques latérales sont des couvercles amovibles. La circulation du fluide est transversale. [12]

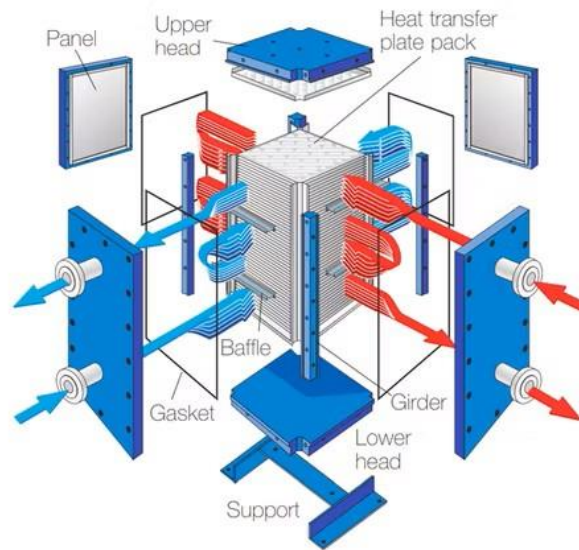


Figure 16 : Échangeur COMPABLOC[14]

○ **Échangeur PACKINOX**

C'est un échangeur à plaques soudées, il est composé de plaques de grande dimension construites par explo-fromage (explosion en piscine) puis assemblées et soudées sous forme de faisceau[12]

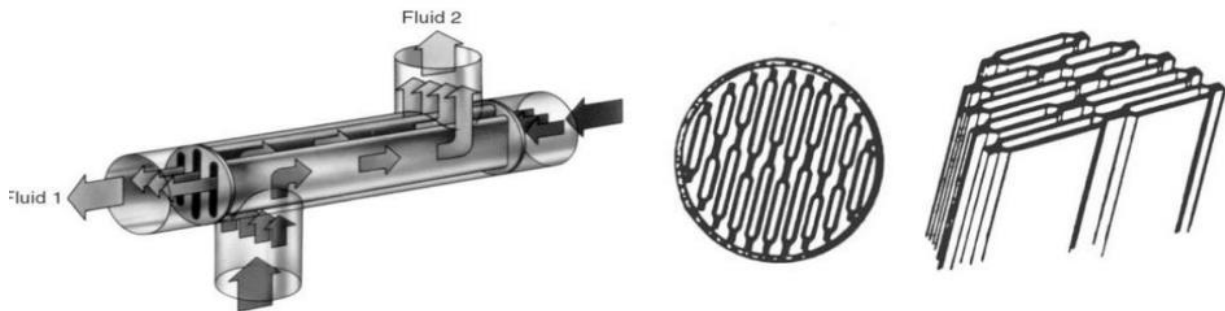


Figure 17 : Échangeur PACKINOX[15]

○ **Échangeur LAMELLAIRE**

Il s'agit d'une variante de l'échangeur de chaleur à calandre, dont le cœur est constitué de tubes plats ou lamelles. Ces lamelles sont constituées de deux plaques assemblées et soudées pour former un canal dans lequel circule un fluide. Chaque lamelle peut contenir un élément

interne (turbulateur) pour une meilleure résistance à la pression et un meilleur échange thermique.[16]



**Figure 18** : Échangeur LAMELLAIRE[17]

### ○ Échangeur de chaleur brasé

Il s'agit d'une variante de l'échangeur de chaleur à plaques et joints classique, mais sans joints ni tirants : il n'y a pas de brasures entre les plaques. Cela rend l'échangeur de chaleur plus compact.[3]

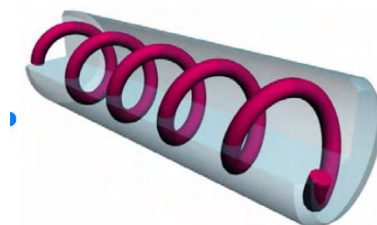
## I.5.2 Les échangeurs tubulaires

Pour des raisons économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus.

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée.[18]

### I.5.3 Échangeur monotube

De forme serpentine : C'est un échangeur dans lequel le tube est placé dans un réservoir de façon serpentine[19]



**Figure 19** Échangeur monotube en serpentin[19]

### I.5.4 Échangeur coaxial

Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés, en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur [3]

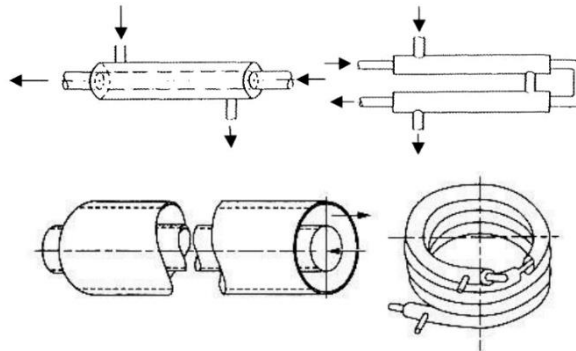


Figure 20 : Échangeur de chaleurs tubulaires coaxiales[3]

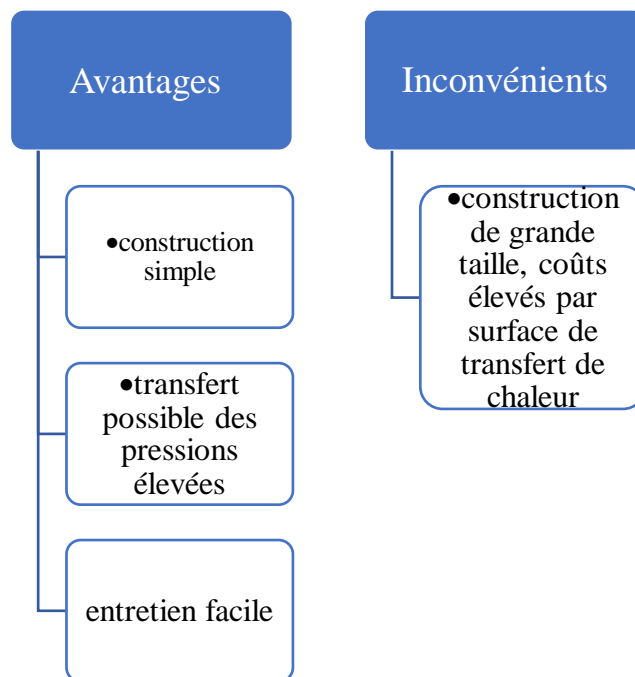


Figure 21 : Les avantages et les inconvénients d'Échangeur coaxial[8]

### I.5.5 Échangeur multitubulaire

L'échangeur tubulaire, ou échangeur multitubulaire, est un type d'échangeur thermique se composant d'un faisceau de tubes disposé à l'intérieur d'une enveloppe nommée « calandre ». [3]

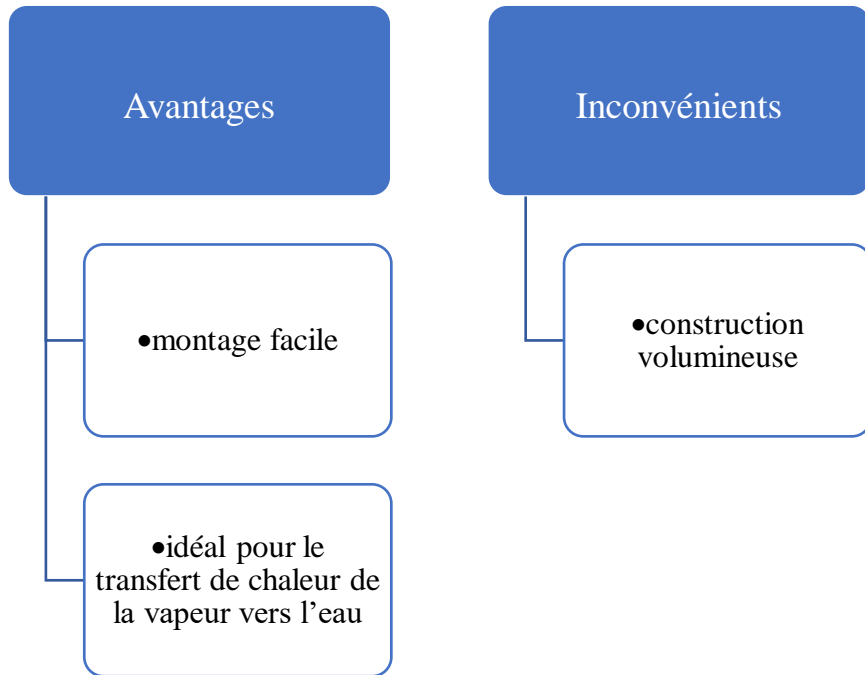


Figure 22 : Les avantages et les inconvénients d'Échangeur multitubulaire existant sous plusieurs formes[8]

#### I.5.5.a Échangeur à tubes séparés

à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.[3]

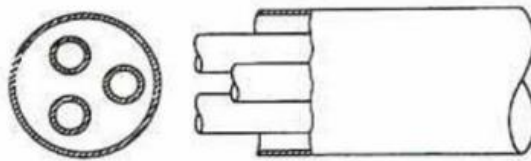


Figure 23 : Échangeur de chaleur multitubulaire à tubes séparés[3]

#### I.5.5.b Échangeur à tubes rapprochés

pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans[3]

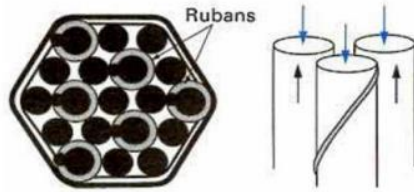


Figure 24 : Échangeur de chaleur multitubulaire à tubes rapprochés.[3]

### I.5.5.c Échangeur à tubes ailettes

ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.[3]

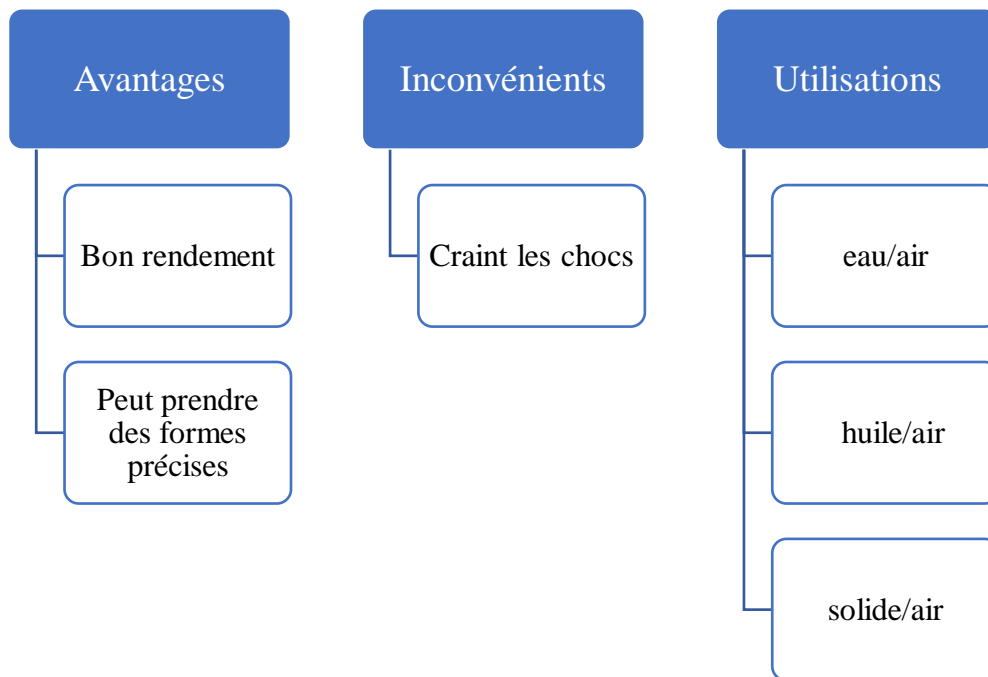


Figure 25 : Les avantages et les inconvénients d'échangeur à tubes ailettes[20]

### I.5.6 Échangeur à tubes et calandre

Ce type d'échangeur thermique est l'un des plus couramment utilisés. Il est composé d'un ensemble de tubes cylindriques, appelés faisceau tubulaire, logé à l'intérieur d'une grande enveloppe appelée calandre. Les tubes sont disposés parallèlement à l'axe de la calandre. Le fluide circulant dans les faisceaux est distribué grâce à des boîtes de répartition qui maintiennent également les extrémités des tubes. De son côté, le fluide secondaire s'écoule à travers la calandre, en passant entre les faisceaux. Sa trajectoire est guidée par des chicanes, qui favorisent la turbulence et améliorent ainsi l'efficacité thermique de l'échangeur.[21]

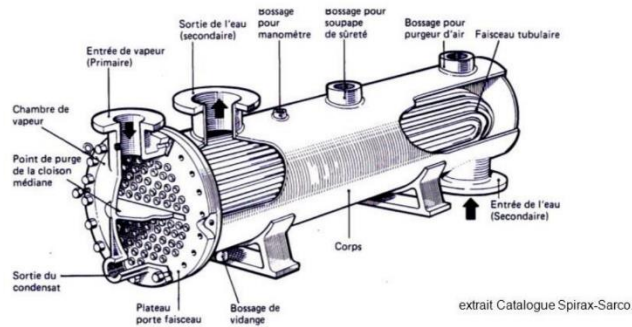


Figure 26 : Échangeur de chaleur à tubes en U et calandre[22]

### I.5.7 Échangeur de chaleur spiralée

L'échangeur de chaleur à spirale est constitué de deux canaux concentriques formés par deux plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale. La distance entre les deux canaux est obtenue à l'aide de taquets soudés sur les plaques et tient compte des débits, de la taille des particules pour les fluides chargés et des pertes de charge. Ces taquets ont également pour effet de favoriser un écoulement turbulent dans chaque canal et d'améliorer ainsi le coefficient d'échange.

L'échangeur peut être utilisé pour des transferts monophasiques (essentiellement liquide/liquide) ou avec changement de phase dans l'écoulement (condenseur ou évaporateur). Pour des applications monophasiques (typiquement en récupération d'énergie) les fluides circulent généralement à contre-courant.

La conception de ces échangeurs leur donne la particularité intéressante d'être « autonettoyants ». En effet contrairement aux échangeurs qui distribuent le fluide dans de multiples canaux, la totalité du fluide s'écoule ici dans le canal de l'échangeur spiralé, sans zone morte. Si celui-ci s'encrasse, le fluide n'a pas d'autre chemin possible. La vitesse du fluide augmente alors sous l'effet de la pression et le fluide entre en turbulence, ce qui aide à éliminer les dépôts et à garder les surfaces propres sous l'effet des frottements.[23]

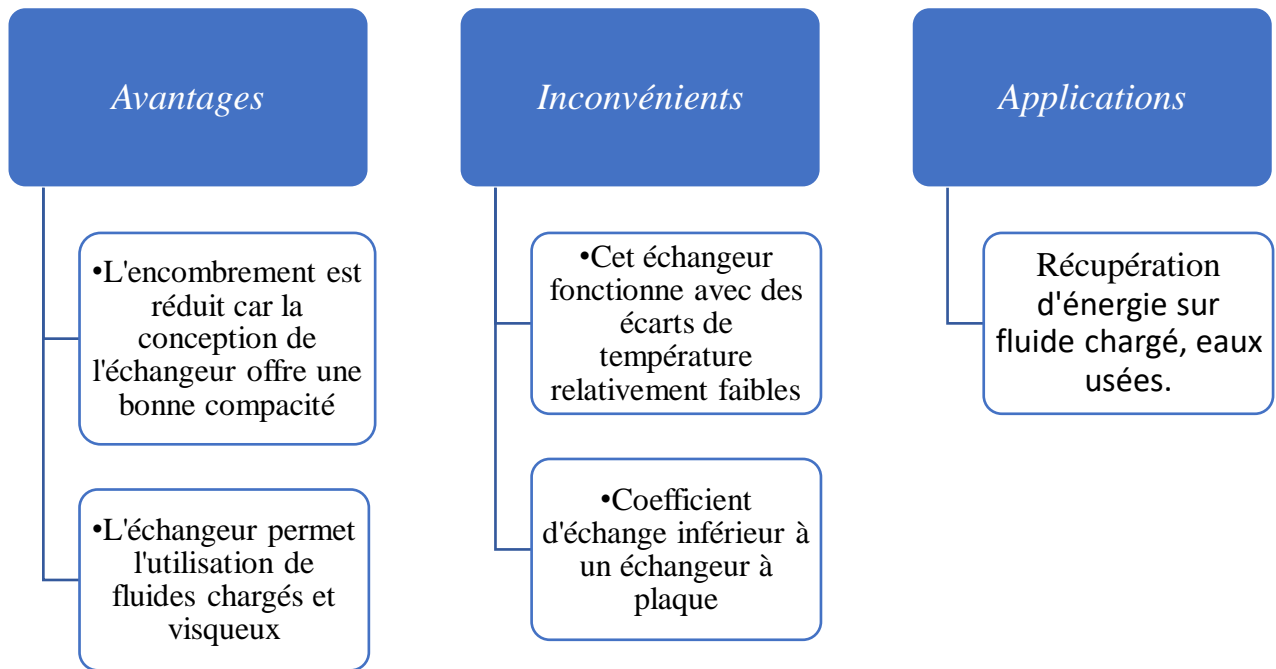


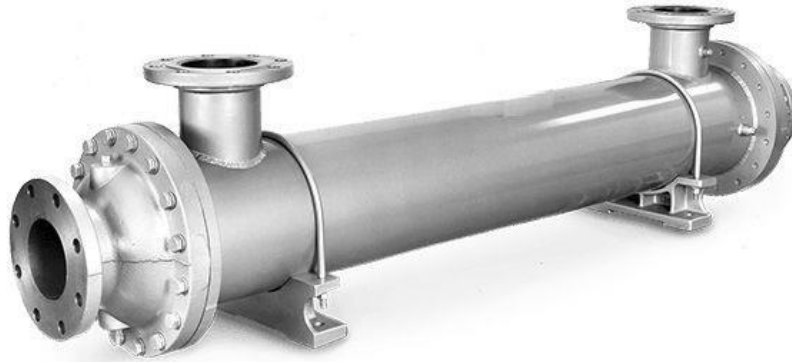
Figure 27 : Les avantages et les inconvénients, Applications d'Échangeur de chaleur spiralée[23]

## I.6 Les éléments échangeurs à tubes

### I.6.1 La calandre

C'est l'enveloppe métallique entourant le faisceau tubulaire, et généralement l'acier au carbone est le matériau le plus couramment utilisé pour la construction des calandres. Pour un diamètre nominal inférieur à 24", la calandre est constituée par un tube d'acier, pour des pressions de service inférieures à 20 kg/cm<sup>2</sup>. Au-delà de 24 la calandre est réalisée à partir de plaques d'acier roulées et soudées chaque extrémité sont soudées les brides qui porteront le couvercle et la boîte de distribution. Les tubulures d'entrée et de sortie sont soudées avec plaque de renforcement ou non, selon la pression de service.

Enfin la calandre pourra être équipée d'anneaux pour le levage et portera la plaque d'identité de l'appareil.[24]



**Figure 28** : Echangeur à tubes et calandre

## **I.6.2 La chicane**

Les chicanes peuvent avoir deux rôles :

- Augmenter la rigidité du faisceau, pour éviter les phénomènes de vibration
- Augmenter la vitesse du fluide

Il existe deux types de chicanes :[24]

### **I.6.2.a Les chicanes transversales**

Sont généralement constituées par un disque ayant un diamètre légèrement inférieur à celui de la calandre et comportant un segment libre dont la surface représente 20 à 45% de la section totale. Ces chicanes ont pour but d'allonger le chemin du fluide circulant dans la calandre, et d'améliorer ainsi le transfert à l'extérieur du tube. Dans le cas des échangeurs horizontaux, une échancrure est aménagée à la partie inférieure des chicanes pour faciliter la vidange et le nettoyage et vite l'encrassement par stagnation à la partie inférieure.[24]

Les chicanes transversales assurent la rigidité du faisceau tubulaire, elles sont solidaires à la plaque tubulaire fixe au moyen de tirant et entretoise qui occupent la place de tube les standards (TEMA) imposent un nombre de tirants entre 4 à 10.[24]

### **I.6.2.b Les Chicanes longitudinales**

Sont généralement constituées par une simple tôle insérée au milieu du faisceau cette disposition oblige le fluide à effectuer un aller et un retour dans la calandre.[24]

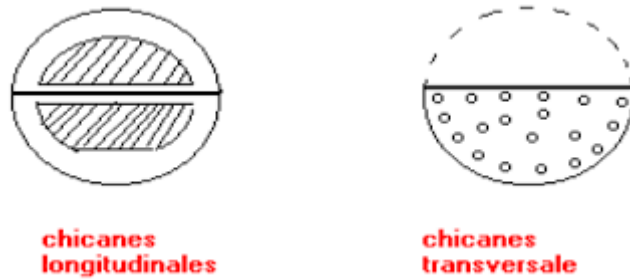


Figure 29 : Types de chicanes [25]

### I.6.3 Boites de distribution ou chambres de distribution

La chambre de distribution ou boites de distribution permet de distribuer le fluide en vue de réaliser 1, 2, 4,6 ou 8 passes. Le nombre de passe est généralement limité par la perte de charge admissible. Le second facteur limitant est si la différence de température à l'entrée et à la sortie est importante ; pour une différence de 150 °C une seule passe s'impose.[24]

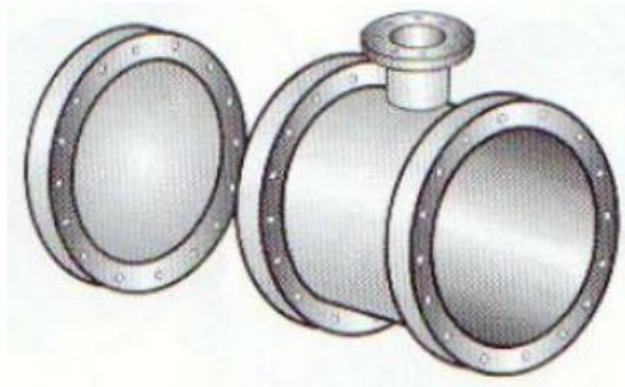


Figure 30 : Boites de distribution ou chambres de distribution.

### I.6.4 Faisceau

C'est l'ensemble des tubes constituant le faisceau, les épaisseurs de tubes sont normalisées selon le calibre BWG (Birmingham Wire Gage). NB : Les conditions de fonctionnement imposent le choix du matériau. Exemple : -Acier au carbone pour usage général. -Aciers alliés pour les produits corrosifs et les températures élevées. -Aluminium ou cuivre pour les très basses températures.[24]

### I.6.5 Plaques tubulaires

Ce sont des plaques percées supportent les tubes à leurs extrémités, leurs épaisseurs varient entre 5 et10 cm.[Les tubes généralement sont fixés par soudage.]

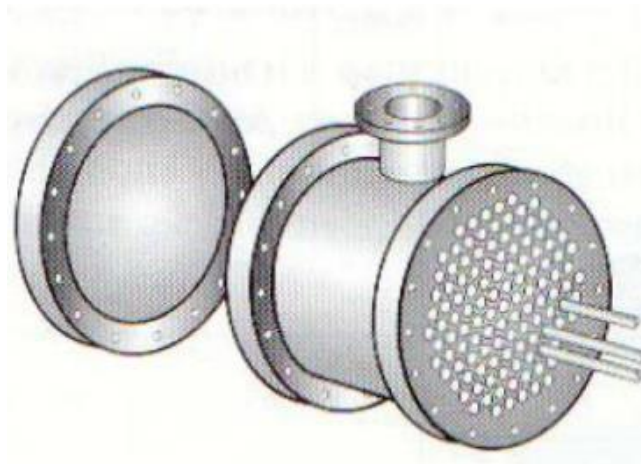


Figure 31 : plaques tubulaires

## I.7 L'encrassement des équipements d'échange thermique

Les principaux problèmes de fonctionnement rencontrés par les utilisateurs d'équipements d'échange thermique ont trait aux phénomènes d'encrassement, de corrosion, de vibrations et de tenue mécanique. [26]

L'encrassement et la corrosion restent les phénomènes les moins compris de l'industrie ; ils se traduisent par : [26]

- Un surdimensionnement des appareils dans les bureaux d'études
- Une dépense d'énergie supplémentaire
- Le remplacement des appareils corrodés
- Des coûts d'arrêt des installations pour démontage et nettoyage





Figure 32 : exemple sur l'encrassement[27]

## I.8 Définition de l'encrassement

L'encrassement, qui sous sa forme la plus générale peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecté une grande variété d'opérations industrielles. Dans le cas des échangeurs, la présence d'un fort gradient thermique près de la surface peut perturber les mécanismes d'encrassement isotherme rencontrés, par exemple lors de l'utilisation de membrane ou de filtre.[26]

## I.9 Type d'encrassement

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt ; régime d'écoulement, et selon les conditions d'utilisation des équipements d'échange thermique ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt. Six types différents peuvent alors être définis :[26]

### I.9.1 Encrassement particulaire

Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation sur les surfaces d'échange de particules transportées par l'écoulement des fluides industriels : [26]

- L'eau des chaudières contenant des produits de corrosion, celle des tours de refroidissement, des particules transportées par l'air et des produits de corrosion (oxydes et hydroxydes de fer).
- Les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- Les fumées industrielles de résidus solides de combustion

### I.9.2 Encrassement dû à la corrosion

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement. Les produits de la réaction qui se forment et restent sur la surface d'échange créent l'encrassement.[26]

### **I.9.3 Entartrage**

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc de la composition de l'eau industrielle. Lorsque les sels dissous sont, comme le carbonate de calcium, à solubilité inverse, le liquide devient sursaturé au voisinage de la surface d'échange plus chaude, la cristallisation se produit alors sur la surface et le dépôt est dur et adhérent, dans le cas contraire d'une cristallisation se produisant au sein même d'un liquide plus chaud que la surface, le dépôt est plus mou et friable. L'encrassement par les sels à solubilité normale existe, même s'il est plus rare ; il faut signaler le cas des saumures géothermales à forte teneur en silice.[26]

### **I.9.4 Encrassement biologique**

Il est dû au développement de micro-organismes (bactéries, algues ou champignons) qui créent un film au contact de la surface d'échange, il peut même, à l'échelle macroscopique, être caractérisé par le développement de coquillages. Les actions de prévention consistent soit à détruire les micro-organismes, soit à empêcher leur développement. Les traitements correspondants utilisent des biocides et il est essentiel de maintenir la concentration du produit pendant le temps de réaction. [26]

### **I.9.5 Encrassement par réaction chimique**

On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation ; il en résulte la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques. [26]

### **I.9.6 Encrassement par solidification**

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace à l'intérieur des conduites forcées ou de givre) ou du dépôt d'un constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide (dépôt d'hydrocarbures paraffiniques). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation du givre). [26]

## I.10 Conséquence de l'encrassement

Comme nous l'avons vu déjà les conséquences de l'encrassement sont :

- Une dépense d'énergie supplémentaire.
- Le remplacement des appareils corrodés.
- Les coûts d'arrêt des installations pour démontage et nettoyage.
- Un surdimensionnement des appareils dans les bureaux d'étude[28]

## I.11 Processus encrassement

L'ensemble du processus d'encrassement est généralement considéré comme le résultat net de deux sous-processus simultanés ; un processus de dépôt et un processus de suppression. Une représentation schématique du processus d'encrassement est donnée dans la figure [26]

Tous les sous-processus peuvent être résumés comme suit :

- Formation de matériaux d'encrassement dans la masse du fluide.
- Transport de matières d'encrassement à l'interface dépôt-fluide.
- Réaction Attachement / formation à l'interface dépôt-fluide.
- Suppression du dépôt d'encrassement.
- Transport à partir de l'interface liquide-dépôt à la masse du fluide [29]

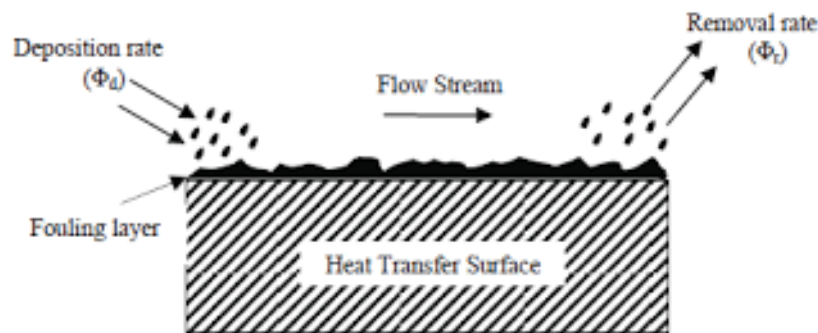


Figure 33 : Formation de dépôt[26]

## I.12 Détection de l'encrassement

En régime permanent, l'encrassement peut être détecté par la simple analyse de la variation de l'efficacité. Comparaison du rendement actuelle de l'échangeur par rapport à la caractéristique du fabricant, aussi que la surface d'échange, la capacité thermique et le coefficient de transfert sale[26]

## I.13 Méthode de nettoyage

Lorsque la qualité de l'échange diminue, il faut procéder au nettoyage de l'appareil qui peut s'effectuer de deux façons, en marche à l'aide de produits chimiques, soit mécaniquement après démontage de certains éléments.[26]

## I.14 Applications des échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans nombreux secteurs d'activité et pour diverses applications, notamment :[30]

- Production d'énergie : Pour transférer la chaleur issue de combustibles fossiles, de l'énergie nucléaire, des sources d'énergie renouvelable, etc., vers les fluides de travail qui alimentent les turbines et génèrent de l'électricité.[30]
- Industrie chimique : Pour refroidir ou chauffer les réacteurs, les distillateurs, les sécheurs, les colonnes de distillation, etc., utilisés dans la production de produits chimiques.[30]
- Industrie alimentaire : Pour pasteuriser, stériliser ou refroidir les aliments, tels que le lait, les jus de fruits, les soupes, etc.[30]
- Industrie pharmaceutique : Pour refroidir ou chauffer les réacteurs, les sécheurs, les colonnes de distillation, etc., utilisés dans la production de médicaments.[30]
- Climatisation : Pour transférer la chaleur de l'air intérieur à l'air extérieur dans les systèmes de climatisation.[30]
- Réfrigération : Pour transférer la chaleur de l'intérieur d'un réfrigérateur ou d'un congélateur vers l'extérieur.[30]
- Production de pétrole et de gaz : Pour chauffer les fluides de production afin de faciliter l'extraction de l'huile et du gaz des réservoirs.[30]
- Traitement des eaux usées : Pour transférer la chaleur de l'eau usée à l'eau propre, ce qui permet de récupérer de l'énergie.[30]

Ces exemples ne représentent qu'une infime partie des applications possibles, car les dispositifs d'échange de chaleur sont utilisés dans de nombreux autres secteurs, tels que l'industrie automobile, la production de papier et la production d'acier[30]

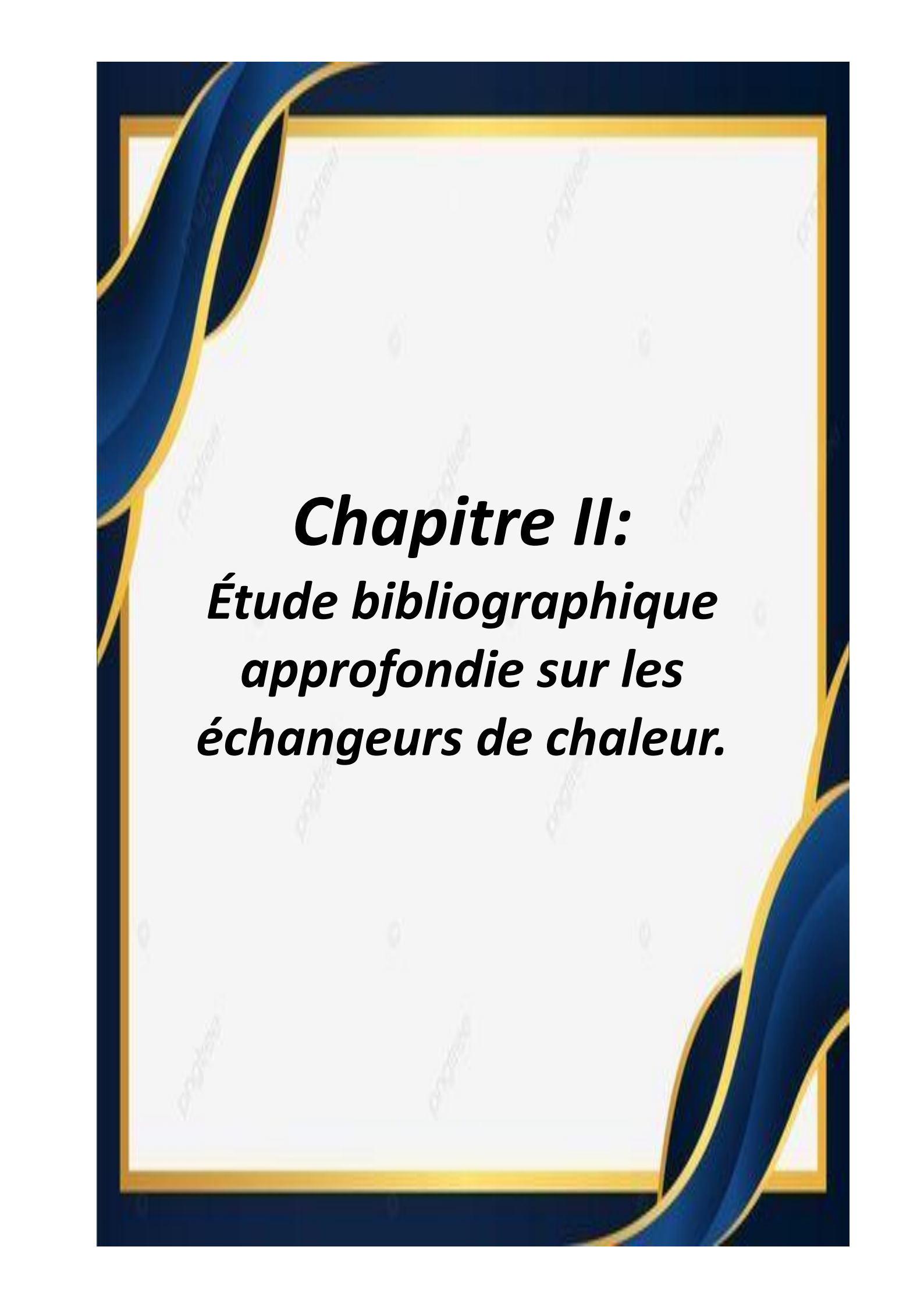
## I.15 Conclusion

Les échangeurs de chaleur jouent un rôle crucial dans la gestion thermique des procédés industriels et domestiques. Grâce aux avancées technologiques, ces dispositifs sont devenus plus performants, compacts et durables, permettant une meilleure récupération et utilisation de

## **Chapitre I: Concepts de Base sur les Échangeurs de Chaleur et le Transfert d'Énergie Thermique**

---

l'énergie. Toutefois, des défis tels que l'encrassement et la corrosion nécessitent une maintenance régulière pour garantir leur efficacité et prolonger leur durée de vie. En optimisant leur conception et en adoptant des matériaux innovants, les ingénieurs continuent d'améliorer ces systèmes, contribuant ainsi à une utilisation plus rationnelle de l'énergie et à la réduction de l'impact environnemental des industries.



***Chapitre II:***  
***Étude bibliographique***  
***approfondie sur les***  
***échangeurs de chaleur.***

## II.1 Introduction

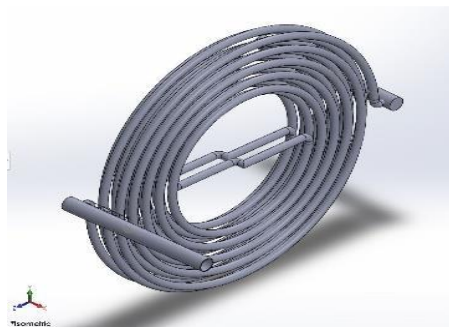
Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs permettant le transfert thermique entre deux fluides sans mélange, utilisés dans divers secteurs industriels. Leur fonctionnement repose sur la conduction la convection et parfois rayonnement, avec plusieurs types adaptés aux besoins spécifiques (plaques, calandre et tubes, tube spiralé, etc.). L'optimisation de leur performance est essentielle pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire le coût. Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration des matériaux, la conception géométrique et l'optimisation des écoulements pour accroître leur efficacité et leur durabilité

## II.2 état de l'art

Selon les recherches faites par **Ajay S Hundiwale et al[1]**, sur L'échangeur de chaleur à tube spiralé pour étudier le transfert de chaleur vers l'eau dans l'enveloppe et les tubes. Afin d'évaluer les performances de échangeur de chaleur a tube spiralé, un modèle mathématique ainsi qu'un modèle de Conception Assisté par Ordinateur (CAO) ont été conçus. La spirale est disposée en réseau décalé, avec deux spirales par ensemble, et deux ensembles reliés à un collecteur, formant ainsi un faisceau de tubes spiralés. Le modèle CAO conçu a été programmé et analysé sur ANSYS Fluent. Le modèle standard k-epsilon a été utilisé pour l'analyse.

L'écart entre les résultats mathématiques et analytiques est d'environ **10%**, et la perte de charge estimée reste dans une plage acceptable. Un écart de **3%** a été observé entre le modèle mathématique et la corrélation formulée.

L'étude a montré que l'échangeur fonctionne mieux avec des fluides purs, mais la disposition en quinconce des tubes, bien que réduisant la taille, complique les connexions.



**Figure 34 : échangeur de chaleur à tube spiralé [1],**

Un modèle analytique a été développé par **CARLOS A. ZURITZ [2]**, pour un échangeur de chaleur à triple tube permettant de calculer les températures des fluides à différentes positions axiales pour des configurations en écoulement parallèle ou à contre-courant.

Une équation simplifiée, basée sur la différence moyenne logarithmique de température, a été établie pour les échangeurs bien isolés et validée par comparaison avec les équations analytiques.

Les résultats montrent une forte concordance entre les modèles et révèlent qu'en intégrant une région annulaire dans le tube interne, on améliore l'efficacité du transfert thermique et on réduit la longueur de l'échangeur d'environ 25 %.

L'étude menée par **REHRAH et al. [3]**, porte sur l'échangeur de chaleur à faisceau et calandre (**E102 A/B**). Son objectif principal est d'améliorer l'efficacité de l'appareil, notamment en réduisant les effets de la corrosion et en limitant le risque de perforation des tubes.

Pour y parvenir, les chercheurs ont envisagé l'injection d'un inhibiteur de corrosion comme solution potentielle. Afin d'évaluer son efficacité, ils ont mené leurs expérimentations sur un échangeur de chaleur expérimental, conçu pour être similaire au modèle réel.

Les calculs effectués dans cette étude ont montré que la surface estimée correspond à celle de l'échangeur et que les pertes de charge calculées restent inférieures aux valeurs admissibles. Ces résultats indiquent que l'appareil fonctionne de manière satisfaisante, avec une efficacité confirmée à 93 %.

Cependant, la présence de 9,6 % de tubes obstrués a entraîné une réduction du transfert de chaleur, provoquant ainsi une diminution de l'efficacité de 6 %. Pour remédier à ce problème, il est proposé d'augmenter le débit du fluide froid, ce qui permettrait une hausse du débit de 1,58 kg/s et une amélioration des performances de l'échangeur

Dans l'étude de **Kirti B.Zare et al. [4]**, le transfert de chaleur de l'eau chaude vers l'eau froide à travers un échangeur de chaleur à double tube concentrique est étudié expérimentalement. L'échangeur de chaleur à double tube horizontal est fabriqué à partir de tubes en fer galvanisé, comprenant un tube interne et un tube externe.

Le tube interne a un diamètre interne de 26 mm et un diamètre externe de 34 mm, tandis que le tube externe possède un diamètre interne de 68 mm et un diamètre externe de 76 mm.

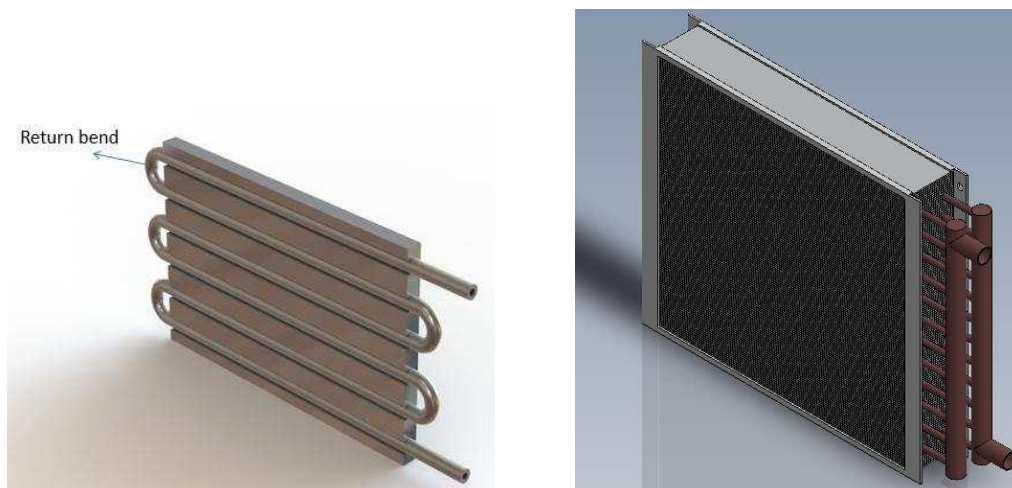
Une série d'expériences a été réalisée pour étudier l'écoulement à contre-courant et l'écoulement parallèle afin de déterminer le coefficient de transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à double tube.

Des investigations expérimentales ont été menées sur les caractéristiques de transfert de chaleur d'un échangeur de chaleur à double tube équipé de tubes concentriques insérés, pour des écoulements en parallèle et à contre-courant.

La revue indique que les échangeurs de chaleur sont des dispositifs de transfert thermique utilisés dans diverses applications. Ils peuvent être employés pour récupérer des ressources, comme l'eau qui est transformée en vapeur et ensuite condensée à l'aide d'un condenseur.

Les échangeurs de chaleur jouent également un rôle essentiel dans le fonctionnement économique des industries et la réduction de la pollution, comme c'est le cas avec les économiseurs et les préchauffeurs d'air.

Une bonne concordance a été obtenue entre les résultats expérimentaux des écoulements à contre-courant et en parallèle, montrant que l'écoulement à contre-courant est plus efficace pour un même débit.



**Figure 35** :un échangeur de chaleur à double tube concentrique [4],

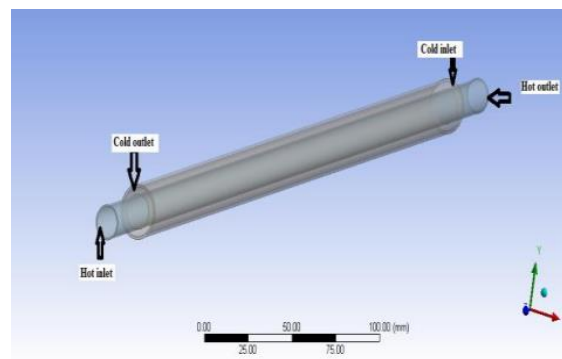
Le travail de Shuvam Mohanty et al, [5], présente une analyse thermodynamique complète et exclusive d'un échangeur de chaleur à contre-courant sous diverses conditions de fonctionnement et géométriques.

Le logiciel **Analysis System Workbench 14.0** est utilisé pour l'analyse numérique, et une comparaison avec les études précédentes est réalisée en fonction de la variation de la température et du débit massique des fluides chaud et froid. Des méthodes analytiques et statistiques de dynamique des fluides numérique (CFD) sont employées pour la simulation et la validation de l'échangeur de chaleur sous des conditions de fonctionnement stationnaires et dynamiques.

Un modèle 3D d'un échangeur de chaleur, ayant une longueur extérieure et intérieure de 1000 mm et 1200 mm et un diamètre de 12,7 mm, est conçu dans l'environnement d'analyse à l'aide de l'approche Renormalization Group  $k-\varepsilon$  afin d'améliorer l'efficacité du système.

Les effets de la température à l'état stable et du débit massique sont étudiés, ainsi que l'influence de la turbulence sur les profils de température et de pression. De plus, les résultats analytiques de cette étude sont comparés à ceux de la littérature existante et montrent une bonne concordance avec les études précédentes.

L'analyse proposée offre une perspective approfondie et une simulation du profil du gradient de température le long de l'échangeur de chaleur. La conception modifiée de l'échangeur, associée à l'inversion du sens d'écoulement, permet d'obtenir de bien meilleurs résultats avec une faible marge d'erreur numérique, variant de 0,66 % à 1,004 % en fonction des changements de température, et de 0,83 % à 1,05 % en fonction des variations du débit massique.



**Figure 36** :Un modèle 3D d'un échangeur de chaleur [5]

Le transfert de chaleur entre les fluides de procédé constitue une étape essentielle dans la majorité des procédés chimiques. Pour cette raison, les échangeurs de chaleur sont largement utilisés dans les industries de transformation et apparentées, jouant un rôle crucial tant lors de la conception que durant l'exploitation des installations.

Parmi les différentes configurations existantes, l'échangeur à calandre et tubes demeure le plus couramment utilisé.

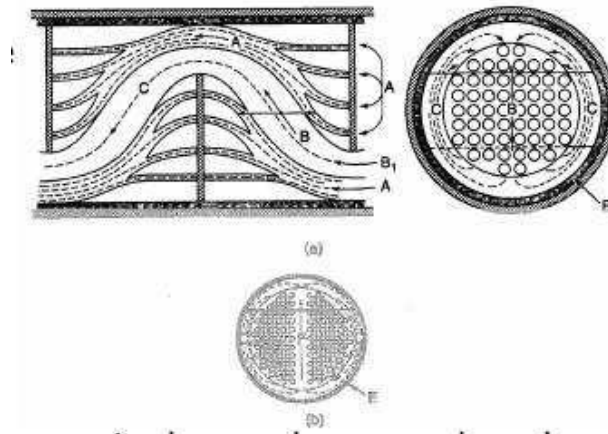
Dans le cadre de l'étude de **Shweta Y Kulkarni et al [6]** une analyse comparative a été menée sur un échangeur de chaleur eau-eau de type calandre et tubes, où l'eau chaude circule à l'intérieur des tubes tandis que l'eau froide s'écoule dans la calandre. L'objectif est d'évaluer les performances thermiques en termes de coefficient de transfert de chaleur et de pertes de charge, en faisant varier les débits massiques et les températures d'entrée et de sortie, à l'aide des méthodes de Kern, Bell et Bell-Delaware.

Les résultats, représentés graphiquement, montrent que le coefficient de transfert de chaleur du côté calandre augmente avec le débit massique dans les trois méthodes. Toutefois, la méthode de Bell-Delaware se distingue en offrant un coefficient nettement supérieur à ceux obtenus par les méthodes de Kern et Bell.

Concernant la **pression**, celle-ci augmente également avec le débit. Cette augmentation est plus marquée dans la méthode de Bell-Delaware, ce qui s'explique par sa prise en compte plus réaliste des phénomènes d'écoulement.

En effet, la présence de chicane dans l'échangeur provoque des obstructions à l'écoulement, ce qui entraîne une augmentation des pertes de charge. La méthode de Kern, en ne considérant pas les effets des chicanes, sous-estime ces pertes, ce qui rend ses résultats moins fiables dans ce contexte.

En revanche, les méthodes de Bell et Bell-Delaware intègrent les fuites et les écoulements de dérivation provoqués par les chicanes, ce qui leur permet de fournir des estimations plus réalistes des pertes de charge



**Figure 37** : Coupe transversale d'un échangeur de chaleur à calandre et tubes [6]

**Digvendra singh et Narayan Das Pal [7]**, ; travaillent sur la conception et l'évaluation des performances d'un échangeur de chaleur à calandre et tubes en utilisant Ansys (Computational Fluid Dynamics - CFD). Les échangeurs de chaleur ont une large gamme d'applications industrielles, et cette étude se concentre sur l'un d'entre eux, conçu en fonction des besoins commerciaux de l'industrie.

Le nouvel échangeur de chaleur conçu possède 21 tubes, un diamètre de calandre de 170 mm et une longueur de 610 mm. Ce design initial ne spécifie pas le type de collecteur à utiliser ; ainsi, trois types de collecteurs ont été analysés afin de garantir une distribution uniforme de la vitesse d'entrée dans chaque tube.

Pour améliorer l'efficacité de l'échangeur, le fluide côté calandre a été modifié : l'eau a été remplacée par du méthanol, qui offre un refroidissement plus efficace que l'eau. L'utilisation de la simulation CFD a permis d'optimiser l'emplacement de la buse d'entrée, assurant ainsi une distribution homogène du méthanol liquide et une répartition uniforme de la vitesse dans chaque tube.

L'objectif principal de ce projet est de vérifier la conception de l'échangeur de chaleur en utilisant la technique de Kern, grâce à un logiciel commercial de CFD. Pour la simulation, une vue symétrique de la géométrie simplifiée de l'échangeur de chaleur a été modélisée avec Solidworks. L'analyse CFD a permis d'étudier les profils de température et de vitesse à travers les tubes et la calandre, révélant que le transfert de chaleur le long des tubes n'est pas uniforme. L'analyse de l'échangeur de chaleur a été réalisée dans des conditions d'écoulement à contre-

courant. Les résultats de la simulation sont présentés dans un tableau pour sept conditions différentes.

Le nouvel échangeur de chaleur conçu possède 21 tubes, un diamètre de calandre de 170 mm et une longueur de 610 mm. Ce design initial ne spécifie pas le type de collecteur à utiliser.

Après modification de l'échangeur, son efficacité a été améliorée en remplaçant l'eau par du méthanol du côté calandre. Le méthanol assure un refroidissement plus efficace **que l'eau, ce** qui permet d'augmenter l'efficacité de l'échangeur de chaleur jusqu'à 95,5 %.

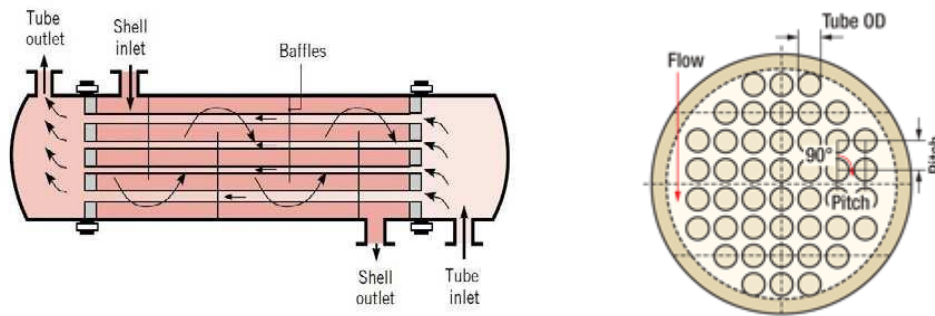


Figure 38 : échangeur de chaleur à calandre et tubes [7]

L'article de Nilescha U. Patil et al [8], propose une revue de différentes analyses thermiques des tubes d'échangeurs de chaleur en utilisant divers paramètres.

Un modèle d'échangeur de chaleur à calandre et tubes a été étudié, où les deux fluides en interaction sont l'eau et la vapeur. Dans la revue de certains articles, l'analyse thermique des échangeurs de chaleur a été abordée.

L'analyse a été réalisée sous ANSYS en appliquant plusieurs charges thermiques sur différentes faces et arêtes. Certains auteurs ont effectué des calculs théoriques à l'aide de codes en langage C, permettant d'évaluer l'analyse thermique d'un échangeur de chaleur à contre-courant de type eau-huile.

D'autres chercheurs ont étudié les capacités de transfert de chaleur de divers matériaux thermiques, en comparant leurs performances en attribuant différentes propriétés aux matériaux.

D'après la modélisation théorique, les coefficients de transfert de chaleur par convection, ainsi que la température moyenne du fluide, sont imposés comme conditions aux limites afin de prédire la répartition de la température dans l'analyse du transfert thermique, aussi bien dans la calandre que dans les tubes.

L'étude a montré que :

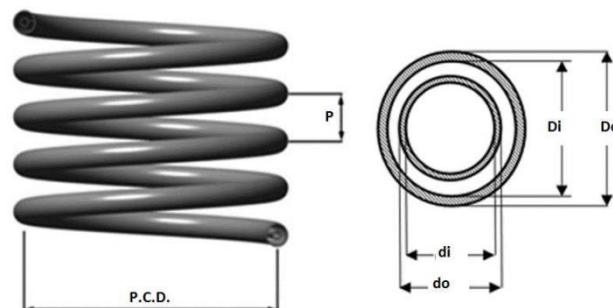
- La variation du LMTD diminue avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau, tandis que la surface d'échange thermique augmente.
- Le coefficient global de transfert de chaleur diminue avec l'augmentation du facteur d'encrassement de l'huile.
- Le contrainant mécanique est plus faible lorsque le laiton est utilisé, tout en offrant un meilleur taux de transfert de chaleur.
- L'acier 1008 et le cuivre sont les matériaux les plus adaptés pour la conception d'un échangeur de chaleur.
- L'utilisation de chicanes augmente le taux de transfert thermique tout en réduisant les déplacements du fluide

**santosh Sancheti et Dipak Sancheti [9]**, ont présenté une étude qui utilise des méthodes expérimentales pour examiner les caractéristiques de transfert de chaleur des échangeurs de chaleur à double tube en spirale, avec de l'eau comme fluide de travail. L'étude couvre une plage de nombres de Reynolds allant de 1000 à 6000, en analysant deux serpentins de tailles différentes afin d'améliorer le taux de transfert thermique interne. Différents débits et températures d'entrée ont été étudiés afin d'évaluer l'impact des paramètres d'écoulement sur le coefficient global de transfert de chaleur de l'échangeur.

L'objectif principal est d'évaluer expérimentalement la performance de l'échangeur de chaleur à double tube en spirale en régime d'écoulement à contre-courant, en prenant en compte le taux de transfert thermique global, le coefficient de convection thermique, le débit massique et le nombre de Reynolds.

Les résultats expérimentaux ont été comparés aux données disponibles issues d'études antérieures, et les conclusions suivantes ont été obtenues :

- Le coefficient de convection thermique augmente avec l'augmentation du débit massique dans l'espace annulaire ; les conditions d'écoulement dans l'annulus ont un effet significatif sur le coefficient de transfert de chaleur global.
- Le coefficient global de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds, indiquant une transition vers des régimes d'écoulement turbulents.
- Une augmentation du nombre de Reynolds entraîne une augmentation du nombre de Nusselt.
- Le facteur de frottement diminue plus rapidement dans la région d'écoulement laminaire et diminue plus lentement à mesure que l'écoulement approche le régime turbulent dans le tube intérieur.
- Le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Dean. Il est également observé que les nombres de Nusselt dans l'annulus présentent une relation linéaire forte avec les nombres de Dean pour la plage de débits étudiée dans cette recherche.



**Figure 39** : échangeurs de chaleur à double tube en spirale [9]

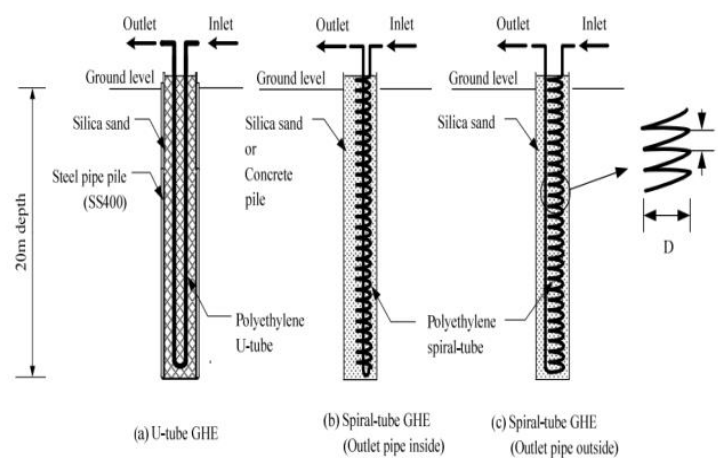
Cette étude menée par **Jalaluddin1 et Akio Miyara [10]** examine les performances thermiques et les caractéristiques d'un échangeur de chaleur géothermique (GHE) à tube spiralé, utilisé dans une pompe à chaleur géothermique, en régime d'écoulement laminaire et turbulent. Les performances thermiques sont évaluées à l'aide d'une méthode numérique basée sur un **code CFD** (dynamique des fluides numérique).

Divers modèles de GHE à tube spiralé, installés dans un forage **et** remblayés avec du sable **siliceux**, ont été simulés. Comparé à l'échangeur de chaleur conventionnel à tubes en U, le modèle à tube spiralé présente une amélioration des performances de 62,7 % en écoulement laminaire **et de** 33,5 % en écoulement turbulent.

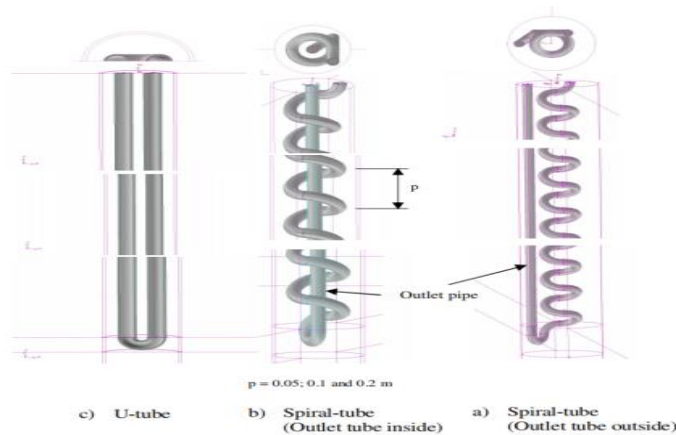
En raison de l'intérêt croissant pour l'application de GHE dans les fondations en béton, un GHE à tube spiralé installé dans un pieu en béton a également été simulé. Ses performances montrent une légère amélioration de 5 % en régime laminaire **et de 6 %** en régime turbulent par rapport à un forage remblayé avec du sable siliceux.

Par ailleurs, l'étude analyse l'effet de la position du tuyau de sortie (installé à l'intérieur ou à l'extérieur du tube spiralé) dans le forage, ainsi que l'effet de différents **pas de spires** :  $p=0,05$  m, 0,1 m et 0,2 m. Les résultats montrent que la position du tuyau de sortie influence les performances : **le** tube spiralé avec tuyau de sortie à l'extérieur offre **de** meilleures performances, soit +2 % en régime laminaire et +10 % en régime turbulent, comparé à une sortie placée à l'intérieur.

Enfin, les distributions de température de l'eau dans les deux modèles de GHE à tube spiralé sont présentées. Il est également observé que le pas de la spirale a un impact significatif sur les performances : augmenter le pas réduit le nombre de spires, ce qui influence négativement les échanges thermiques



**Figure 40 :**Les schémas de principe des échangeurs de chaleur géothermiques à tube en U et à tube spiralé.[10]



**Figure 41 :**Modèle tridimensionnel des échangeurs de chaleur géothermiques conventionnels à tube en U et à tube spiralé. [10]

**Zhang, D. Ma et al.[11]** Ont étudiés les caractéristiques de transfert de chaleur d'un échangeur de chaleur à déflecteur hélicoïdal combiné à un tube à ailettes en trois dimensions. Les expériences ont été réalisées en contre-courant avec de l'huile chaude du côté de la calandre et de l'eau froide dans le tube. Les coefficients de transfert de chaleur globaux ont été calculés et les coefficients de transfert thermique du côté de la calandre et du tube ont été déterminés en utilisant Complot de Wilson. Un programme commercial de dynamique des fluides de calcul (CFD) appelé Fluent 6.0 a été utilisé pour prédire le débit et la performance du transfert de chaleur dans l'échangeur de chaleur. Les résultats numériques correspondent bien aux mesures. Les différences maximales entre les résultats numériques actuels et les données expérimentales sont respectivement d'environ 6,3% pour le nombre de Nusselt et de 9,8% pour la perte de charge

**Farouk Tahrour[12]**, a porté sur la modélisation et l'optimisation d'un échangeur de chaleur à ailettes indépendantes circulaires. Pour cela, nous avons proposé un échangeur de chaleur de tubes à ailettes annulaire excentriques. Leur attention a été concentrée sur l'effet de la position du tube dans l'ailette circulaire sur les caractéristiques thermiques et dynamiques d'un échangeur à un seul tube ailette et d'un faisceau de quatre rangées de tubes arrangés en quinconce ou en ligne. Des calculs numériques ont été effectués en utilisant le code Fluent 6.2 pour déterminer la meilleure excentricité des tubes ailettes. Afin de vérifier la fiabilité, l'exactitude et la réalité physique de l'idée proposée, une étude expérimentale a été menée au sien du laboratoire LPEA (université de Batna) pour valider les résultats numériques de points de vue thermique et dynamique. Les résultats des investigations des effets des paramètres

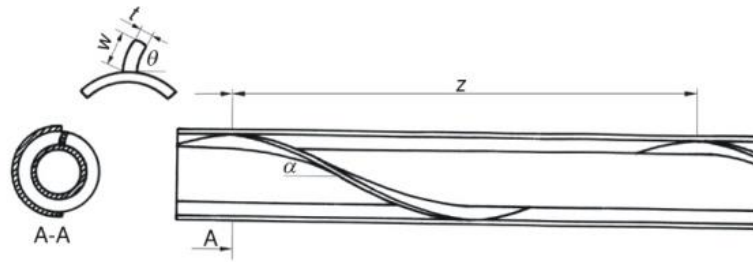
géométriques à savoir, le décalage du tube, le pas d'ailettes, le diamètre des tubes, l'arrangement des tubes, le rang du tube et le nombre de Reynolds sur les performances des échangeurs étudiés sont également illustrés et discutés. Les résultats obtenus montrent que les performances thermique et dynamique des échangeurs à ailettes excentriques, pour les deux arrangements étudiés, sont plus élevées que celles des échangeurs à ailettes concentriques.

**Xue-Pieng Du et al[13]**, ont élaboré un modèle pour explorer le transfert thermique l'or de l'ébullition nucléé dans l'échangeur de chaleur spirale, qui a été employé pour le gaz naturel liquéfié (LNG). Le travail a été fait sur ANSYS CFX, validé par les données expérimentales. Les résultats prouvent que les déviations entre les résultats de simulation et les données expérimentales sont moins de  $\pm 13\%$ . Les corrélations sont dans la bonne exactitude, les déviations entre les résultats de calcul de corrélation et les résultats de simulation sont à moins de  $\pm 25\%$ .

Plusieurs techniques ont été développées par **Ventsislav D. ZIMPAROV et al. [14]** Pour améliorer les performances thermiques des échangeurs de chaleur tube-dans-tube, notamment l'utilisation d'inserts en ruban spiralé incliné, de tubes circulaires placés à l'intérieur de tubes carrés torsadés, ou encore de tubes spiralés installés dans l'annulaire. L'amélioration du transfert de chaleur dans la partie annulaire peut être renforcée par l'augmentation du transfert thermique dans les tubes internes, par le biais d'inserts en ruban torsadé ou de tubes à micro-ailettes.

Par ailleurs, l'effet de la résistance thermique du fluide frigorigène en phase de condensation peut également être pris en compte pour une analyse complète. Afin d'évaluer l'efficacité de ces différentes techniques, des critères d'évaluation de performance étendus ont été utilisés sous différentes contraintes. Parmi ces critères figurent notamment la réduction de la génération d'entropie, l'augmentation relative du taux de transfert thermique, ou encore la diminution de la surface d'échange thermique requise.

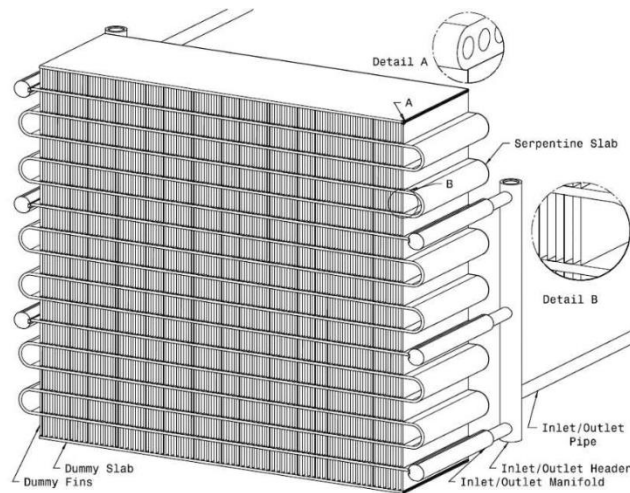
Les résultats issus de ces analyses montrent que, dans la majorité des cas considérés, la technique d'insertion de rubans spiralés inclinés présente les performances thermodynamiques les plus élevées.



**Figure 42 :** Représentation schématique d'un échangeur de chaleur à ruban spirale incliné.[14]

**Ubade Kemerli et Kamil Kahveci [15]**, ont mené une étude numérique sur le transfert de chaleur et l'écoulement de l'air dans un micro canal compact, en utilisant un logiciel de modélisation et de simulation couramment disponible. Afin d'optimiser le temps de calcul, une condition aux limites de périodicité transrionnelle a été appliquée. Les simulations ont été réalisées pour quatre longueurs d'espacement d'ailettes différentes et quatre vitesses d'entrée du fluide. L'évaluation des performances s'est basée sur plusieurs paramètres, notamment le coefficient de transfert thermique, le nombre moyen de Nusselt, le facteur de performance thermique (**j-factor**), la perte de pression, ainsi que les champs de vitesse et de température.

Les résultats ont révélé que la performance thermique maximale, en termes de coefficient de transfert de chaleur, est atteinte pour un espacement d'ailettes de 1 mm. Une augmentation de cette distance entraîne une diminution progressive de l'efficacité thermique. De plus, une croissance significative du nombre moyen de Nusselt est observée avec l'augmentation du nombre de Reynolds, traduisant une amélioration du transfert de chaleur convectif. Toutefois, le facteur **j** présente une décroissance exponentielle avec l'accroissement du nombre de Reynolds, indiquant une baisse relative de la performance thermique par unité de perte de charge. Enfin, les pertes de pression diminuent de manière notable avec l'augmentation de l'espacement des ailettes, ce qui peut contribuer à une réduction des coûts énergétiques liés au pompage.



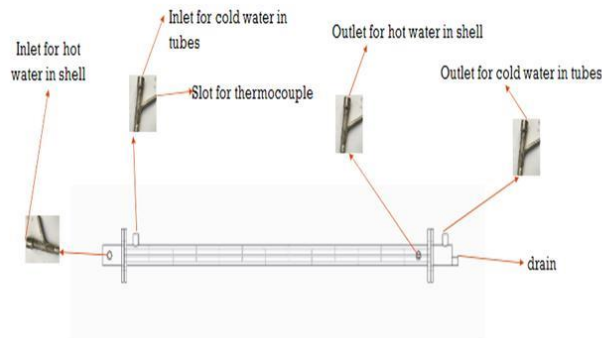
**Figure 43 :**Vue schématique de l'échangeur de chaleur à micro canaux.[15]

Les nanotechnologies, et en particulier l'utilisation des nanoparticules et des nano fluides, suscitent un intérêt croissant en raison de leur capacité à améliorer significativement les performances des systèmes thermiques conventionnels.

Dans l'étude expérimentale de **Yogesh Sharma et Neeraj Yadav**[16],, une analyse paramétrique a été réalisée sur des nanoparticules d'alumine ( $Al_2O_3$ ) de taille comprise entre 20 et 30 nm et d'oxyde de cuivre (CuO) de taille comprise entre 30 et 50 nm, en vue d'optimiser l'efficacité d'un échangeur de chaleur à calandre et tubes.

L'introduction de ces nanoparticules dans le fluide caloporteur permet d'améliorer les caractéristiques de transfert thermique du système. L'étude a porté sur le transfert de chaleur par convection forcée ainsi que sur le comportement de l'écoulement d'un nano fluide circulant dans un échangeur horizontal à calandre et tubes, sous conditions d'écoulement turbulent.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'utilisation de nano fluides permet d'obtenir un transfert de chaleur supérieur à celui du liquide de base, pour un même débit massique et une même différence de température. Les performances thermiques augmentent avec la concentration volumique en nanoparticules, atteignant un maximum à 1,6 %. Au-delà de cette concentration, une diminution du transfert de chaleur est observée, principalement due à l'augmentation de la viscosité du fluide, entraînant une détérioration de l'écoulement.



**Figure 44:** Vue schématique de l'installation expérimentale.[16]

**Prabodh C. Sarode et al, [17]**, ont effectué une revue de littérature récente qui s'est intéressée à l'amélioration des performances des échangeurs de chaleur à calandre et tubes utilisant des nano fluides comme fluides caloporteurs. L'objectif principal est d'optimiser divers paramètres tels que les propriétés thermo physiques, les performances en transfert thermique, ainsi que de réduire potentiellement la surface d'échange nécessaire à l'échangeur.

L'étude a examiné l'utilisation de nano fluides à base de différentes nanoparticules, notamment l'alumine ( $Al_2O_3$ ), l'oxyde de cuivre (CuO) et le graphène, dans le cadre d'analyses portant sur plusieurs configurations géométriques de l'échangeur. Il ressort de cette revue que le nombre de Nusselt ainsi que le coefficient de transfert thermique augmentent avec la concentration volumique en nanoparticules d' $Al_2O_3$ .

En outre, la combinaison de nanoparticules de forme cylindrique avec une inclinaison des chicanes de  $20^\circ$  permet d'obtenir une amélioration notable du coefficient global de transfert de chaleur, du taux de transfert thermique et de la réduction de la génération d'entropie. La revue montre également que l'augmentation de la concentration en graphène induit une hausse significative du coefficient de transfert thermique. Par ailleurs, une élévation de la concentration volumique de CuO de 0,05 % à 0,3 % entraîne une amélioration de la conductivité thermique du nano fluide de l'ordre de 3,07 % à 10,55 %, comparativement à l'eau distillée.

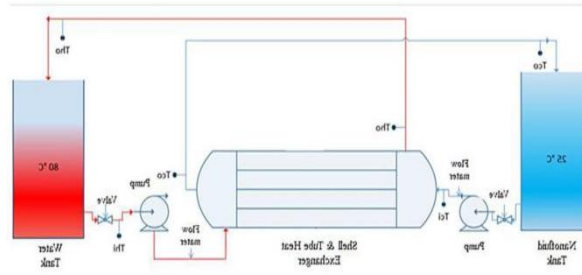


Figure45 : schéma de principe du dispositif expérimental [17]

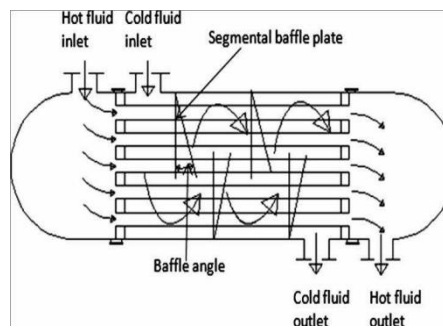
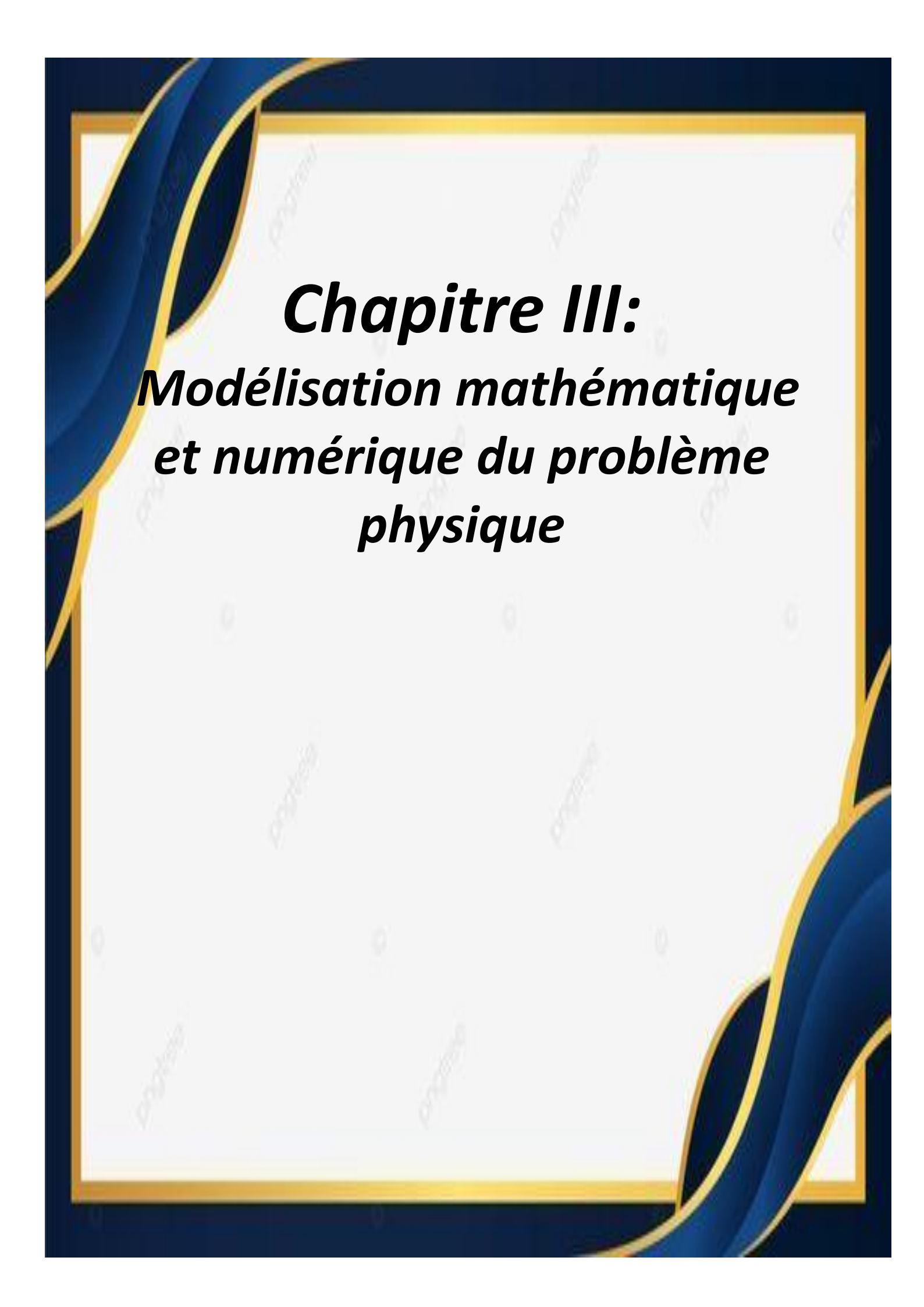


Figure 46 :Échangeur de chaleur à calandre et à tubes avec angle de chicane.[17]

### II.3 Conclusion

En conclusion , les échangeurs thermiques jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels se produisant souvent sans modifier les propriétés des fluides impliqués les échangeurs de chaleur sont conçus pour assurer un transfert de chaleur efficace entre deux milieux tout en limitant les pertes de charge, il est donc pour ce raison que l'on prépare une grande attention à la conception du cote calandre ou des facteurs comme l'organisation des tubes, l'espacement et la morphologie des chicanes pour optimiser les performances thermique et hydrauliques de l'appareil



***Chapitre III:***  
***Modélisation mathématique***  
***et numérique du problème***  
***physique***

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le modèle numérique décrivant le calcul d'un échangeur de chaleur à tube spiralé avec des chicanes, sa formulation mathématique en tenant en compte les hypothèses simplificatrices et les conditions aux limites pour un système tridimensionnel

## III.2 Les grandeurs physiques

### III.2.1 Le débit

Le débit est une grandeur qui mesure **la quantité de fluide qui s'écoule à travers une section donnée par unité de temps**. Il peut être exprimé en **volume par unité de temps** ou en **masse par unité de temps**.

#### Volumétrique (Q<sub>v</sub>)

$$Q_v = \frac{V}{t} = S * v \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

V: le volume de fluide (m<sup>3</sup>)

t: temps (s)

S: surface de la section (m<sup>2</sup>)

v: la vitesse de fluide (m/s)

#### Massique (Q<sub>m</sub>):

$$Q_m = \rho * Q_v \quad (\text{kg/s})$$

$\rho$ : la masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

### III.2.2 La densité(d)

La densité est une grandeur physique qui compare la masse volumique d'un corps à la masse volumique d'un corps de référence

$$d = \frac{\rho_{\text{corp}}}{\rho_{\text{référence}}}$$

$\rho_{\text{corp}}$ : Masse volumique du corps (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{\text{référence}}$ : Masse volumique du corps de référence

### III.2.3 La viscosité

La viscosité est la résistance d'un fluide à l'écoulement. Elle traduit la capacité d'un fluide à s'opposer aux déformations lorsqu'il est soumis à une force

- ✓ **Viscosité dynamique** :  $\vartheta$
- ✓ **Viscosité cinématique** :  $\mu$

### III.2.4 Le nombre de Reynolds (Re)

Le nombre de Reynolds est une dimension sans unité utilisée en mécanique des fluides pour caractériser le régime d'écoulement d'un fluide. Il permet de déterminer si l'écoulement est laminaire (mouvement ordonné des particules de fluide) ou turbulent (mouvement

chaotique des particules de fluide).

$$Re = \frac{v \cdot D_H}{\vartheta} = \frac{\rho \cdot v \cdot D_H}{\mu}$$

Avec

$\vartheta$ : la viscosité cinématique

V: vitesse d'écoulement

$D_H$ : diamètre hydrolique

$\mu$ : la viscosité

$\rho$ : la masse volumique

- ✓ Si le Nombre de Reynolds est faible (typiquement inférieur à 2000 pour un écoulement dans un tuyau), l'écoulement est généralement laminaire. (par exemple Lorsque vous ouvrez à peine le robinet, l'eau s'écoule très lentement. Si vous regardez de près, l'eau semble se déplacer de manière lisse et ordonnée, sans tourbillons. C'est un écoulement laminaire. Dans ce cas, le Nombre de Reynolds est faible.)
- ✓ Si il est élevé (typiquement supérieur à 4000), l'écoulement est généralement turbulent (par exemple: Si vous ouvrez le robinet à fond, l'eau jaillit rapidement. Vous remarquerez alors des tourbillons et un mouvement chaotique de l'eau. C'est un écoulement turbulent. Ici, le Nombre de Reynolds est élevé.)
- ✓ Entre ces deux valeurs, l'écoulement est en transition et peut être instable.

#### III.2.5 Le nombre de Prandtl

Grandeur sans dimension en dynamique des fluides, représente le rapport entre la diffusion de la quantité de mouvement et la diffusion thermique. Il influence directement l'efficacité des échanges thermiques par convection et joue un rôle clé dans l'étude du transfert de chaleur en ingénierie et en environnement .

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha}$$

$\vartheta$ : la viscosité cinématique

$\alpha$ : la diffusivité thermique

#### III.2.6 Nombre de Nusselt

la valeur de nombre de Reynolds déterminée la nature de l'écoulement du fluide

- L'écoulement en régime laminaire ( $Re < 2100$ ):

$$Nu = 3,66 + \frac{0,0688(d_i/L Re Pr)}{1 + 0,04 (d_i/L Re Pr)^{2/3}}$$

L: la longueur de tube

- L'écoulement en régime turbulent ( $Re > 2100$ ) :

$$Nu = 0,027 Re^{0,8} Pr^{0,3}$$

### III.2.7 Diamètre hydraulique

est une grandeur utilisée pour caractériser l'écoulement dans des conduits de section non circulaire

$$D_h = \frac{4 \times A}{P}$$

A : section d'écoulement

P : périmètre mouillé

## III.3 Les grandeurs thermiques

### III.3.1 La chaleur (Q)

Une forme d'énergie thermique transférée entre deux systèmes à des températures différentes

$$Q = m * c_p * \Delta T$$

Q : quantité de chaleur (J)

$c_p$  : capacité thermique massique (J/kg·K)

$\Delta T$  : Variation de température (K)

### III.3.2 Champ de température

Le champ de température représente la répartition spatiale des températures dans un corps ou un fluide

### III.3.3 La chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kilogramme de matière de 1 K (ou 1°C).

### III.3.4 Flux thermique

la quantité de chaleur transférée par unité de temps à travers une surface donnée

$$q = \frac{Q}{\Delta T}$$
$$\dot{q} = \frac{Q}{A * \Delta T}$$

q : flux thermique (W)

$\dot{q}$  : densité de flux thermique (W/m<sup>2</sup>)

Q : quantité de chaleur (J)

$\Delta T$ : temps (s)

A: surface (m<sup>2</sup>)

### III.3.5 Conductivité thermique

La conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau à conduire la chaleur

### III.3.6 Résistance

Résistance thermique mesure la capacité d'un matériau ou d'un système à s'opposer au transfert de chaleur. PLUS ELLE EST GRANDE, plus le matériau isole thermiquement

### III.3.7 Coefficient d'échange convectif

Côté chaud ( $h_c$ )

$$h_c = \frac{Nu \lambda_c}{d_i}$$

$\lambda_c$ : conductivité thermique du fluide chaud W/m.°C

Côté froid :

$$h_f = \frac{Nu \lambda_f}{d_i}$$

$h_f$  : conductivité thermique du fluide froid W/m.°C

## III.4 Type de transfert de chaleur

### III.4.1 Conduction

Transfert de chaleur à travers un matériau sans mouvement de matière, dû aux collisions entre molécules. Exemple : une cuillère métallique chauffée dans une soupe chaude.

*Loi de fourrier :*

$$\varphi = -k * \frac{dt}{dx}$$

Cette loi exprime que le flux de chaleur à travers un matériau est proportionnel au gradient de température ( $dT/dx$ ) et à la conductivité thermique  $k$

### III.4.2 Convection

Transfert de chaleur par mouvement de fluide (liquide ou gaz), qui transporte l'énergie thermique. Exemple : l'air chaud qui monte au-dessus d'un radiateur.

*Loi de Newton :*

$$\varphi = h * s * (T_s - T_\infty)$$

Elle indique que la chaleur transférée par convection dépend du coefficient de transfert thermique  $h$ , de la surface d'échange  $S$  et de la différence de température entre la surface  $T_s$  et le fluide  $T_\infty$ .

### III.4.3 Rayonnement

Transfert de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques, sans besoin de milieu matériel. Exemple : la chaleur du soleil ressentie sur la peau.

*Loi de Stefan-Boltzmann :*

$$q = \sigma * \varepsilon * s * (T^4 - T_\infty^4)$$

Cette loi montre que l'énergie rayonnée dépend de la constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma$ , de l'émissivité  $\varepsilon$ , de la surface ( $S$ ) et des températures absolues (en Kelvin).

### III.5 Etude d'un échangeur de chaleur

Dans la conception d'un échangeur de chaleur l'objectif principal est d'assurer une puissance thermique donnée tout en minimisant la surface d'échange et les pertes de charge cela permet d'optimiser à la fois le coût d'investissement et les dépenses d'exploitation cependant d'autres contraintes telles que l'encombrement, le poids, la corrosion ou encore le respect des normes techniques s'ajoutent rendant le dimensionnement plus complexe. En conséquence, des paramètres à prendre en compte dépassent souvent le simple niveau d'équations thermique, et englobent également des aspects technologiques et économiques.

Dans le cadre de notre étude nous sommes concentrés spécifiquement sur l'aspect thermique de l'échangeur de chaleur, à savoir l'analyse et l'évaluation de ses performances thermiques.

#### III.5.1 Hypothèses spécifiques :

Afin de rendre le modèle plus accessible à la simulation numérique et d'alléger la complexité des calculs, certaines hypothèses ont été adoptées dans cette étude :

- ✓ L'écoulement du fluide est supposé turbulent et stationnaire.
- ✓ Le fluide considéré est newtonien, visqueux **et** incompressible.
- ✓ **Le transfert thermique par rayonnement est négligé.**
- ✓ Les propriétés thermo physiques des fluides (chaleur spécifique  $C_{pf}$ , conductivité thermique  $\lambda_f$ , masse volumique  $\rho_f$ , viscosité dynamique  $\mu_f$ ) et du matériau solide ( $C_{ps}$ ,  $\lambda_s$ ,  $\rho_s$ ,  $\mu_s$ ) sont supposées **constantes**.

### III.5.2 Équations de gouvernantes

L'**équation de continuité** : exprime la conservation de la masse dans un fluide en mouvement. Elle stipule que la masse totale d'un fluide dans un système fermé reste constante au cours du temps.

$$\nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0$$

$\rho$ : Densité du fluide ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  : Vecteur vitesse du fluide ( $\text{m/s}$ )

$\nabla \cdot (\rho \cdot v)$  : Divergence du flux de masse

### L'équation de conservation de quantité de mouvement

L'équation de conservation de quantité de mouvement (également équation de Navier-Stokes) est une équation de fondement en mécanique des fluides. Elle représente l'équilibre entre les forces agissant sur un fluide et la variation de sa quantité de mouvement

$$\rho(v \cdot \nabla v) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f$$

### III.5.3 Méthode de nombre d'unité de transfert( NUT):

La **méthode de l'efficacité – NUT** (*Number of Transfer Units*, NTU) est une approche utilisée en transfert de chaleur pour analyser les échangeurs de chaleur sans nécessiter de connaître la température de sortie des fluides au préalable

#### 1. Principe de la méthode NUT :

L'utilisation de la méthode classique basée sur la différence de température logarithmique (*LMTD*), la méthode NTU repose sur trois paramètres clés :

1. **L'efficacité de l'échangeur ( $\epsilon$ )** : C'est le rapport entre la chaleur réellement transférée et la chaleur maximale possible.

**Tableau 03** : L'efficacité de l'échangeur ( $\epsilon$ )

$C_{\min} = c_p * m$	
$C_{pc}$ (capacité thermique de fluide chaud) = $C_{\min}$	$C_{pf}$ (capacité thermique froid) = $C_{\min}$
$c_{pc} * m_c < c_{pf} * m_f$	$c_{pf} * m_f < c_{pc} * m_c$

$$\epsilon = \frac{\phi_{\text{réel}}}{\phi_{\text{max}}} = \frac{C_{\min} * (T_{ce} - T_{cs})}{C_{\min} * (T_{ce} - T_{fe})} \quad \text{si } C_{\min} = C_{pc}$$

$$\epsilon = \frac{\phi_{\text{réel}}}{\phi_{\text{max}}} = \frac{C_{\min} * (T_{fs} - T_{fe})}{C_{\min} * (T_{ce} - T_{fe})} \quad \text{si } C_{\min} = C_{pf}$$

2. **Le nombre d'unités de transfert (NUT)** : Il mesure la performance de l'échangeur et dépend de la surface d'échange et du coefficient global de transfert de chaleur.

$$NUT = \frac{h * A}{C_{\min}}$$

Avec :

$h$  : coefficient global de transfert de chaleur.

$A$  : surface d'échange

$C_{\min}$  : capacité thermique min

**Autre équation pour calculer le nombre de NUT**

**Tableau 04** : Autre équation pour calculer le nombre de NUT

	Co-courant	Contre-courant
Le nombre de NUT	$NUT = - \frac{\ln[1 - \epsilon(1 + C_R)]}{1 + C_R}$	$NUT = \frac{1}{C_R - 1} \ln\left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon * C_R - 1}\right)$
Efficacité d'échangeur	$\epsilon = \frac{1 - e^{(-NUT * (1 + C_R))}}{1 + C_R}$	$\epsilon = \frac{1 - e^{(-NUT * (1 - C_R))}}{1 - C_R * e^{(-NUT * (1 - C_R))}}$

3. **rapport des capacités thermiques  $C_R$**  : C'est le rapport entre les capacités calorifiques des deux fluides.

$$C_R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

**III.5.4 Méthode de différence logarithmique moyenne ( $\Delta TLM$ ):**

**LE BILAN THERMIQUE :**

En négligeant les pertes thermiques, le bilan thermique global d'un appareil peut être établi en se basant uniquement sur les conditions d'entrée et de sortie des deux fluides. On peut exprimer cela en disant que la quantité de chaleur  $\Phi$  perdue par le fluide chaud est équivalente à celle absorbée par le fluide froid, indépendamment du type d'appareil utilisé.

$$\varphi = m_c c_{p_c} (T_{ce} - T_{cs}) = m_f c_{p_f} (T_{fs} - T_{fe})$$

**Calcule le  $\Delta TLM$ :**

L'évolution de la température de chaque fluide à partir des températures d'entrée  $T_{ce}$ ,  $T_{fe}$  conditionnement directement la valeur moyenne  $\Delta T$ . Elle est fonction :

- De la nature et des débits respectifs des deux fluides
- Du sens d'écoulement relatif des deux fluides qui peuvent circuler soit:

➤ Écoulement co-courant

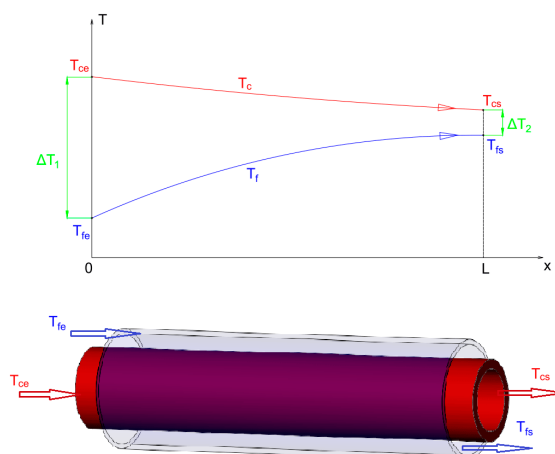
$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \text{AVEC :}$$

$$\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fe}$$

$$\Delta T_2 = T_{cs} - T_{fs}$$

$T_{ce}, T_{fe}$ : températures d'entrée des fluides respectivement chaud et froid.

$T_{cs}, T_{fs}$ : températures de sortie des fluides respectivement chaud et froid.



**Figure 47 :** *Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à co-courant*

➤ Écoulement contre-courant

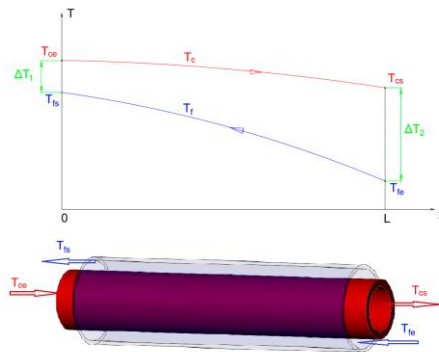
$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

AVEC  $\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fs}$

$\Delta T_2 = T_{cs} - T_{fe}$

$T_{ce}, T_{fe}$ : températures d'entrée des fluides respectivement chaud et froid.

$T_{cs}, T_{fs}$ : températures de sortie des fluides respectivement chaud et froid.



**Figure 48:** Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur à contre-courant

**Le flux de chaleur :**

$$\varphi = k * s * \Delta T_{LM}$$

K : conductivité thermique

S : surface d'échange

*Remarque*

Dans les échangeurs de chaleur complexes (comme ceux à plusieurs passages ou à configurations mixtes), la distribution de la température n'est pas parfaitement uniforme, ce qui fausse le calcul de la LMTD classique. Le facteur correctif **F** permet donc d'ajuster la valeur de la LMTD pour tenir compte des écarts avec le modèle théorique.

$$\varphi = k * s * F * \Delta T_{LM}$$

pour trouver (F) il faut calculer (p) et le( R) avec

$$p = \frac{t_s - t_e}{T_e - t_e} \quad R = \frac{T_e - T_s}{t_s - t_e}$$

T : températures externe

t: températures interne

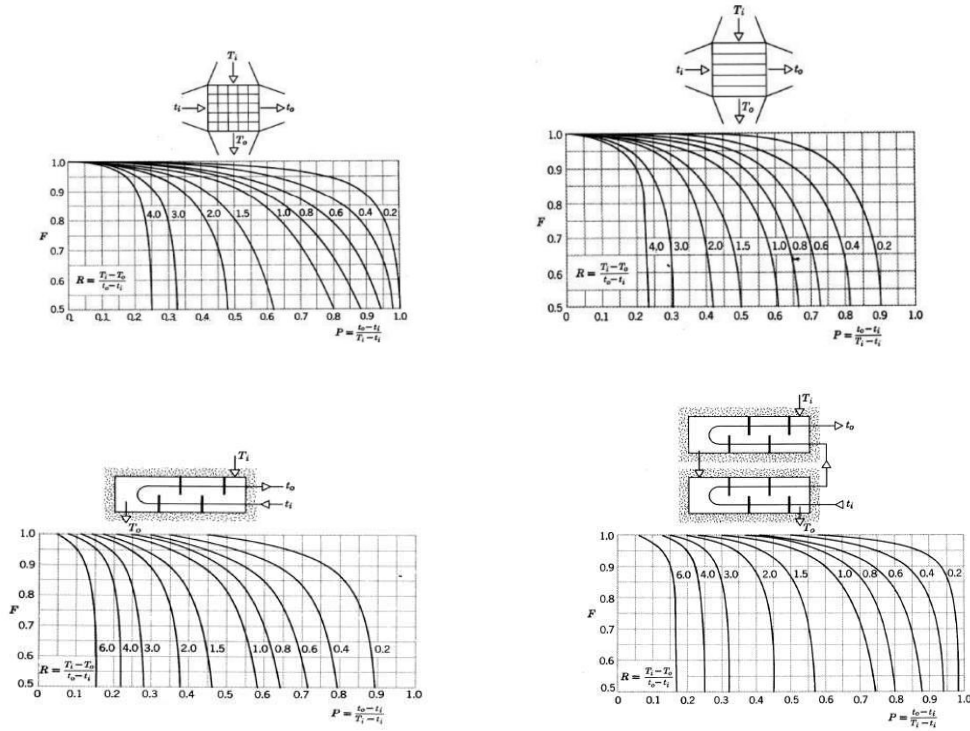


Figure 49 : Le flux de chaleur

### III.5.5 La perte de charge

Est la diminution de pression d'un fluide lorsqu'il s'écoule à travers un conduit, une tuyauterie ou un équipement comme un échangeur de chaleur. Elle est due aux frottements internes du fluide et aux obstacles qu'il rencontre (coudes, vannes, chicanes, rugosité des parois, etc.).

$$\frac{\Delta P}{l} = f * \frac{v^2}{2 * D_H}$$

$\Delta p$ : est la perte de charge

$v$  : vitesse de fluide dans le tube avec :  $v = \frac{m}{\vartheta * s}$

$\vartheta$ : La viscosité dynamique de fluide

$S$  : section prise par le fluide  $s = S_{calandre} - S_{tub}$

### III.6 Méthode des volumes finis:

La méthode des volumes finis est une version spéciale de la méthode des résidus pondérés où la fonction de projection égale à l'unité. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e,w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e,w,s,n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e,w,s,n,t,b). Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E,W) dans le cas monodimensionnel, (E,W,S,N) dans le cas bidimensionnel, et (E,W,S,N,T,B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales. (Méthode des volumes finis)

#### III.6.1 Les étapes de volume finis :

##### 1. Discrétisation du domaine

- Découpage du domaine en **volumes de contrôle** (maillage).
- Chaque volume contient un point central où les grandeurs sont évaluées.

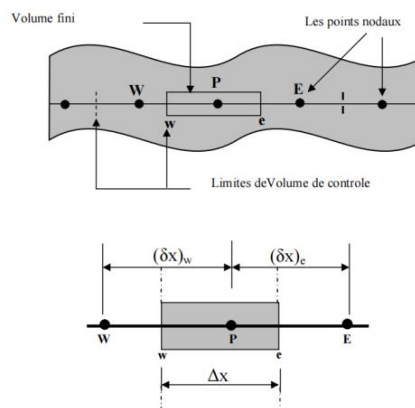


Figure 50 : Discrétisation en volumes finis dans le cas monodimensionnel

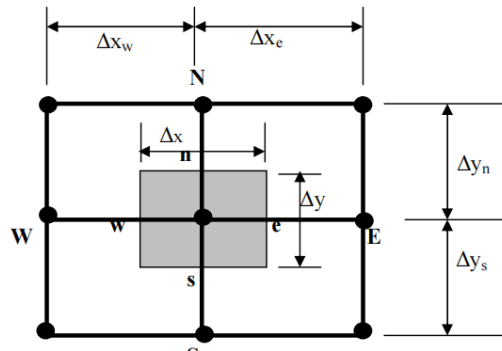


Figure 51 : Description bidimensionnel d'un volume fini

### Intégration des équations sur chaque volume de contrôle

- Application du **théorème de Gauss** pour transformer les dérivées en flux à travers les faces.

### Approximation des flux aux interfaces

- Calcul des flux convectifs et diffusifs entre les volumes adjacents.

### Résolution des équations discrétisées

- Transformation en un **système d'équations algébriques**.
- Utilisation de **méthodes numériques** pour la résolution (Gauss-Seidel, TDMA...).

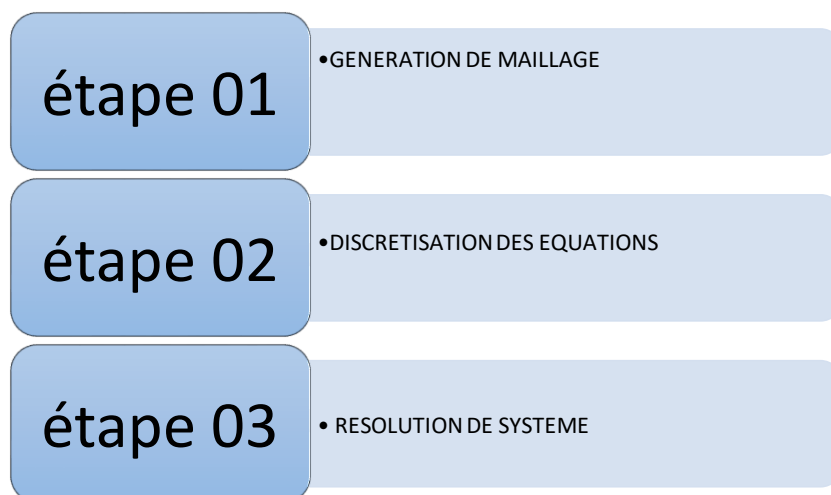


Figure 52 : Les étapes de volume finis

## III.7 Présentation du logiciel ANSYS FLUENT

**Ansys Fluent:** est un logiciel dédié à la simulation numérique de la dynamique des fluides (CFD - Computational Fluid Dynamics). Il permet de modéliser et d'analyser divers phénomènes physiques complexes, tels que l'écoulement des fluides, le transfert de chaleur, les réactions chimiques, etc., et convient à de multiples domaines d'ingénierie.

Il est très apprécié pour optimiser la conception de produits et de systèmes impliquant un écoulement de fluide et est particulièrement précieux dans des domaines tels que les échangeurs de chaleur, l'aérodynamique des véhicules, la combustion ou l'écoulement multiphasique. En fournissant des outils avancés qui simulent fidèlement le comportement des fluides dans des conditions réelles, Fluent contribue à réduire le besoin de prototypes physiques tout en augmentant l'efficacité de la conception.

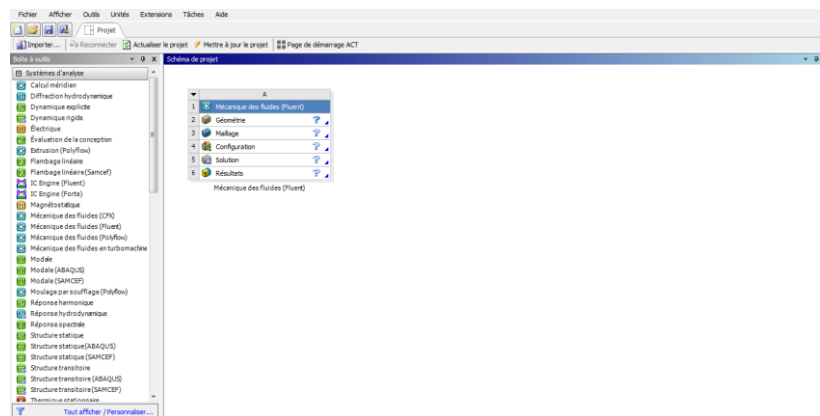


Figure 53 : interface de logiciel Ansys Workbench

### Étapes de simulation avec ANSYS Fluent

#### 1. Pré traitement :

- Importez et créez une géométrie (via ANSYS Design Modeler ou CAD).
- Utilisez ANSYS Meshing pour générer le maillage.

#### 2. Définition des conditions physiques et des modèles :

- Sélectionnez un modèle d'écoulement (turbulence, multiphasique, etc.).(fluide fluent)
- Définition des conditions aux limites (débit, température, etc.).
- Sélection de modèles à transfert thermique.

#### 3. Résolution numérique :

- Sélectionnez la méthode de discrétisation (volume fini).
- Sélectionnez un algorithme de résolution (SIMPLE, PISO, etc.).
- Définition du nombre d'itérations et de la convergence.

#### 4. Post-traitement :

- Visualisation des champs de vitesse, de pression et de température.
- Générez des courbes et des rapports d'analyse.
- Optimisation des performances et validation des résultats.

### III.8 Présentation du problème

Dans notre étude, avant de procéder à la création de la géométrie avec le logiciel ANSYS Design Modeler, nous avons considéré les caractéristiques géométriques de l'échangeur de chaleur à faisceau et calandre (1) comme modèle de référence, ensuite nous avons remplacé l'ensemble des tubes rectilignes par un seul tube spiralé et cela en gardant la même longueur.

Voici Les dimension de l'échangeur de chaleur

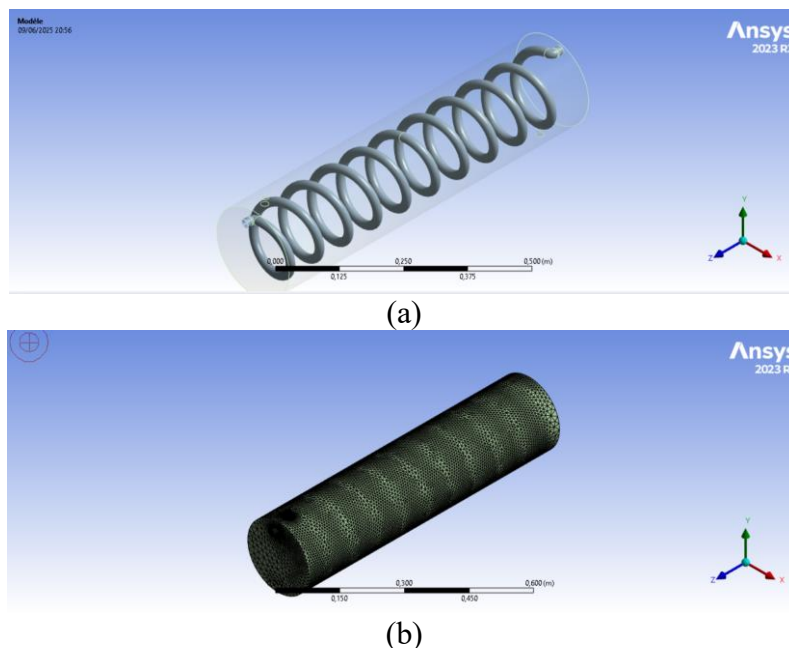
<b>Diamètre de la calandre</b>	<b>0.2 m =200 mm</b>
<b>Langueur de la calandre</b>	<b>0.825m=825 mm</b>
<b>Diamètre intérieur de tube</b>	<b>0.016 m= 16 mm</b>
<b>Diamètre extérieur de tube</b>	<b>0.01924 m= 19.24 mm</b>
<b>Longueur de tube</b>	<b>0.800 m = 800 mm</b>

**Tableau 05** : Les dimension de l'échangeur de chaleur

Ce projet a été dirigé en deux étapes.

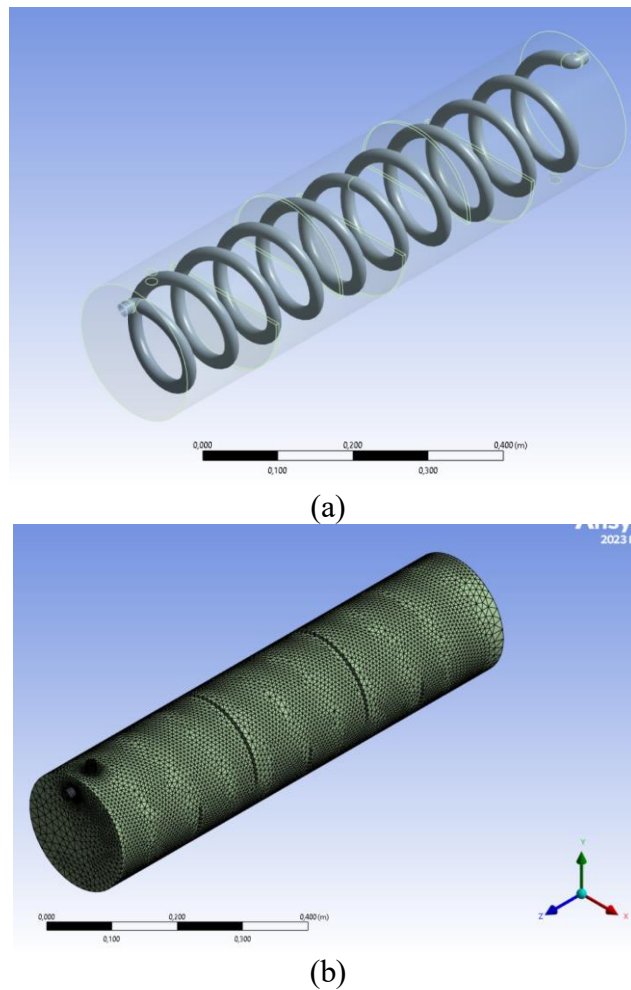
Étape 01 : Dans la première étape, nous étudions la variation de la température sur les deux échangeurs de chaleurs différentes

✧ Le premier cas (échangeur de chaleur a tube spiralé) :



**Figure 54** : schéma descriptif du model du premier cas « simple, sans chicane » : (a) présentation simple , (b) présentation avec maillage

- ✧ Deuxième cas (échangeur de chaleur à tube spiralé avec cinq chicanes) : Dans le deuxième cas, nous considérons la même configuration que la première, mais avec l'ajout de cinq chicanes espacées de manière égale tout en maintenant les mêmes températures et en modifiant les vitesses.



**Figure 55** : schéma descriptif du modèle du deuxième cas « contenant cinq chicanes » : (a) présentation simple , (b) présentation avec maillage

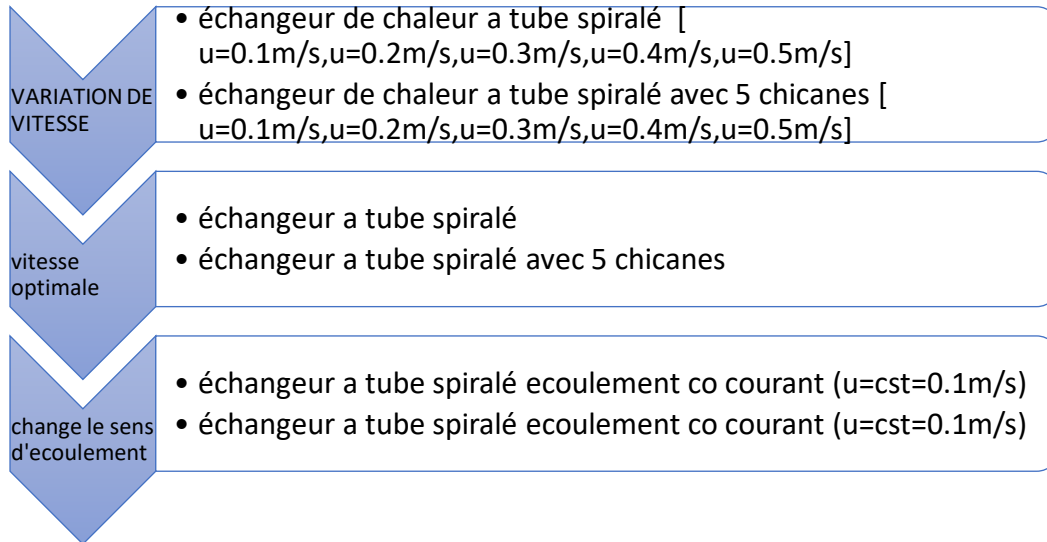
#### Étape 02 :

Déterminer la vitesse appropriée dans toutes les situations précédentes. Ensuite, modifier la direction d'écoulement du fluide pour chaque configuration, à savoir :

- Le cas simple (échangeur de chaleur à tube spiralé),
- Et le cas avec cinq chicanes (échangeur de chaleur à tube spiralé avec 5 chicanes), tout en maintenant constante la vitesse définie à l'étape précédente.

► Premier cas : échangeur de chaleur à tube spiralé simple

► Deuxième cas : échangeur de chaleur à tube spiralé avec 5 chicanes



### III.9 Les conditions aux limites :

la résolution du système d'équations établi précédemment nécessite l'intégration des conditions aux limites propres à chaque variable dépendante. Dans le contexte des échangeurs de chaleur, et plus spécifiquement dans le cadre de notre étude, les hypothèses suivantes ont été adoptée

- ✧ Toutes les limites extérieures restantes sont isolées thermiquement (adiabatique)
- ✧ Les températures d'entrées des deux fluides (eau chaude et eau froide) sont considérées comme constantes
- ✧ La partie solide est en aluminium (le tube)
- ✧ la vitesse du fluide coté chaud et froid est considéré constante et uniforme

### III.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de la modélisation mathématique décrivant écoulement au sein d'un échangeur de chaleur. Il expose également la méthode numérique adoptée pour la résolution des équations gouvernantes





***Chapitre IV:***  
***Analyse des résultats***

## IV .1 Introduction

Dans ce chapitre on a fait une étude numérique d'un écoulement tridimensionnel de fluide (l'eau) cote chaud et cote froid avec de différent vitesses

Cette étude se concentre sur deux types d'échangeurs de chaleur (échangeur de chaleur a tube spiralé)et ( échangeur de chaleur a tube spiralé avec 5 chicanes ) dans le but de les comparer . Les simulations numériques ont été menées par ANSYS FLUENT

Les équations gouvernantes ces systèmes sont résolu par la méthode des volumes finis à l'aide de calcule fluent

Les essais de la simulation numérique menés au cours de ce travail ont été effectués pour traiter les cas suivant :

- ✓ Effet de variation de vitesse (5 vitesse)
- a) Echangeur à tube spiralé (simple )
- b) Echangeur à tube spiralé avec 5 chicanes
- ✓ effet de variation des écoulements de fluide (vitesse optimal)
- a) Ecoulement co-courant
- b) Ecoulement contre-courant
- ✓ Comparaison entre échangeur a tube spiralé et échangeur a tube spiralé équipé 5 chicanes

## IV.2 Discussions des résultats

- ✓ **Variation de température échangeur de chaleur simple**

**Tableau 06:** variation de température de sortie des deux côtés chaud et froid

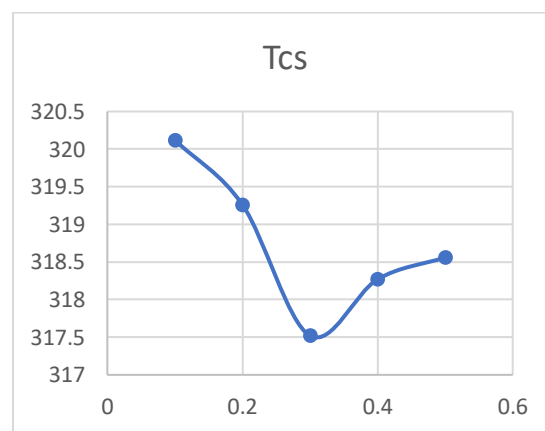
U	Tce	Tcs	The	Ths
0,1	298	320,12	328	303,61
0,2	298	319,26	328	304,61
0,3	298	317.52	328	305.30
0,4	298	318.27	328	305.62
0,5	298	318,56	328	305,97

Dans le premier cas (**Figure 56 (a)** ), on constate que la température du fluide froid varie en fonction de la vitesse d'écoulement. Plus la vitesse d'écoulement du fluide est élevée, plus la température du fluide froid diminue de manière significative. En revanche, une diminution de

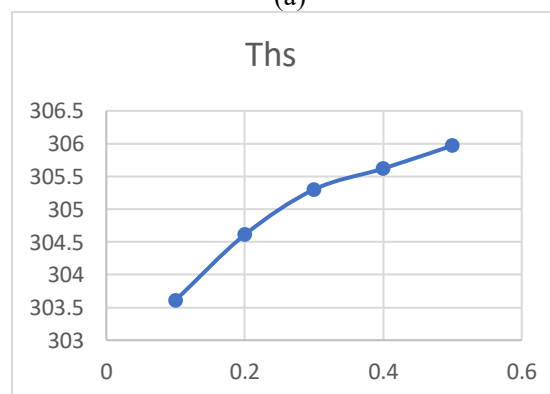
la vitesse d'écoulement entraîne une augmentation de la température du fluide froid. Cette observation révèle une relation inverse entre la vitesse d'écoulement et la température du fluide froid, ce qui suggère que l'échange thermique entre les deux fluides (chaud et froid) est fortement influencé par la vitesse du fluide froid.

Concernant le fluide chaud (**Figure 56** (b)), tel qu'illustré sur le diagramme, sa température présente une variation notable en fonction de la vitesse d'écoulement. En effet, celle-ci peut varier dans une plage étendue, allant de [0.1m/s] à [0.5m/s], selon les conditions expérimentales. Cette variation indique que la capacité du fluide chaud à transférer de la chaleur au fluide froid dépend également de la vitesse à laquelle il s'écoule, modifiant ainsi le taux de transfert thermique entre les deux fluides. La vitesse d'écoulement influence non seulement le gradient de température entre les deux fluides, mais aussi l'efficacité globale de l'échange thermique dans le système étudié.

Ainsi, il est crucial de comprendre la dynamique de ces variations afin d'optimiser les performances du système thermique en jouant sur la vitesse des fluides et en ajustant les paramètres opérationnels pour maximiser l'efficacité du transfert thermique.



(a)



(b)

**Figure 56** : variation de température de fluide en fonction de vitesse d'entrée, a cote chaud, b cote froid

**Deuxième cas échangeur de chaleur à tube spiralé avec 5 chicanes**

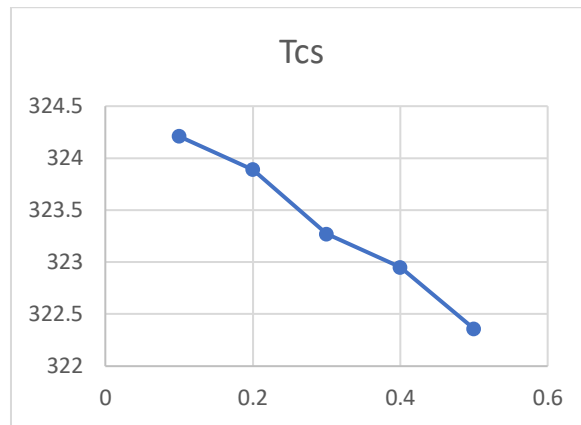
**Tableau 07** : variation de température de sortie des deux côtés chaud et froid

U	Tce	Tcs	The	Ths
0,1	298	324,21	328	298,95
0,2	298	323,89	328	299,81
0,3	298	323,27	328	300,51
0,4	298	322,95	328	301,2
0,5	298	322,36	328	301,4

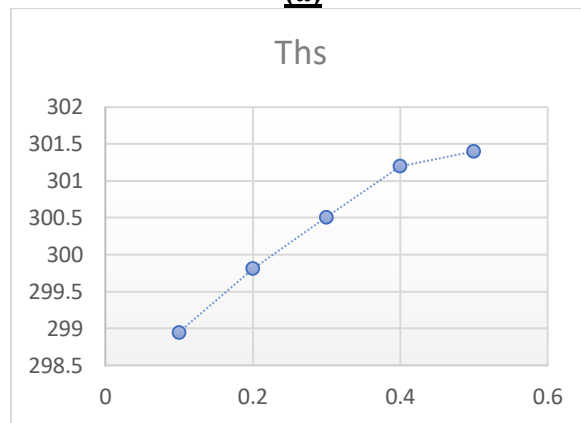
Dans cette nouvelle configuration, où cinq chicanes ont été intégrées, nous avons procédé à des tests similaires à ceux effectués précédemment, en faisant varier la vitesse d'écoulement tout en maintenant une température d'entrée constante pour les deux fluides. Les résultats (**Figure 57** (a)) montrent une corrélation entre la température du fluide froid et la vitesse d'écoulement : lorsque la vitesse du fluide froid diminue, sa température augmente. Par exemple, à une vitesse de 0,1, la température du fluide froid atteint **[324.21 k]**, tandis qu'à une vitesse de 0,5, elle se stabilise à **[322.36 k]**.

Concernant le fluide chaud (**Figure 57** (b)), un phénomène inverse est observé. Lorsque la vitesse d'écoulement du fluide chaud augmente, sa température augmente également. Ce comportement est dû à une moindre efficacité du transfert thermique à haute vitesse, entraînant ainsi une élévation de la température du fluide chaud.

L'ajout des chicanes influence donc considérablement l'échange thermique, notamment en créant des turbulences qui modifient les profils de température des deux fluides. Cela souligne l'importance de gérer les vitesses d'écoulement pour optimiser le transfert thermique, tout en contrôlant les variations thermiques dans le système



(a)



(b)

**Figure 57** : variation de température de fluide en fonction de vitesse d'entrée, (a) cote froid, (b) cote chaud

**Effet d'écoulement**

Lors de cette expérience, nous avons modifié le régime d'écoulement du fluide, passant d'un écoulement en contre-courant à un écoulement en co-courant, tout en maintenant une vitesse constante de 0,1 m/s pour les deux configurations. L'objectif était d'analyser l'impact de cette modification sur les transferts thermiques entre les fluides.

**Echangeur de chaleur à tube spiralé**

**Tableau 08**: variation de température en fonction de l'écoulement

Echangeur	Tc in	Tc out	Th in	Th out	U (m/s)
Co courant	298	313.14	328	312.82	0.1
Contre-courant	298	320,12	328	303,61	0.1

Les résultats montrent (**Tableau 08**) une différence significative en matière de transfert de chaleur entre les deux régimes. Lorsque les fluides s'écoulent en sens opposé (**contre-courant**), le fluide froid voit sa température augmenter de 298 K à 320,12 K. En revanche, dans la configuration en **co-courant**, où les deux fluides circulent dans la même direction, la

température du fluide froid atteint seulement 313,14 K. Cette baisse de performance est également observable du côté du fluide chaud.

Cette différence s'explique par la distribution du gradient de température tout au long de l'échangeur. En **contre-courant**, le différentiel de température entre les deux fluides reste élevé sur la majorité de la longueur de l'échangeur, ce qui optimise le transfert thermique. À l'inverse, dans le cas du **co-courant**, ce gradient diminue rapidement, réduisant ainsi la quantité de chaleur échangée.

### Echangeur de chaleur a tube spirale avec des chicanes

Echangeur	Tc in	Tc out	Th in	Th out	U (m/s)
Co-courant	298	313.02	328	313.02	0.1

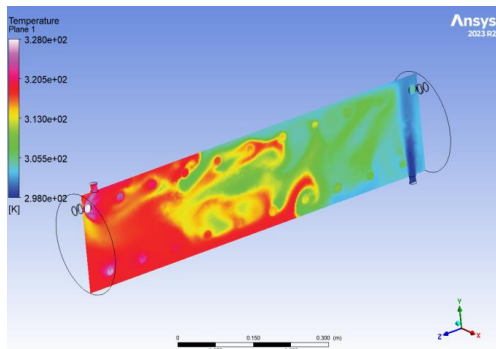
Une nouvelle expérience a été réalisée sur un échangeur de chaleur à tube spirale comportant cinq chicanes (**Tableau 09**). Nous avons modifié le sens d'écoulement du fluide, passant d'un écoulement en contre-courant à un écoulement en co-courant, tout en maintenant une vitesse constante de 0,1 m/s. Cette modification a permis d'observer une différence notable entre les deux configurations. Malgré une vitesse identique, dans l'écoulement en co-courant, la température du fluide froid a évolué de 298 K à 313,02 K, ce qui est relativement bas comparé à l'écoulement en contre-courant, où la température a varié de 298 K à 324,21 K. Ce comportement a également été constaté pour le fluide chaud.

### Comparaison entre les deux échangeurs

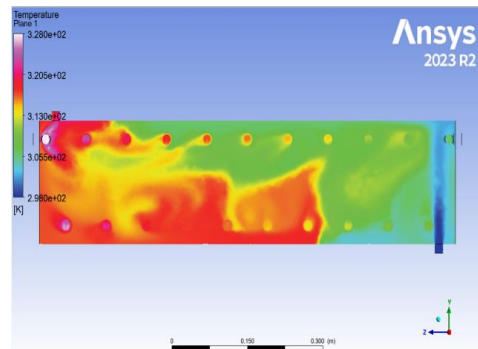
Lors de la comparaison entre l'échangeur à tube spirale simple et celui équipé de cinq chicanes, nous avons observé une différence marquée dans les températures des fluides. Dans le cas de l'échangeur à tube spirale classique, la température des fluides est sensiblement plus basse par rapport à l'échangeur à tube spirale avec chicanes. Cette différence met en évidence l'impact des chicanes sur l'amélioration du transfert thermique. En effet, les chicanes favorisent une meilleure turbulence, ce qui augmente l'efficacité de l'échange de chaleur entre les fluides, d'où des températures plus élevées dans le système à chicanes.

## Contour de température

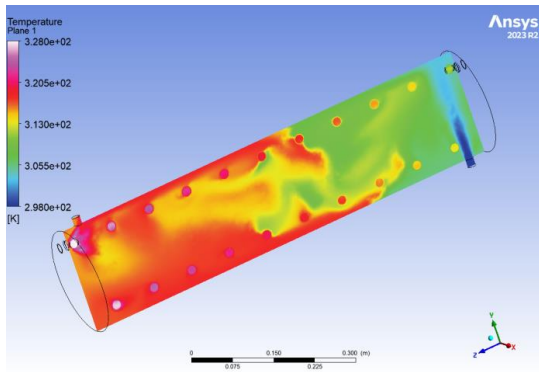
### Echangeur de chaleur a tube spiralé



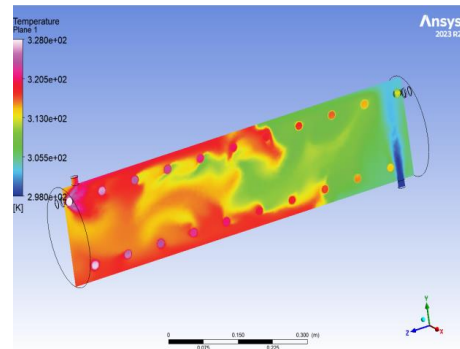
$U=0.1$



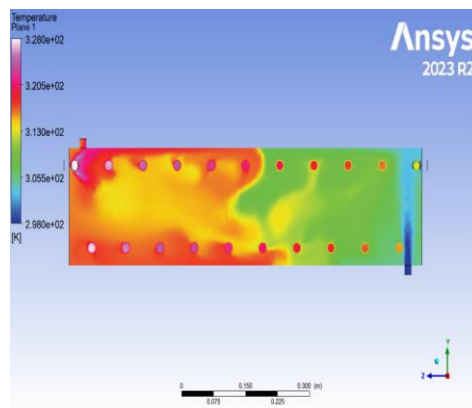
$U=0.2$



$U=0.3$



$U=0.4$



$U=0.5$

Figure 58 : Echangeur de chaleur a tube spiralé

Premièrement, dans ce type d'échangeur (**Figure 58**  $u=0.1$ ), le fluide chaud entre par l'entrée gauche à une température de 328 K (zone rouge), et au fil de son parcours dans la spirale hélicoïdale, il cède progressivement sa chaleur. Cette dissipation thermique entraîne une diminution continue de sa température, atteignant environ 305 K à la sortie (zone verte). L'échelle de couleurs illustrée dans la légende (de 298 K à 328 K) permet de visualiser précisément ce gradient thermique.

En parallèle, le fluide froid pénètre dans le système à 298 K (zone bleue). Grâce à un contact prolongé avec le fluide chaud, sa température augmente graduellement. Dans la zone verte, il atteint 305 K, puis poursuit son élévation thermique au cœur de l'échangeur, atteignant des valeurs comprises entre 313 K et 320 K. À partir de ce point, la température se stabilise autour de 320 K jusqu'à la sortie du fluide, révélant une efficacité thermique notable.

D'abord, dans cet échangeur thermique (**Figure 58**  $u=0.2$ ), le fluide chaud entre par l'orifice situé à gauche à une température initiale d'environ 328 K, comme en témoigne la coloration rouge intense observée sur la cartographie thermique. En progressant à travers le domaine vers la droite, il transfère progressivement son énergie thermique au fluide plus froid, engendrant une diminution graduelle de sa température. Cette évolution est clairement visible à travers une transition chromatique du rouge vers le vert, puis vers le bleu, traduisant une chute de température jusqu'à environ 298 K à la sortie. L'échelle de couleurs, couvrant la plage de 298 K à 328 K, permet une visualisation précise des gradients thermiques et de l'efficacité des échanges thermiques au sein du dispositif.

Simultanément, le fluide froid est injecté dans le système par l'entrée située à droite, à une température initiale d'environ 298 K, illustrée par une zone bleue sur la représentation thermique. En interagissant avec le fluide chaud, il absorbe progressivement de la chaleur, entraînant une augmentation de sa température. Cette évolution thermique se manifeste par une transition du bleu au vert, puis au jaune au centre du domaine, atteignant environ 313 K. Par ailleurs, la présence de structures tourbillonnaires au sein du fluide met en évidence l'intensité des échanges convectifs et le rôle des mécanismes de mélange dans l'amélioration des performances thermiques de l'échangeur.

Tout d'abord, dans la (**Figure 58**  $u=0.3$ ) le fluide chaud est introduit par la gauche avec une température initiale de 328 K (zone rouge vif). En circulant dans le canal spiralé, sa température décroît progressivement : il passe d'abord au jaune ( $\approx 315$  K), puis au vert ( $\approx 305$  K) jusqu'à atteindre environ 300 K à la sortie (zone turquoise). Cette transition thermique met en évidence la diffusion de la chaleur le long du trajet du fluide.

Simultanément, le fluide froid entre à 298 K (zone bleue) et voit sa température augmenter progressivement au fur et à mesure de son contact avec le fluide chaud. Initialement, il atteint 305 K à 310

K (zone verte), avant de se stabiliser autour de 315 K à 320 K jusqu'à la sortie. Ce schéma thermique démontre une transmission de chaleur efficace, favorisée par l'optimisation des surfaces d'échange et la géométrie spiralée.

Dans cette configuration particulière (**Figure 58**  $u=0.4$ ), le fluide chaud entre dans l'échangeur par la gauche à 328 K (zone rouge foncé). Au fil de son déplacement vers la droite, sa température diminue progressivement : la couleur passe de l'orange au vert ( $\approx 305$  K), avec une température de sortie estimée entre 300 K et 305 K.

Le fluide froid introduit à 298 K (zone bleue), absorbe progressivement la chaleur du fluide chaud. Son élévation thermique débute à 305 K, atteint 313 K dans la région centrale et s'élève jusqu'à 318 K à 320 K à la sortie. La distribution de température observée illustre un échange thermique performant, clairement visible grâce à l'échelle de couleurs qui couvre la plage de 298 K à 328 K.

Enfin, dans cette seconde simulation (**Figure 58**  $u=0.5$ ), l'échangeur thermique présente un agencement légèrement modifié ou des conditions d'écoulement distinctes influençant le transfert de chaleur. Le fluide chaud pénètre toujours par l'entrée située à gauche, à une température initiale avoisinant 328 K, comme en témoigne la région rouge foncé de la cartographie thermique. En progressant horizontalement à travers le domaine, il cède progressivement son énergie thermique, entraînant une diminution de sa température. À l'approche de la sortie, celle-ci atteint environ 305 K, une évolution illustrée par la transition du rouge foncé vers le vert.

Parallèlement, le fluide froid entre dans l'échangeur par la droite, à une température d'environ 298 K, représentée par la zone bleue. En absorbant la chaleur du fluide chaud, sa température augmente progressivement, suivant une transition chromatique du bleu au vert, puis au jaune, et enfin au rouge pâle dans la zone médiane, où il atteint des températures supérieures à 313 K. Cette distribution thermique met en évidence l'efficacité du mécanisme de transfert de chaleur ainsi que l'impact des conditions d'écoulement sur la dynamique de l'échange thermique.

### Echangeur de chaleur à tube spiralé avec des chicanes

#### U=0.1

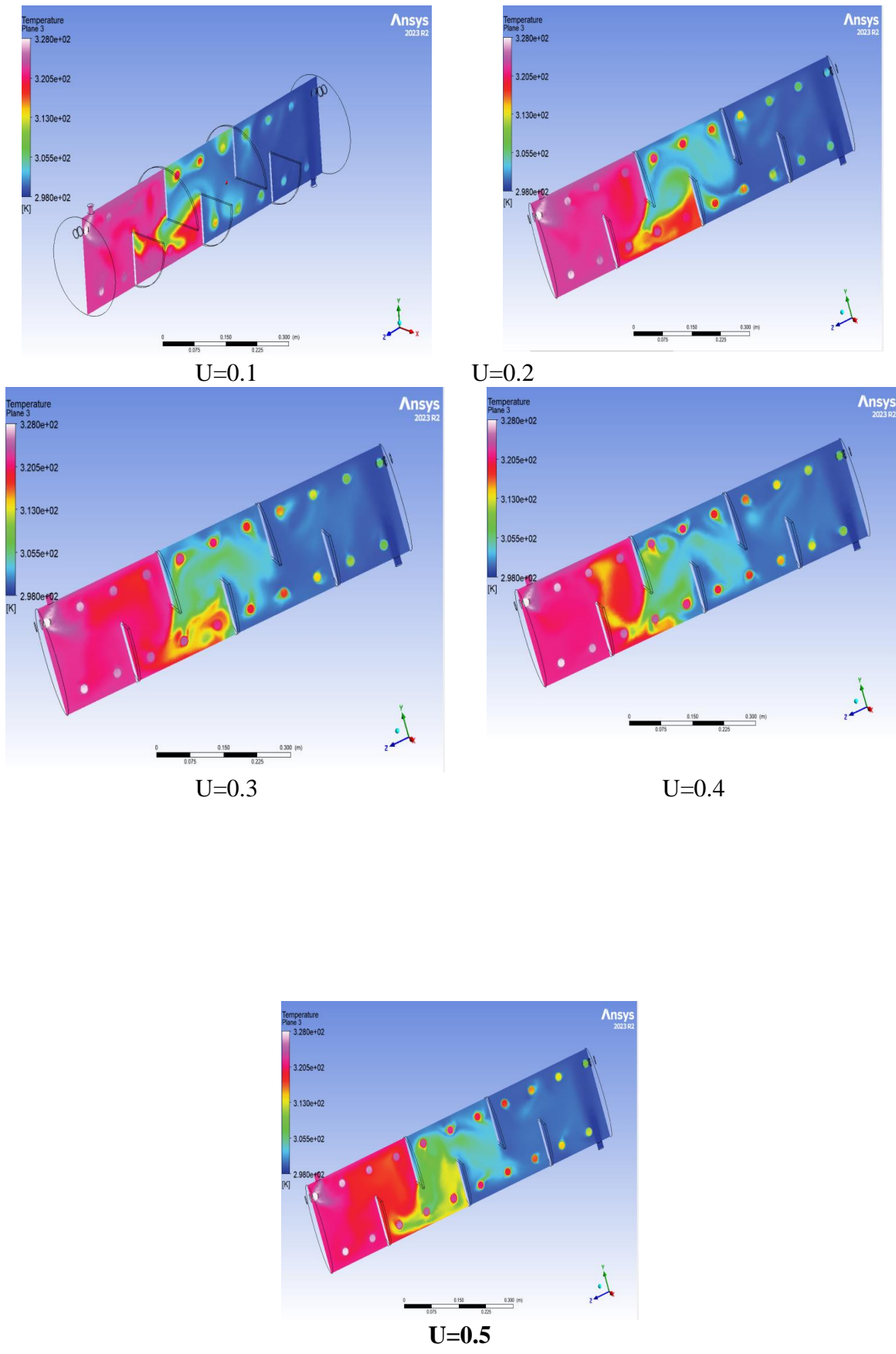


Figure 59 : Echangeur de chaleur à tube spiralé avec des chicanes

Premièrement, dans le système d'échange de chaleur (**Figure 59**  $u=0.1$ ), le fluide chaud entre dans le système à une température initiale de 328 K, caractérisée par une zone rouge intense. En traversant la structure, le fluide perd de l'énergie thermique, ce qui entraîne une diminution progressive de sa température. Ce phénomène est illustré par la transition de couleur du rouge au jaune, puis au vert, et enfin au bleu, où la température du fluide atteint environ 298 K. Le fluide froid entre dans le système à une température initiale de 298 K. La palette de couleurs visible sur le côté gauche des images fournit des gradients thermiques détaillés, avec des parois internes inclinées favorisant un meilleur mélange des flux et un meilleur échange thermique entre les deux fluides.

D'abord, cette (**Figure 59**  $u=0.2$ ) met en évidence le parcours du fluide froid, qui entre cette fois par la droite, à une température initiale d'environ 298 K (zone bleue). Grâce à l'échange de chaleur avec le fluide chaud circulant en sens inverse, la température du fluide froid augmente progressivement. On distingue nettement une montée en température passant par le vert ( $\approx 305$  K), puis par le jaune et le rouge clair, pour atteindre des températures de l'ordre de 320 K à l'approche de la sortie, située à gauche.

Tout d'abord, dans ce type d'échangeur, le fluide chaud entre par la gauche à une température de 328 K (zone rouge), et se refroidit progressivement jusqu'à environ 298 K à la sortie (zone bleue). Le fluide froid entre par la droite à 298 K, et sa température augmente au fil de l'écoulement, atteignant environ 318 K au centre du conduit. La plage de température varie de 298 K à 328 K.

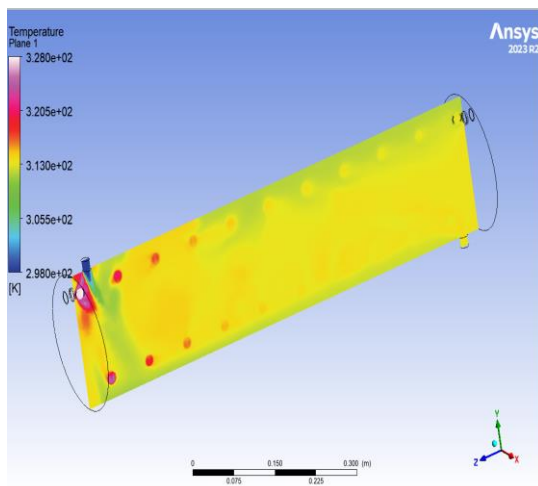
La présence de chicanes provoque des zones de recirculation et de mélange thermique, visibles par les variations de couleur (jaune et vert) entre les chicanes

Dans ce type d'échangeur (**Figure 59**  $u=0.3$ ), le fluide chaud entre par la gauche à une température initiale d'environ 328 K, ce que l'on distingue clairement par la zone rouge située à l'entrée. À mesure qu'il s'écoule à travers le tube spiralé, sa température diminue progressivement sous l'effet du transfert thermique, atteignant environ 298 K à la sortie (zone bleue). L'échelle thermique affichée sur le côté gauche de l'image indique une plage de température allant de 298 K à 328 K, permettant une lecture précise des variations de température.

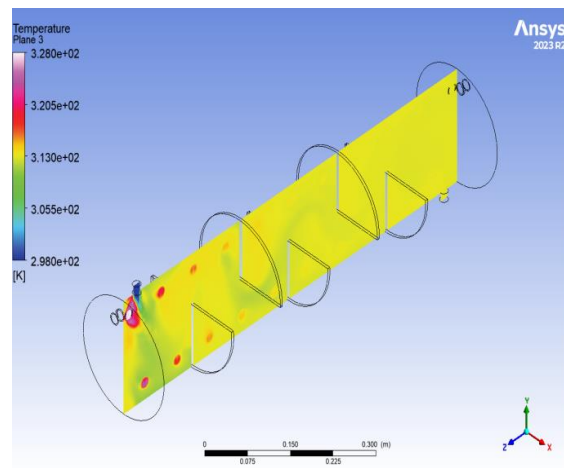
Le fluide froid, quant à lui, entre à droite à une température de 298 K, représentée en bleu foncé. Grâce à la présence des chicanes inclinées, l'écoulement est perturbé de manière répétée, ce qui favorise la création de zones de recirculation et de mélange thermique. On observe que la température du fluide froid s'élève progressivement en suivant le parcours du fluide chaud, atteignant des valeurs comprises entre 305 K et 313 K au centre, puis se stabilise autour de 318 K avant de sortir. Cette distribution thermique indique que le transfert de chaleur est optimisé grâce aux effets dynamiques induits par les chicanes, améliorant ainsi l'efficacité thermique globale de l'échangeur.

Enfin, dans cet échangeur (**Figure 59 0.4**), le fluide chaud est introduit par la gauche, initialement à environ 328 K, avec des zones rouges et jaunes. En refroidissant, il se refroidit progressivement, atteignant environ 298 K à droite, représentées par des nuances de bleu. L'échelle de gauche montre un gradient de température de 298 K à 328 K, permettant une observation visuelle de ce gradient. Des chicanes internes créent des tourbillons et des zones de recirculation, améliorant le transfert de chaleur. Ces perturbations provoquent un réchauffement rapide du fluide froid, atteignant des températures intermédiaires autour de 310 K à 320 K, démontrant ainsi une efficacité thermique accrue.

### Écoulement Co courant



**Echangeur a tube spiralé co courant (c)**



**Echangeur a tube spiralé a 5 chicanes co courant (d)**

**Figure 60 : Écoulement Co courant**

Dans ce premier échangeur thermique (**Figure 60 (c)**), nous observons que le fluide chaud entre dans la zone rose à une température de 328 K. Sa température diminue progressivement

tout au long de l'échangeur, atteignant environ 313 K au niveau de la zone jaune, située à mi-parcours, pour finalement ressortir à une température de l'ordre de 305 K.

Dans ce cas (**Figure 60** (d)), on observe le même type de variation que dans la situation précédente (**Figure 60** (c)), mais avec une différence notable au niveau du fluide froid. En effet, son trajet se modifie à mesure qu'il s'approche des chicanes, ce qui met en évidence l'influence de ces dernières sur l'écoulement du fluide ainsi que sur l'évolution de sa température.

### IV.3 Conclusion

Les résultats obtenus à partir des simulations numériques, réalisées à l'aide du logiciel fluent selon la méthode des volumes finis. La comparaison entre les configurations avec et sans chicanes a permis de dégager des conclusions claires concernant les performances thermiques du système. Ces résultats constituent une base pertinente pour orienter de futures optimisations dans la conception des échangeurs de chaleur spiralés.



***Conclusion  
générale***

## Conclusion générale

---

Dans le cadre de ce mémoire, une étude numérique a été réalisée afin d'évaluer les performances thermiques d'un échangeur de chaleur à tube spiralé équipé de chicanes. L'objectif principal était de comparer les performances de deux types d'échangeurs à tubes spiralés : l'un sans chicanes, et l'autre intégrant cinq chicanes, tout en conservant les mêmes dimensions géométriques et les mêmes conditions aux limites. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel **ANSYS Fluent** ont permis de dégager plusieurs observations importantes concernant l'effet des chicanes sur l'amélioration du transfert thermique.

1. La vitesse d'écoulement joue un rôle crucial dans le transfert de chaleur : une vitesse plus faible entraîne une température plus élevée
2. l'écoulement en contre-courant offre une meilleure efficacité thermique. Il permet une récupération de chaleur plus importante, même avec une vitesse d'écoulement constante, ce qui confirme l'avantage de cette configuration dans les systèmes d'échange thermique.
3. l'ajout de chicanes permet d'optimiser l'échange thermique en perturbant l'écoulement laminaire du fluide, générant ainsi une meilleure agitation et améliorant l'efficacité globale du système d'échangeur thermique.
4. L'échangeur à tubes spiralés équipé de chicanes permet d'améliorer efficacement le transfert de chaleur, grâce à sa géométrie spiralée, à l'ajout des chicanes et au mouvement particulier du fluide. Il représente une solution moderne et performante, bien adaptée aux systèmes où l'économie d'énergie est primordiale.

## Perspectives

### 1. Optimisation géométrique :

Explorer d'autres configurations géométriques (variation du pas hélicoïdal, diamètre des tubes, forme et position des chicanes) afin d'optimiser le rendement thermique et les pertes de charge.

2. **Analyse de nouveaux types de chicanes :**

Étudier l'effet de chicanes de formes différentes (en V, obliques, perforées, etc.) sur le transfert thermique et la turbulence du fluide.

3. **Utilisation de nano fluides :**

Intégrer des fluides caloporteurs à base de nano fluides (eau + nanoparticules métalliques ou non métalliques) pour analyser leur impact sur le coefficient de transfert thermique.

4. **Analyse économique et énergétique :**

Évaluer le rapport coût-performance et les gains énergétiques sur le long terme, notamment pour une intégration industrielle à grande échelle.



# ***Références***

## Chapitre 01

1. Benouadfel billal, Baour amar. Contribution à l'étude thermique et dynamique d'un échangeur de chaleur à plaque. *Memoire de Master*. s.l., de GÈnie MÈcanique : UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2019-2020.
2. ABDOUDOU Yugarithen, TAOUINT Syphax. ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN ECHANGEUR TUBES ET CALANDRE – RTC SONATRACH –BEJAIA. *Memoire de MASTER*. BEJAIA : UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA , 18 de 06 de 2023 .
3. AMARA Asmaâ, ARGOUN Sara. Effets du nombre de spire sur l'amélioration du transfert thermique dans l'échangeur de chaleur à tube hélicoïdal. *Pour l'obtention du diplôme de Master*. Tiaret : Université IBN KHALDOUN, 2023/2024.
4. factoryfuture. *www.factoryfuture.fr*. [En línea] décembre de 2015.
5. A.TRABELSI, Enseignante. Chapitre II : Description des appareils d'échange de chaleur sans changement de Phase.
6. André BONTEMPS, Alain GARRIGUE, Charles GOUBIER, Jacques HUETZ, Christophe MARVILLET, Pierre MERCIER, Roland VIDIL. Échangeurs de chaleur - Description des échangeurs. [En línea] 10 de Mai de 1995.
7. BOUGHEDIR Houssam Eddine, ABDELLAOUI Nouredine. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE D'UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR À TUBES CONCENTRIQUES OPTIONNEL H102A. *mémoire de Master*. Naâma : Centre Universitaire Nâama, 2021.
8. Connaissances de base changeurs de chaleur. *GUNT Gerätebau*.
9. Connaissances de base changeurs de chaleur. *ENERGY & ENVIRONMENT*.
10. ABBASSA Souhila, ABED Nabila. ÉTUDE D'ANALYSE DU TRANSFERT DE CHALEUR DES ECHANGEURS DE CHALEUR A DOUBLE ENVELOPPE ET TUBES CONCENTRIQUES. *MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER ACADEMIQUE*. Mostaganem : Université de Mostaganem UMAB, 2022.
11. Djamel, Dr. Barani. LES ECHANGEURS DE CHALEUR. Eloued : univ-eloued.dz.
12. Khadidja BELGHAZALI, Assia KADARI. Amélioration des Performances Thermo-hydrauliques d'un Echangeur de Chaleur Muni de Chicanes Semicirculaires. *MEMOIRE DE MASTER*. s.l. : Ctr Univ Naama, 2017-2018.
13. Barriquand, societe roannais. Qualité et innovation, les atouts de Barriquand. *usine nouvelle*. [En línea] 01 de avril de 2003. <https://www.usinenouvelle.com/article/qualite-et-innovation-les-atouts-de-barriquand.N1390932>.
14. Échangeur de chaleur Compabloc résistant à haute température et pression pour gaz naturel. *made in china*. [En línea] [https://fr.made-in-china.com/co\\_vrcoolertech/product\\_High-Temperature-Pressure-Resistance-Compabloc-Heat-Exchanger-for-Natural-Gas\\_ysiiuorsig.html](https://fr.made-in-china.com/co_vrcoolertech/product_High-Temperature-Pressure-Resistance-Compabloc-Heat-Exchanger-for-Natural-Gas_ysiiuorsig.html).
15. [En línea] <https://www.alfalaval.fr/link/de589a5f0cdf4a06b82706e45df5c942.aspx> .
16. LOUAFI kamel eddine, ZENATTI oussama. Montage d'un banc pour TP d'échangeur de chaleur/ laboratoire énergétique C.U.A.T. *Memoire de Master* . s.l. : C.U.B.B (Ain Temouchent), 2016/2017.

## Références

---

17. PLATE HEAT EXCHANGER DESIGN METHODOLOGY. *Bachelor's thesis*. s.l., Degree Programme in Chemistry and Technology : CENTRAL OSTROBOTHNIA UNIVERSITY OF APPLIED, February de 2011.
18. André BONTEMPS, Alain GARRIGUE, Charles GOUBIER, Jacques HUETZ, Christophe. Description des échangeurs . *techniquede l'ingénieur [B 2 341]*.
19. Introduction aux échangeurs thermiques industriels et au calcul des échangeurs de chaleur. *cour des echangeurs* . oran, chimie : univ-usto.dz, 2022.
20. Melle. BEKRETI Maissa douaa, M HAMZI Mohamed el sadek. Analyse numérique tridimensionnelle du comportement thermique d'un Échangeur de chaleur à tube spiralé. *memoire de master*. Ain Temouchent : Université - Belhadj Bouchaib, 2023/2024.
21. Melle OUDIA MENDIL Fatima Zohra, Melle BECHIKR Nour El Houda. Etude expérimentale et numérique d'un échangeur à faisceau de tube et calandre. *Pour l'obtention du diplôme de Master*. s.l. : Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib, 2020/2021.
22. echangeur multitubulaire 1 spirax. *azprocede*. [En línea] [https://www.azprocede.fr/Schema\\_GC/picture.php?/248/category/15](https://www.azprocede.fr/Schema_GC/picture.php?/248/category/15).
23. Échangeur à spirale. [En línea] <http://www.recuperation-chaleur.fr/echangeur-spirale>.
24. Boukharoubene, Samy Mokrani Billal. Etude et dimensionnement d'un échangeur a plaques a ce vital Bejaia. *Memoire de Master*. BEJAIA : UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2020-2021.
25. DEZIRI, Nadjem Eddine. SIMULATION D'UNE CONCEPTION D'UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR À FAISCEAU ET CALANDRE. *memoire de master*. ANNABA : UNIVERSITY UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016/2017.
26. Abdulali Souheyla, Boumekhiet Chafiq. Simulation numérique du transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à tubes et calandre muni de chicanes. *Memoire de Master*. NAAMA : CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED , 08 de 07 de 2020 .
27. sidali, Mr. Bensedira. Etude numérique (CFD) d'un échangeur de chaleur coaxial. *Mémoire de Master*. BLIDA, DE MECANIQUE : UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE 1, 2020/2021.
28. M. Bennejah, N. Chaoun. Echangeur de Chaleur, Technologie, calcule et design. Paris –France : Edition TECHIP, 2014.
29. Awad, Mostafa M. Fouling of Heat Transfer Surfaces. Egypt, Mechanical Power Engineering : Mansoura University.
30. CHERIFI Oussama, FELLAH Youcef. Analyse numérique de l'amélioration du transfert de chaleur pour un écoulement d'eau dans un canal ondulé périodique avec la présence des winglets (chicanes en v). *Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER*. Tlemcen : Université Aboubakr Belkaïd, 2022 / 2023.
31. *shutterstock*. [En línea] <https://www.shutterstock.com/fr/image-vector/conduction-heat-transfer-diagram-scientific-resources-2391652165>.

## Chapitre 02

1. design and developement of spiral tube heat exchange . ajay S Hundiwale, samuel Raju. june 2021, IRJET.
2. on the design of triple concentric tube heat exchangers . ZURITZ, CARLOS A. july 1989, departement of agricultural engenneering the pennsylvania state university .
3. REHRHH. ETUDE TERMIQUE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A FAISCEAU ET CALANDRE E102. s.l. : en ligne .
4. desing of double pipe heat exchanger . Mrs kirti B.Zare, Ms Dipika Kanchan,Ms. Nupur Patel. december 2016, IJSTM.
5. analytical and comparative investigations on counter flow heat exchanger using computational fluid dynamics. mohanty, shuvam. s.l. : JOARME.
6. analisis compariong performance of a conventional shell and tube heat exchanger using kern,bell and bell delaware methode . Shweta Y Kulkarni, jagadish S B, Manjunath M B. s.l. : IJRET .
7. designing and performance evaluation of a shell an tube heat exchanger using ansys (computational fluid dynamics) . Digvendra singh, Narayan Das Pal. s.l. : IJSEAS, march 2016.
8. TERMAL ANALYSIS OF HEAT EXCHANGER TUBES: a review. Nilesha U .patil, Neeta B.Phatak, Sayli M .Jadhav, Sunil P.Chaphlkar, Harshal S.Chaudhari. s.l. : JETIR, april 2019.
9. experimental study of double pipe helical coil heat exchangers in the laminar to transitional flow regime . Santosh Sancheti, Depika Sancheti. march 2023, international journal of research in advent technology.
10. thermanal performance and characteristics of spiral tube ground heat exchangers for ground source heat pump. Jalaluddin, AKio Miyara. august 2014, IHTC.
11. experimental and numerical heat transfer in a helically baffled heat exchanger combined with one three-dimentional finned tube . Z.Zhang, D.MA , X.Fang and X.Gao.

Guangzhou 510640,PR CHINA : key laboratory od enhanced heat exchanger transfer and energy conservation ,ministry of esucation , south china university of technology, 2007.

12. modelisation et optimisation des echangeurs de chaleur a ailettes indépendantes. TAHROUR, Mr.Farouk. soutenue publiquement en 2016.

13. researchn on shell side heat mass transfer with multi- component in LNG spiral wound heat exchange under sloshing conditions. Xue-Ping Du, Guang-Lei Yu ,YA-Cheng Xu , Zhi-Jie Chen ,Nai-Liang Li ,Huan -Guang Wang. 2024, KeAi.

14. performance evaluation of tube in tube heat exchanges with heat transfer enhancement in the annulus. ventsislav D.ZIMPAROV, PLAMEN J PENCHEV ? Jushua P. MEYER. 2006.

15. numerical investigation of side heat transfer and fluid flow in a microchannel heat exchanger . Ubade Kamerli, Kamil Kahveci. august 2016, proceedings of the 2nd world congress on mechanical, chemical,and material engineering (MCM'16).

16. enhancement in heat exchange process in a shell and tube heat exchange using nano particles. Yogesh Sharma, Neeraj Yadav. february 2020, IJEAT.

17. review of performance characteristics of shell and tube heat exchanger with different nanofluids. Probodth C.Sarode, Shubhendu S. Pande , Animish M. Sapkal. april 2019, jetir.

## Chapitre 03

1. analisis compariong performance of a conventional shell and tube heat exchanger using kern,bell and bell delaware methode . Shweta Y Kulkarni, jagadish S B, Manjunath M B. s.l : IJRET .