

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installation Energétique et Turbomachine

Par :

**HASSANI ABDERRAHIM**

**MECHMECHE MOHAND TAHAR**

## **Thème**

---

**Etude et simulation d'un échangeur de chaleur coaxial**

**(Co-courant et contre-courant)**

---

Soutenu le Dimanche 25 /09/2022 devant le jury composé de :

Président : Mr M'HAMDI. M. S

Rapporteur : Mr BENSLIMANE

Examineur : Mr MENDIL.F

**Année Universitaire 2021-2022**

# Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre promoteur Mr **BENSLIMANE A.** pour l'intérêt porté à notre travail, leurs disponibilités, leurs conseils précieux et surtout leur grande patience.

Nos respects aux membres de jury, qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.

**Dédicace :**

**J'exprime ma gratitude et mes remerciements les plus sincères et les plus Profonds à Dieu tout puissant qui m'a donné la force et la patience pour pouvoir accomplir ce travail à terme.**

**J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à mes parents les deux chères du monde qui m'ont appris les grandes valeurs et le sens de l'humanité que dieu les protège.**

**A mes chères sœurs et neveu et nièce et frères et ma belle-sœur pour les encouragements, la confiance et le soutien moral.**

**A toute la famille**

**A mon binôme Tahar**

**A mes chères ami Lolo, Lakhdar, Houssam, Hani, Hamza, Mohand, Ghano, Tarik, Zouhir, Nouredine, Saïd, Ziyane tous sans exception.**

**A toutes les personnes qui mon aide de près ou de loin**

Rahim

**Dédicace :**

**Je dédie ce travail**

**A mes chers parents pour leurs soutiens, encouragement et conseils durant tout mon  
parcours universitaire**

**A mes chers frères**

**A ma grand sœur Assia et son époux Fayçal**

**A toutes ma famille, mes cousins et surtout à mon binôme Rahim**

**A mon très cher ami lolo, Lakhdar, Hani, Houssam et Saïd**

**A toutes les personnes qui mon aide de près ou de loin.**

Tahar

# Sommaire

Nomenclature.....	VII
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XII
Introduction général.....	1
1. Chapitre I : Généralités et recherches bibliographiques.....	2
1.1 Introduction :.....	2
1.2 Transfert de chaleur.....	2
a) Définition.....	2
b) Les modes de transfert :.....	2
1.3 Les échangeurs de chaleur.....	4
a) Définition.....	4
b) Fonctionnements :.....	4
c) Différent type d'échangeurs.....	4
d) Mécanisme de transfert de chaleur.....	7
e) Arrangement d'écoulement :.....	7
f) L'encrassement des Echangeurs de chaleur.....	8
g) Domaine d'utilisation des échangeurs de chaleurs.....	12
1.4 Conclusion.....	13
2. Chapitre II : Méthodes de calcul des échangeurs de chaleur.....	14
2.1 Introduction :.....	14
2.2 Grandeurs thermiques :.....	14
a) La température :.....	14
b) Champ de température :.....	14

---

c)	Flux de chaleur :	14
d)	La chaleur :	15
e)	La chaleur spécifique :	15
f)	Conductivité thermique :	15
g)	Résistance de contact :	15
2.3	Grandeurs physiques :	16
a)	La densité ( $\rho$ ) :	16
b)	La viscosité ( $\mu$ ) :	16
c)	Le débit :	16
d)	Le nombre de Reynolds :	16
e)	Nombre de Nusselt :	17
f)	Nombre de Prandtl :	18
g)	L'efficacité :	18
2.4	Position du problème :	18
2.5	Hypothèses :	20
2.6	Equations gouvernantes dimensionnelle laminaire :	20
a)	Equations de Navier-Stocks :	20
b)	Equation de continuité :	20
c)	Équation de conservation de la quantité de mouvement :	20
d)	Conditions initiales et aux limites :	21
2.7	Expression du flux échangé :	22
a)	Contre-courant :	22
b)	Co-courant :	24
c)	Analogie électrique :	25
d)	Calcul des coefficients d'échange thermique convectifs :	25

2.8	Conclusion :.....	26
3.	CHAPITRE III : Résultat et discussions.....	28
3.1	Introduction :.....	28
3.2	Description de la géométrie et de maillage .....	28
3.3	Résultats et discussion :.....	29
a)	Contours des températures à Co-courant et à Contre-courant :.....	33
b)	Contours des vitesses Co-courant et Contre-courant :.....	37
3.4	Conclusion :.....	40
	Conclusion général.....	42
	References bibliographies.....	44

# Nomenclature

<b>Symboles</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité (SI)</b>
$\Phi$	flux thermique	W
S	surface	m <sup>2</sup>
$D_i$	Diamètre intérieur	m
$E_i$	Épaisseur intérieure	m
$D_{int}$	Diamètre extérieur de l'espace annulaire	m
$D_h$	Diamètre hydraulique	m
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
T	Température	K
t	Temps	s
x, y	Coordonnées cartésiennes dimensionnelles	m
h	Coefficient de convection	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
L, l	Les longueurs de l'échangeur	m
u, v	Composantes de vitesse dimensionnelle	m.s <sup>-1</sup>
U, V	Composantes de vitesse adimensionnelle	-
p	Pression	Pa
Cp	Chaleur massique à pression constante	J /Kg .K
$K_e$	Coefficient d'échange globale	w /m <sup>2</sup> .K
g	l'accélération de la pesanteur	m.s <sup>-2</sup>



X,Y	Coordonnées cartésiennes adimensionnelles	-
t'	temps adimensionnelle	-
Pr	nombre de Prandtl	-
Gr	nombre de Grashof	-
Re	nombre de Reynolds	-
Nu	Nusselt	-
E	efficacité	-
C <sub>f</sub>	coefficient de frottement	-

### Symbole grecs

$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$
$\epsilon_p$	l'émissivité de la surface	-
$\lambda$	conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\mu$	viscosité dynamique	$Kg.m^{-1}.s^{-1}$
$\rho$	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
$\theta$	température adimensionnelle	-
$\beta$	le facteur de déséquilibre	-
$\alpha$	diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
$\nu$	viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
$\Delta T$	Différence de température	K

**Indices**

c	chaude	-
f	froid	-
i	intérieur	-
s	sortie	-
e	entré	-

# Liste des figures

<b>Figure 1-1:</b> Composition d'un échangeur à plaques .....	5
<b>Figure 1-2:</b> Principe de l'échangeur tubulaire .....	5
<b>Figure 1-3:</b> Différents types d'échangeurs tubulaires.....	6
<b>Figure1-4:</b> Configuration d'écoulements des échangeurs de chaleur [8] .....	8
<b>Figure1-5:</b> Echangeur sale et propre .....	9
<b>Figure1-6:</b> Importante corrosion.....	10
<b>Figure1-7:</b> Dépôt des limes bactériens, hydrocarbures et oxydes métalliques .....	11
<b>Figure 2-1:</b> régimes d'écoulement .....	17
<b>Figure 2-2:</b> Schéma d'un échangeur de chaleur (contre-courant).....	19
<b>Figure 2-3:</b> Schéma d'un échangeur de chaleur (co-courant).....	19
<b>Figure 2-4:</b> Distribution de température dans un échangeur Contre-courant.....	24
<b>Figure 2-5:</b> Distribution de température dans un échangeur Co-courant .....	25
<b>Figure 3-1:</b> Cas de géométrie Contre-courant.....	28
<b>Figure 3-2:</b> Cas de géométrie Co-courant.....	29
<b>Figure 3-3 :</b> le maillage .....	29
<b>Figure 3-4:</b> Variation de $T_{cs}$ et $T_{fs}$ en fonction de débit du fluide froid d'un échangeur contre-courant. ....	32
<b>Figure 3-5:</b> Variation de $T_{cset}$ $T_{fs}$ en fonction de débit du fluide froid d'un échangeur co-courant. ....	32
<b>Figure 3-6 :</b> Contours de température d'un échangeur de géométrie à Co-courant.....	33
<b>Figure 3-7:</b> Contours de température d'un échangeur de géométrie à Contre-courant. ....	34
<b>Figure 3-8:</b> Contours de température d'un échangeur de géométrie à Co-courant.....	34
<b>Figure 3-9:</b> Contours de température d'un échangeur de géométrie à Contre-courant. ....	35
<b>Figure 3-10:</b> Contours de température d'un échangeur de géométrie à Co-courant.....	35
<b>Figure 3-11:</b> Contours de température d'un échangeur de géométrie à Contre-courant. ....	36
<b>Figure 3-12:</b> Contours de vitesse dans un échangeur co-couran. ....	37
<b>Figure 3-13:</b> Contours de vitesse dans un échangeur contre-courant. ....	37
<b>Figure 3-14:</b> Contours de vitesse dans un échangeur co-courant. ....	38
<b>Figure 3-15:</b> Contours de vitesse dans un échangeur contre-courant. ....	38

**Figure 3-16:** Contours de vitesse dans un échangeur co-courant. .... 39

**Figure 3-17:** Contours de vitesse dans un échangeur contre-courant. .... 39

## Liste des tableaux

<b>Tableau 3.1:</b> Conditions aux limites .....	29
<b>Tableau 3.2:</b> coefficient d'échange annulaire .....	30
<b>Tableau 3.3:</b> Coefficient d'échange thermique globale K.....	30
<b>Tableau 3.4:</b> Température de sortie des deux fluides .....	31
<b>Tableau 3.5:</b> Comparaison avec les valeurs numériques.....	31

# **Introduction général**

# Introduction général

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique, marine), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.)[1].

Pour toute utilisation, le choix de l'échangeur dépend de plusieurs facteurs, tels que la température du fluide, sa pression, ses propriétés physiques, l'espace disponible pour l'installation de l'échangeur et sa maintenance.

Notre travail consiste à utiliser le code de calcul afin de simuler l'échange thermique dans un échangeur coaxial qui représente la forme la plus simple des échangeurs de chaleur, avec différentes type d'écoulement (co-courant, contre-courant).

Le premier chapitre traite des généralités sur le transfert de chaleur (définition, mode de transfert) et les échangeurs de chaleur (définition, fonctionnement, type des échangeurs...etc.).

Le deuxième est consacré à la présentation des grandeurs thermiques et physiques, les méthodes analytiques qui permettant le calcul et le dimensionnement de ces dispositifs, la position de problème et les hypothèses.

Dans le troisième chapitre, tous les résultats numériques des différentes applications simulées, sont présentés et interprétés.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

**Chapitre I :**  
**Généralités et recherches**  
**bibliographiques**



# 1. Chapitre I : Généralités et recherches bibliographiques

## 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à faire une étude général sur les échangeurs de chaleur et nous allons aborder des différents types d'échangeurs ainsi que les échanges thermiques, de certaines généralités, de leurs différents éléments et le domaine d'utilisation des échangeurs de chaleur.

On a cité le problème de la majorité des échangeurs de chaleur et leur différents types (encrassement, type d'encrassement, processus d'encrassement, conséquence encrassement).

## 1.2 Transfert de chaleur

### a) Définition

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus connus d'échange d'énergie, et on définit cette dernière comme de l'énergie thermique en transit à cause d'une différence de température. On peut observer les phénomènes de transfert de chaleur aussi bien dans des situations industrielles (fours, réacteurs, échangeurs de chaleur, colonnes à distiller, chambres froides, presses à injection, coulée des métaux...) que dans notre vie quotidienne (le chauffage et l'isolation de la maison, la cuisson des aliments, les vêtements d'hiver et le facteur de refroidissement éolien, le coup de soleil sur la plage) [2].

### b) Les modes de transfert :

Il y a trois modes de transfert principaux :

- la conduction quand il existe un gradient de température au sein d'un médium.
- la convection quand on étudie les transferts entre une surface et un fluide en mouvement.
- le rayonnement quand deux surfaces à des températures différentes sont en vue

### ❖ Conduction :

En présence d'un gradient de température, la conduction thermique se produit par contact, de proche en proche (d'un atome à un autre ou d'un corps à un autre), et se traduit par une élévation de température jusqu'à l'uniformisation de température dans le système, sans déplacement de matière. Elle a lieu principalement dans les solides mais existe aussi dans les fluides à une moindre échelle. [3]

La loi fondamentale de la conduction (Loi de Fourier) exprime le flux de chaleur transmis dans un milieu de conductivité thermique  $\lambda$  à travers une surface S, elle s'écrit :

$$\varphi = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{I.1})$$

### ❖ Convection :

Est un transfert de chaleur avec mouvement macroscopique de la matière. Ce type de transfert n'intervient que pour les liquides et les gaz (c'est le fluide en mouvement qui transporte de la chaleur). Dans les fluides, la conduction et la convection se conjuguent. La convection contribue à augmenter la vitesse de transfert de la chaleur par rapport à la conduction seule. [3]

On peut exprimer la quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide Elle s'écrit (loi de newton).

$$\varphi = hS(T_s - T_f) \quad (\text{I.2})$$

### ❖ Rayonnement :

C'est le mécanisme qui permet à la chaleur de se transmettre d'un corps à haute température vers un corps à basse température lorsque ces corps sont séparés dans l'espace même s'il existe le vide entre eux .Ce transfert de chaleur repose sur un rayonnement électromagnétique. Il s'effectue par émission ou absorption de photons : transfert à distance, quasi-instantané (vitesse de la lumière) et sans nécessité de support matériel. Le rayonnement thermique est émis partout corps dans tout milieu transparent au rayonnement émis. [3]

Dans ce cas nous avons la Loi de STEFAN-BOLTZMAN :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_{\infty}^4) \quad (\text{I.3})$$

### 1.3 Les échangeurs de chaleur

#### a) Définition

Les échangeurs de chaleur sont des appareils permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Dans la plupart des cas, les deux fluides ne sont pas en contact, et le transfert s'effectue à travers une surface d'échange. Au sein de la paroi séparatrice, le mécanisme de transmission de la chaleur est la conduction, et sur chacune des deux surfaces de contact avec les fluides, ce sont presque toujours les phénomènes de convection qui prédominent [4].

#### b) Fonctionnements :

Le principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur est défini par la circulation de deux fluides (chaud et froid) à travers des conduites qui les mettent en contact thermique à travers une paroi généralement métallique. Ce qui favorise l'échange entre eux, de manière générale, c'est le fluide chaud qui transfère de la chaleur au fluide froid.

La difficulté réside dans la définition d'une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour le transfert d'une quantité de chaleur donnée. Cette dernière ne dépend pas uniquement de la surface, mais aussi des températures d'entrée, des caractéristiques thermiques (chaleur spécifique, conductivité thermique) et des coefficients d'échange par convection. [5], [6].

Ils possèdent le même fonctionnement suivant les processus physiques d'échange :

- Echangeur de chaleur par les parois : la conduction.
- Echange de chaleur entre les parois et les fluides : la convection.
- Echangeur radiatif entre les parois et les fluides souvent négligeable : le rayonnement.

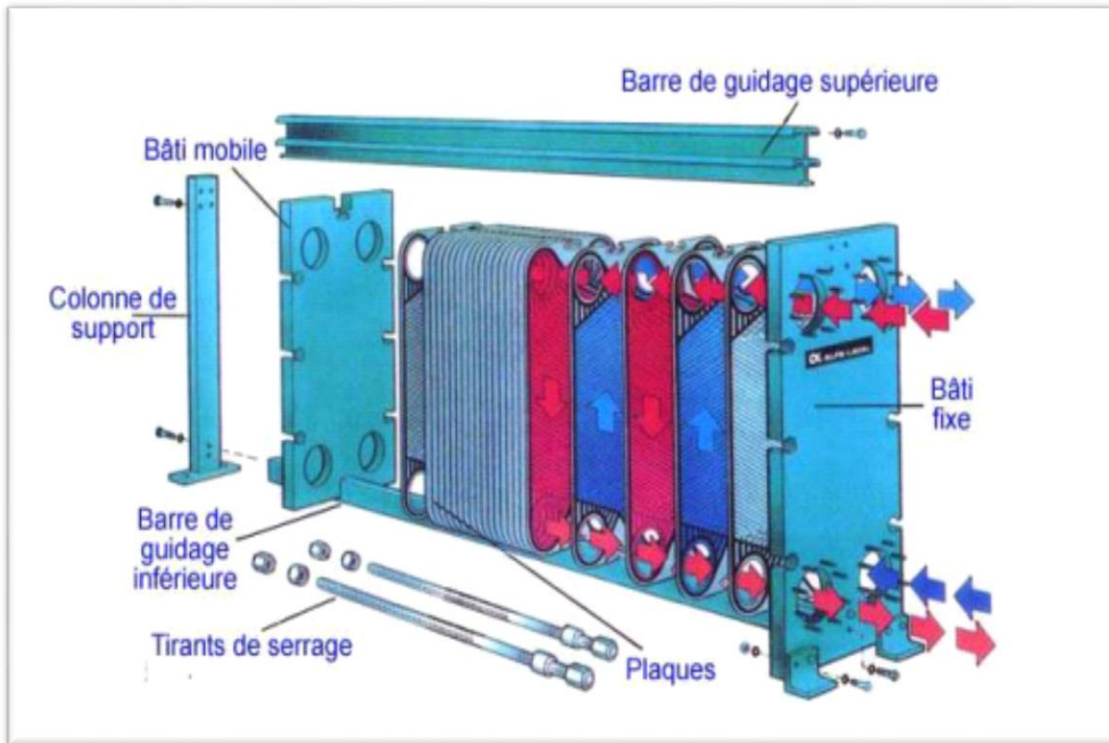
#### c) Différent type d'échangeurs

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

##### ❖ Échangeurs à plaques

Les échangeurs à plaques ont les meilleures performances thermiques par rapport aux autres échangeurs. 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

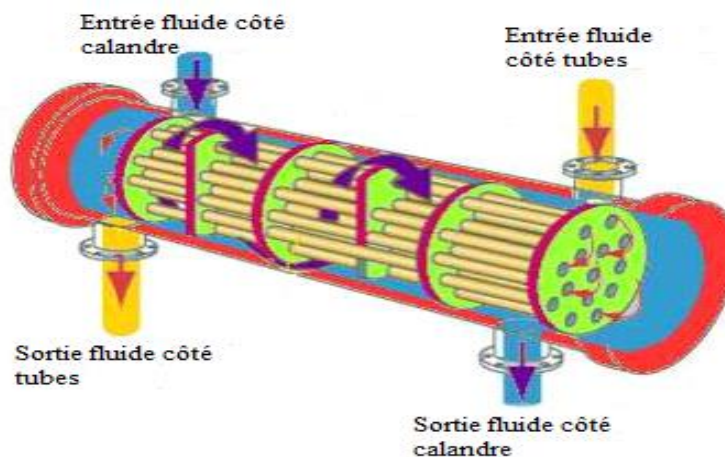
cryogénie, dans l'industrie chimique et pétrochimique, dans l'industrie pharmaceutique, dans l'industrie alimentaire...



**Figure 1-1:** Composition d'un échangeur à plaques

❖ **Echangeurs à tubes: (monotubes, coaxiaux ou multitubulaires).**

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



**Figure 1-2:** Principe de l'échangeur tubulaire

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 :

-**Échangeur monotube** : (figure I.5 a) Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent.

-**Échangeur coaxial** : (figure I.5 b) 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.

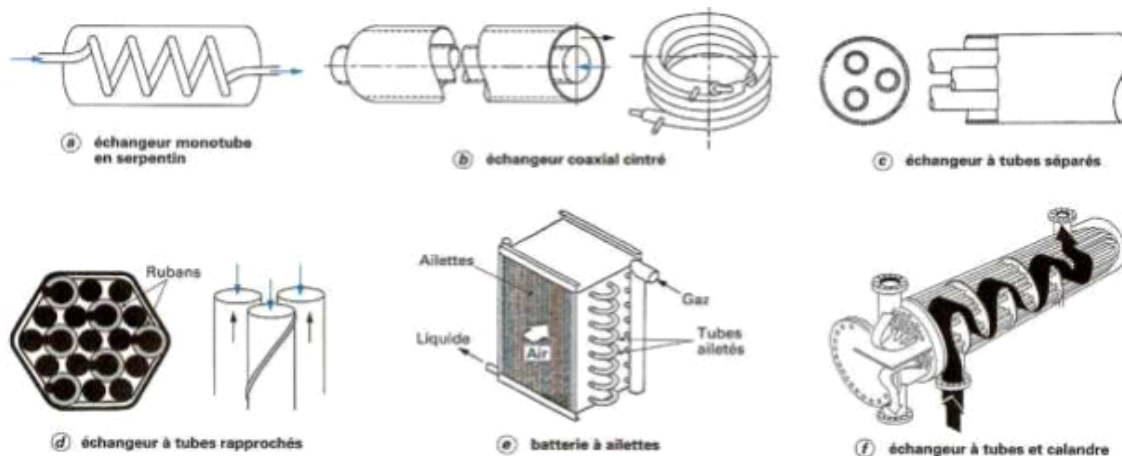
-**Échangeur multitubulaire**, existant sous quatre formes :

- échangeur à tubes séparés : (figure I.5 c) à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.

- échangeur à tubes rapprochés : (figure I.5 d) 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,

- échangeur à tubes ailettes : (figure I.5 e) ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.

- échangeur à tubes et calandre : (figure I.5 f) c'est l'échangeur actuellement le plus répandu [7].



**Figure 1-3:** Différents types d'échangeurs tubulaires.

## d) Mécanisme de transfert de chaleur

### ❖ Échangeur sans changement de phase :

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

### ❖ Échangeur avec changement de phase

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

1- l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.

2- 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.

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

## e) Arrangement d'écoulement :

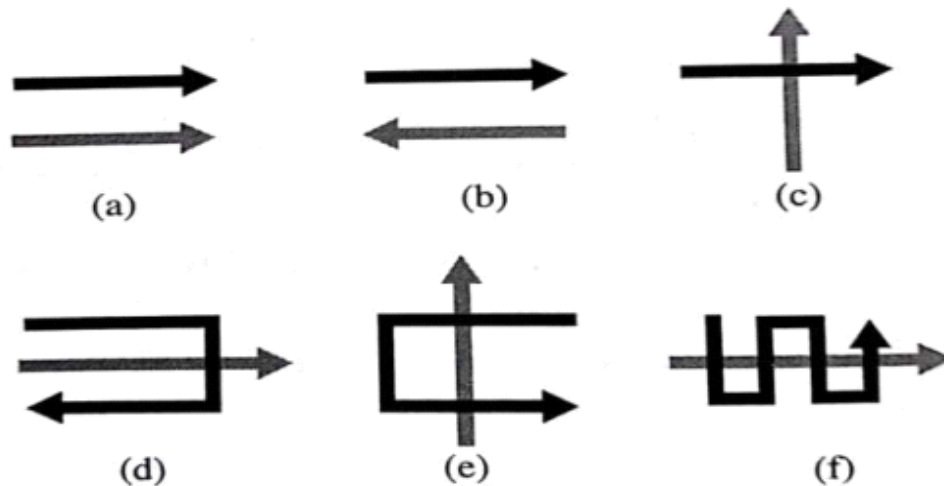
La circulation des agents dans les échangeurs de chaleur peut se produire d'après plusieurs schémas d'écoulement.

- Co-courant : (figure I.6 (a)) lorsque les fluides primaire et secondaire entrent par la même extrémité, dans le même sens et sortent par la même extrémité.

- Contre-courant : (figure I.6 (b)) lorsque les fluides entrent dans l'échangeur par des extrémités opposées, ayant un sens d'écoulement opposé et sortant de l'appareil par des extrémités opposées.

- Courant croisé (figure I.6 (c)) lorsque les directions d'écoulement des deux fluides sont perpendiculaires l'une à l'autre.

- Courant mixte : (figures I.6 (d), I.6 (e) et I.6 (f)) lorsqu'un des fluides change plusieurs fois la direction ou le sens d'écoulement face à l'autre. Ce type de circulation représente en fait une combinaison des trois autres [8].



**Figure1-4:** Configuration d'écoulements des échangeurs de chaleur [8]

#### f) L'encrassement des Echangeurs de chaleur

L'accumulation des dépôts indésirables sur les surfaces des échangeurs de chaleur est habituellement appelée l'encrassement. Ces dépôts engendrent une résistance au transfert de chaleur et réduit donc l'efficacité de l'échangeur de chaleur. L'encrassement peut être, une matière cristalline, des produits de réactions chimiques y compris la corrosion, ou de particules. La nature du dépôt dépend du fluide (liquide ou gaz) passant à travers l'échangeur de chaleur. Il peut être la masse de fluide lui-même qui provoque le problème de la formation de dépôts, par exemple, la décomposition d'un liquide organique, dans les conditions de température dans l'échangeur de chaleur. Le problème d'encrassement est produit par une certaine forme de contaminant dans le fluide, souvent à très faible concentration, par exemple, des particules solides ou des micro-organismes [9].

#### ❖ Classification :différents types d'encrassement

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, selon les conditions d'utilisations de l'échangeur ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt : pour cela on distingue : [10, 11,12]

- Encrassement particulaire.
- Entartrage.
- Corrosion.

- Encrassement biologique.
- Encrassement par réaction chimique.
- Encrassement par solidification.

Mais la plupart des dépôts réels sont le résultat de la combinaison d'au moins deux des types cités (Figure I.7), un type peut prédominer et accélérer à la contribution des autres. Plusieurs recherches ont été faites pour prévoir des méthodes performantes qui mettent en évidence des différents moyens pour minimiser l'encrassement ; la plupart des travaux se sont basés seulement sur le type d'encrassement particulaire (phénomène de déposition et de réentraînement) [13].



**Figure1-5:** Echangeur sale et propre

- **Encrassement particulaire**

La plupart des écoulements, de fluides industriels (liquides ou gazeux) transportent des particules en suspension dont la taille varie d'une fraction de  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  ; le dépôt est inévitable d'une partie de ces particules sur la surface d'échange (Figure I.8) [14] :

- L'eau de chaudière contenant des produits de corrosion.
- L'eau de tours de refroidissement.
- Les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- Les fumées industrielles de résidus solides de combustion.



- **Entartrage**

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide (Figure I.19) [15]. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être réunies :

- La limite de solubilité doit être dépassée (saturation) : c'est l'aspect thermodynamique.
- La vitesse de déposition doit être suffisamment rapide : c'est l'aspect cinétique. [16, 17]

- **Corrosion :**

C'est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement (Figure I.10), on distingue :

- La corrosion uniforme caractérisée par une perte d'épaisseur régulière mais dont la vitesse n'est pas forcément proportionnelle au temps.
- La corrosion par piqûres ou l'attaque est limitée à des zones de très petites surfaces ( $\approx 1\text{mm}^2$ ).
- La corrosion fissurant à l'échelle microscopique inter granulaire ou transe granulaire.
- La corrosion sélective ou seul un élément d'un alliage subit une attaque sélective [17].



**Figure1-6:** Importante corrosion

L'encrassement par corrosion est un promoteur potentiel pour tous les autres types d'encrassement, les produits de corrosion peuvent servir de germes de nucléation pour des solutions sursaturées, piéger les particules en suspension, servir d'abris pour le développement

de micro-organismes et mêmes catalyser certaines réactions [18].

Les produits de la réaction qui se forment et restent sur la surface d'échange créent le dépôt, il s'agit là, d'un mécanisme de corrosion, in situ, lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générée ex situ, l'encrassement correspondant est de type particulaire.

- **Encrassement biologique**

Il est dû au développement de micro-organismes qui créent un film au contact de la surface d'échange (Figure I.11), il peut être causé par trois grands types de microorganismes :

- Les bactéries, les algues et les champignons [18].
- Le développement bactérien est dû à un apport nutritif (hydrocarbures, ammoniacs),
- Le développement des algues est dû à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse.
- Les champignons se développent avec l'apport de nutriments mais surtout dû aux changements de conditions physiques ambiantes (pH, humidité, température)



**Figure1-7:** Dépôt des limes bactériens, hydrocarbures et oxydes métalliques

- **Encrassement par réaction chimique**

Il est dû à une réaction chimique qui se produit près d'une surface d'échange de chaleur et que les produits solides de la réaction s'y déposent, cette réaction est souvent une polymérisation et il en résulte la formation d'un dépôt de substance de hauts poids moléculaires [19, 20].

- **Encrassement par solidification**

Il s'agit de solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous refroidie, c'est un sujet de plusieurs études sur les pipes soit théorique ou expérimental [21].

- **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 (Figure I.12). 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. [22]

- ❖ **Conséquences de l'encrassement**

Comme il a été déjà signalé, 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. [22]

**g) Domaine d'utilisation des échangeurs de chaleurs**

- Chauffage de produits thermosensibles (pasteurisation du lait).
- Chauffage et refroidissements de produits visqueux.
- Raffinerie
- Préchauffage ou refroidissement de gaz
- Récupérateur thermique
- Capteurs ou émetteurs thermique
- Déshumidificateur
- Evaporateur
- Equipement qui permet la congélation et la fusion d'une phase vapeur
- Caloduc (refroidir les appareils électroniques).

## 1.4 Conclusion

Les échangeurs de chaleurs sont très utilisés dans différents domaines industriels par rapport à leur importance dans la production, c'est pour ce là nous intéressons à l'étude de ces dispositifs.

La maîtrise des calculs, du dimensionnement, assurer une bonne rentabilité de ces unités, améliorer le rendement, design de ces appareils d'échange de chaleur est une compétence fortement demandée dans le domaine de l'ingénierie.

L'étude de ces dispositifs peut être analytique ou numérique. Les méthodes de calcul des échangeurs de chaleur feront l'objet du chapitre suivant.

## **Chapitre II :**

# **Méthode de calcul des échangeurs de chaleur.**

## 2. Chapitre II : Méthodes de calcul des échangeurs de chaleur

### 2.1 Introduction :

La conception et le dimensionnement de l'échangeur de chaleur sont déterminés par un certain nombre de propriétés, nous allons présenter les différentes méthodes de dimensionnement d'un échangeur et nous donnerons les principaux modèles utilisés pour le calcul des paramètres de transfert de chaleur.

### 2.2 Grandeurs thermiques :

#### a) La température :

Le chaud et le froid sont appréciés par des sensations d'où une évaluation irrationnelle de ces grandeurs. La température caractérise le niveau auquel la chaleur se trouve dans un corps permettant ainsi de dire qu'un corps est plus ou moins chaud qu'un autre. [23]

#### b) Champ de température :

En tout point de l'espace où se trouve de la matière, on définit une fonction scalaire de température,  $T(x, y, z, t)$  en fonction des coordonnées du point ainsi que du temps. L'ensemble des valeurs instantanées de la température dans tout l'espace est appelé « champ de température » [24].

#### c) Flux de chaleur :

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur  $\varphi$  [25] :

$$\varphi = \frac{1}{s} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.1})$$

On appelle flux de chaleur  $\varphi$  la quantité de chaleur transmise sur la surface  $S$  par unité de temps :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.2})$$

**d) La chaleur :**

La chaleur est une forme d'énergie (énergie de mouvement des molécules) qui va d'un point chaud (température plus élevée) vers un point froid (température moins élevée).

**e) La chaleur spécifique :**

Par définition, la chaleur spécifique  $C_p$  correspond à la quantité de chaleur qu'il faut fournir à une quantité donnée de ce matériau pour que sa température s'élève d'un degré.

$$C_p = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (\text{II.3})$$

**f) Conductivité thermique :**

La conductivité thermique d'un matériau est une grandeur physique qui caractérise sa capacité à diffuser la chaleur dans les milieux sans déplacement macroscopique de matière [24].

**g) Résistance de contact :**

Le contact entre deux solides n'est uniforme qu'à une échelle macroscopique. A un niveau plus local, par exemple à l'échelle des rugosités le contact est discontinu. Cette discontinuité de conductivité thermique au niveau de la section, engendre une discontinuité dans le profil de température. On peut modéliser ce phénomène, par l'introduction de la résistance de contact  $R_c$  définie par la relation suivante :

$$R_c = \frac{1}{hc} \quad (\text{II.4})$$

## 2.3 Grandeurs physiques :

### a) La densité ( $\rho$ ) :

C'est le rapport de la masse d'un matériau par unité de volume. Appelée aussi masse volumique [25].

### b) La viscosité ( $\mu$ ) :

C'est la propriété d'un fluide qui tend à empêcher son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. Plus le fluide est visqueux (viscosité grande) plus son mouvement est difficile [25].

### c) Le débit :

C'est la quantité de fluide qui s'écoule ou qui est fournie par unité de temps. Il existe deux types de débits, le débit massique et le débit volumique. Le débit massique  $Q_m$  [Kg/s] et le débit volumique  $\dot{m}$  [ $m^3/s$ ].

### d) Le nombre de Reynolds :

Le nombre de REYNOLDS est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité donné par la formule suivante :

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (\text{II.5})$$

Il caractérise le régime d'écoulement des fluides.

L'expérience de REYNOLDS relative à un écoulement dans une conduite cylindrique a mis en évidence deux régimes d'écoulement caractérisés par un paramètre (nombre de REYNOLDS).

Pour les faibles débits d'écoulement, le régime est dit laminaire. Dans le cas contraire, il est turbulent (Figure II.2.1).

#### • Régime laminaire

Les filets fluides sont parallèles, les échanges s'effectuent entre les couches qui sont d'origine moléculaire (conduction).

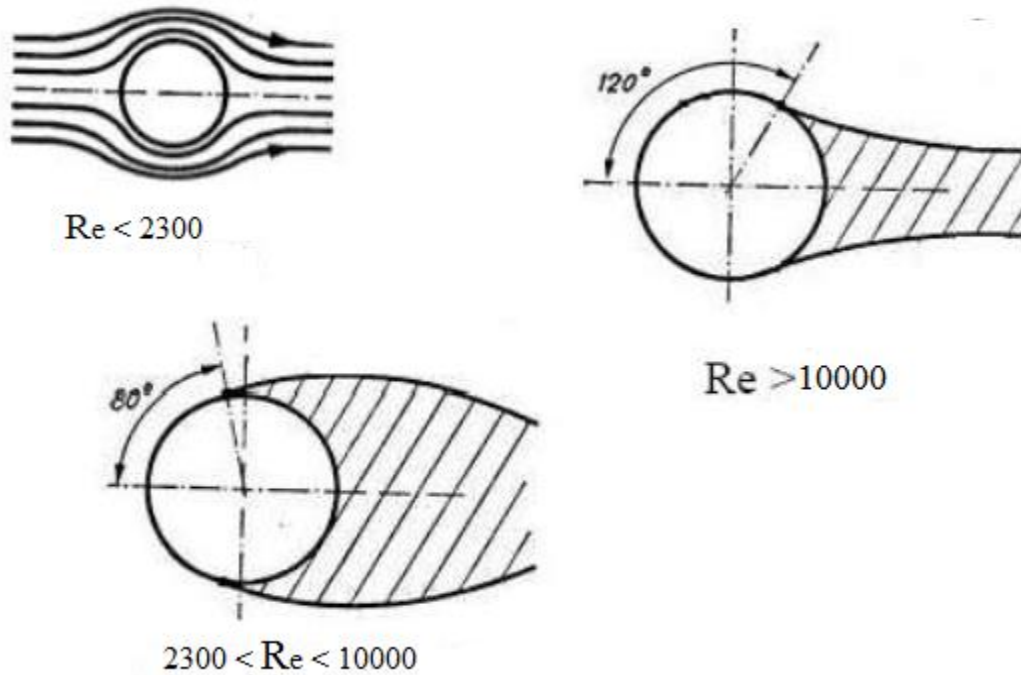
L'écoulement reste laminaire tant que le nombre de REYNOLDS reste inférieur à 2300.

#### • Régime turbulent

L'écoulement est perturbé, le mouvement des particules fluides est aléatoire et tridimensionnel.



Le régime d'écoulement est considéré comme turbulent si le nombre de REYNOLDS atteint ou dépasse 10000. Le régime correspondant au nombre de REYNOLDS compris entre 2300 et 10000 est dit transitoire.



**Figure 2-1:** régimes d'écoulement

**e) Nombre de Nusselt :**

Ce nombre sans dimension précise l'importance relative du flux de chaleur réellement transmis par convection vis-à-vis d'un flux de chaleur convectif de référence pour le problème.

$$Nu = \frac{hL}{\lambda_f} = \frac{\phi_{conv}}{\phi_{cond}} \quad (\text{II.6})$$

$h$  : Coefficient d'échange local ou global suivant les cas considérés.

En convection forcée, le nombre de Nusselt est lié au nombre de Reynolds et au nombre de Prandtl.

**f) Nombre de Prandtl :**

Il caractérise l'influence de la nature du fluide sur le transfert de chaleur par convection :

$$Pr = \frac{cp\mu}{\lambda} \quad (\text{II.7})$$

**g) L'efficacité :**

L'efficacité d'un échangeur de chaleur est définie comme étant, le rapport du flux de chaleur réel échangé, sur le flux maximum qui pourrait être échangé dans l'échangeur [26]

$$E = \frac{\phi_{reel}}{\phi_{max}} \quad (\text{II.8})$$

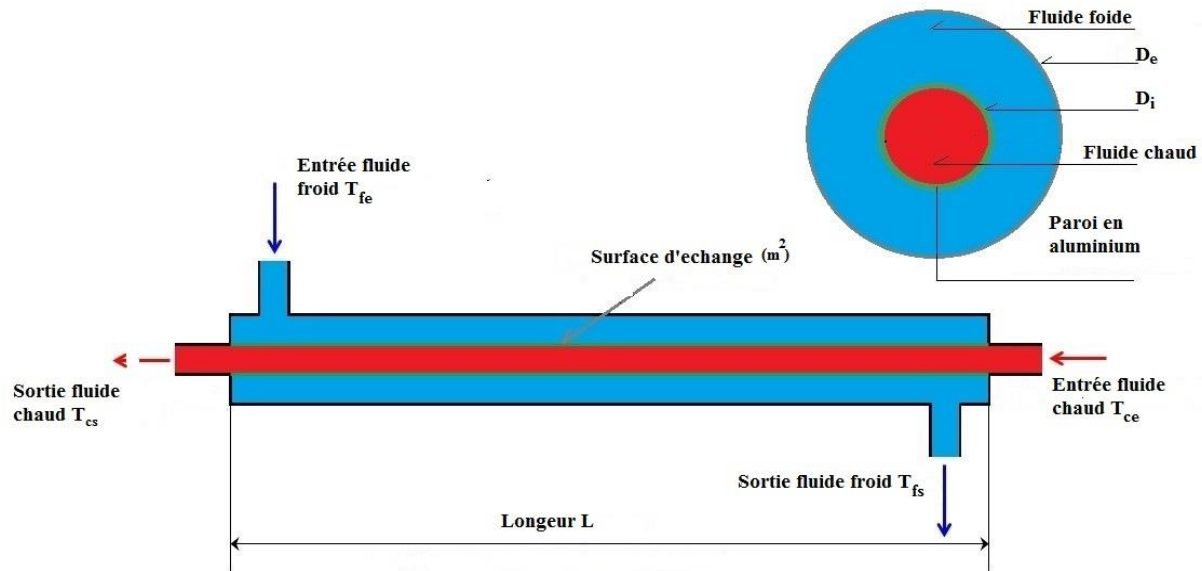
On dit que le fluide froid commande le transfert :

$$E = \frac{cp(T_{ce}-T_{cs})}{cp(T_{ce}-T_{fe})} = \frac{T_{ce}-T_{cs}}{T_{ce}-T_{fe}} \quad (\text{II.9})$$

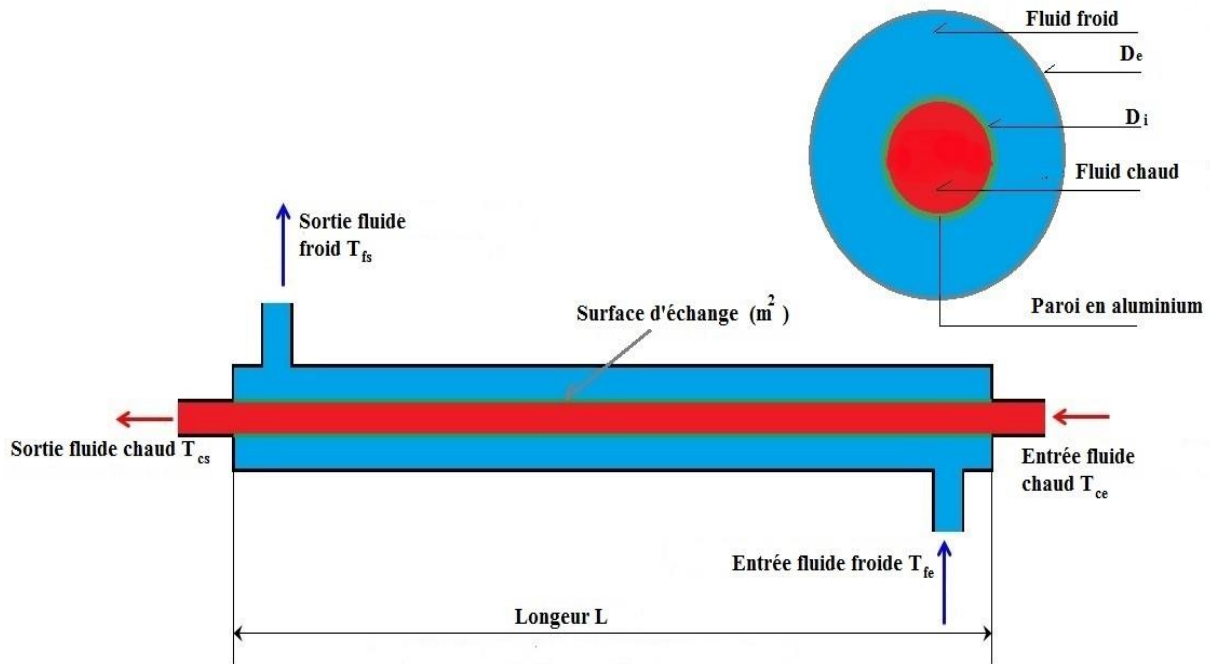
**2.4 Position du problème :**

L'échangeur de chaleur à étudier est constitué de deux conduits d'où le fluide chaud qui s'écoule qui est refroidit par fluide froid. Le fluide chaud et le fluide froid ce sont séparé par une paroi en aluminium. Les fluides pourront circuler dans le même sens (Co-courant) ou en sens contraire (Contrecourant).

Les échanges de chaleur se font par conduction dans les conduits et par convection thermique entre les fluides et la paroi.



**Figure 2-2:** Schéma d'un échangeur de chaleur (contre-courant)



**Figure 2-3:** Schéma d'un échangeur de chaleur (co-courant)

## 2.5 Hypothèses :

Pour formuler le problème à étudier, on doit avant tout poser les hypothèses suivantes :

- L'écoulement de fluide est supposé laminaire et stationnaire.
- Sections de passage constantes.
- Echangeur parfaitement isolé.
- Fluides monophasiques et incompressibles.
- Conduction thermique axiale dans les parois est tenue en compte.
- L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidimensionnels.
- Les propriétés physiques du fluide ( $C_p$ ,  $\mu$ ,  $\rho$ ) sont constantes.
- La température de parois externes constante.

## 2.6 Equations gouvernantes dimensionnelle laminaire :

### a) Equations de Navier-Stocks :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \Delta \vec{v} \quad (\text{II-10})$$

### b) Equation de continuité :

Où  $u$  et  $v$  étant les composantes du champ de vitesse ( $u, v$ ) dans les directions axiale ( $ox$ ) et radiale ( $oy$ ) respectivement :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.11})$$

### c) Équation de conservation de la quantité de mouvement :

Suivant  $x$  :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \quad (\text{II-12})$$

Suivant  $y$  :

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \quad (\text{II-13})$$

Dans ces équations  $u$  et  $v$  sont les composantes de la vitesse dans la direction  $x$  et  $y$ , respectivement :

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

**d) Conditions initiales et aux limites :**

Il existe quatre types de conditions aux limites dans notre étude :

- Entrées : toutes les propriétés du fluide sont connues.
- Sorties : le régime est établi donc on n'a pas une évolution par rapport à  $x$ .
- Parois : pour la paroi le champ de vitesse est nul.

Les conditions aux limites pour l'ensemble d'équations régissant sont présentées ci-dessous :

- Entrée :  $x=0$

Pour le fluide froid ( $0,0089 < y < 0,012$ )

$$P = P_{\text{atm}}$$

$$T = T_{\text{fe}} = 292\text{K}$$

Pour le fluide chaud ( $0 < y < 0,0083$ )

$$P = P_{\text{atm}}$$

$$T = T_{\text{ce}} = 328\text{K}$$

Pour le solide (paroi d'épaisseur de 0,0006) ( $0,0083 < y < 0,0089$ )

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

- Sorties :  $x=L=10$  m

Pour le fluide froid ( $0,0089 < y < 0,012$ )

$$P = P_{\text{atm}}$$

$$T = T_{\text{fs}}$$

Pour le fluide chaud ( $0 < y < 0,0083$ )

$$P = P_{\text{atm}}$$

$$T = T_{\text{cs}}$$

Pour le solide (paroi d'épaisseur de 0,0006) ( $0,0083 < Y < 0,0089\text{mm}$ )

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

## 2.7 Expression du flux échangé :

On rappelle que le flux  $\phi$  cédé par le fluide chaud ou gagné par le fluide froid peut s'écrire sous la forme suivante.

$$\phi = \dot{m}C_p\Delta T_{ml} \quad (\text{II.14})$$

Où  $\dot{m}$  est le débit massique,  $C_p$  la capacité thermique et  $\Delta T$  un écart de température.

On montre que le flux de chaleur peut s'écrire aussi en fonction du coefficient de transfert global  $Ke$ .

Entre l'entrée et la sortie du tube considéré, rapporté à la surface extérieure :

$$\phi = KeS_e\Delta T_{ml} \quad (\text{II.15})$$

$S_e$ : Surface extérieure de la conduite.

$\Delta T_{ml}$  : est l'écart de température moyen logarithmique. Il représente un écart de température caractéristique dépendant du sens de circulation.

A contre-courant,  $\Delta T_{ml}$  est définie comme suit :

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{c,e}-T_{f,s})-(T_{c,s}-T_{f,e})}{\ln\left(\frac{T_{c,s}-T_{f,s}}{T_{c,e}-T_{f,e}}\right)} \quad (\text{II.16})$$

A co-courant,  $\Delta T_{ml}$  est défini comme suit :

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{ce}-T_{fe})-(T_{cs}-T_{fs})}{\ln\left(\frac{T_{ce}-T_{fs}}{T_{cs}-T_{fe}}\right)} \quad (\text{II.17})$$

### a) Contre-courant :

- Température de sortie du fluide froid ( $T_{fs}$ )

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{(T_{ce}-T_{cs})}{\beta} \quad (\text{II.18})$$

- Température de sortie du fluide chaud ( $T_{cs}$ )

A partir de (II.15) et (II.16) :

$$\dot{m}_c C_p \Delta T_{ml} = KeS_e \Delta T_{ml} = KeS_e \frac{(T_{ce}-T_{fs})-(T_{cs}-T_{fe})}{\ln\left(\frac{T_{ce}-T_{fs}}{T_{cs}-T_{fe}}\right)}$$

$$\dot{m}_c C_p \ln\left(\frac{T_{ce}-T_{fs}}{T_{cs}-T_{fe}}\right) (T_{ce}-T_{cs}) = KeS_e [(T_{ce}-T_{fs}) - (T_{cs}-T_{fe})]$$

$$\ln \left( \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}} \right) = \frac{KeS_e}{\dot{m}_c Cp (T_{ce} - T_{cs})} [(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})]$$

On introduit le facteur de déséquilibre  $\beta = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{fs} - T_{fe}} = \frac{\dot{m}_f Cp}{\dot{m}_c Cp}$

$$\ln \left( \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}} \right) = \frac{KeS_e}{\dot{m}_c Cp} \left[ 1 - \frac{1}{\beta} \right]$$

D'où :

$$\frac{T_{c,e} - T_{c,s}}{T_{f,s} - T_{f,e}} = \exp \left( \frac{KeS_e}{\dot{m}_c Cp} \left[ 1 - \frac{1}{\beta} \right] \right) \exp \left( \frac{KeS_e}{\dot{m}_c Cp} \left[ 1 - \frac{1}{\beta} \right] \right)$$

$$T_{c,s} = T_{f,e} + (T_{c,e} - T_{f,s}) \exp \left( - \frac{KeS_e}{\dot{m}_c Cp} \left[ 1 - \frac{1}{\beta} \right] \right)$$

On obtient :

$$T_{c,s} = \frac{T_{c,e}(\beta - 1) - \beta \left[ 1 - \exp \left( \frac{KeS_e(\beta - 1)}{\dot{m}_f Cp_f} \right) \right] T_{f,e}}{\beta \exp \left( \frac{KeS_e(\beta - 1)}{\dot{m}_f Cp_f} \right) - 1} \quad (\text{II. 19})$$

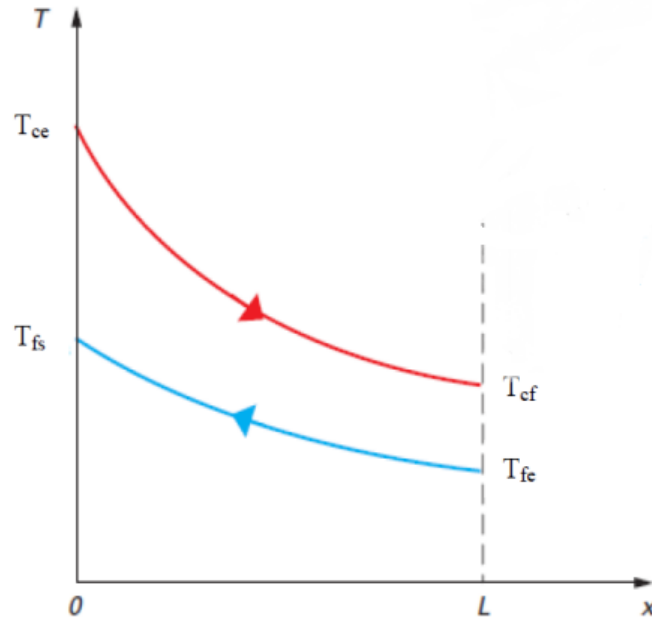


Figure 2-4: Distribution de température dans un échangeur Contre-courant.

### b) Co-courant

On a :

$$\dot{m}_c Cp \Delta T_{ml} = KeS_e \Delta T_{ml} = KeS_e \frac{(T_{ce} - T_{fe}) - (T_{cs} - T_{fs})}{\ln \left( \frac{T_{ce} - T_{fe}}{T_{cs} - T_{fs}} \right)}$$

- Température de sortie du fluide froid ( $T_{f,s}$ )

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{\beta} \quad (\text{II. 20})$$

- Température de sortie du fluide chaud ( $T_{c,s}$ )

$$T_{c,s} = \frac{\left[ \beta + \exp \left( \frac{KeS_e(\beta - 1)}{\dot{m}_f Cp_f} \right) \right] T_{c,e} + \beta \left[ \exp \left( \frac{KeS_e(\beta - 1)}{\dot{m}_f Cp_f} \right) - 1 \right] T_{f,e}}{(\beta + 1) \exp \left( \frac{KeS_e(\beta - 1)}{\dot{m}_f Cp_f} \right)} \quad (\text{II. 21})$$



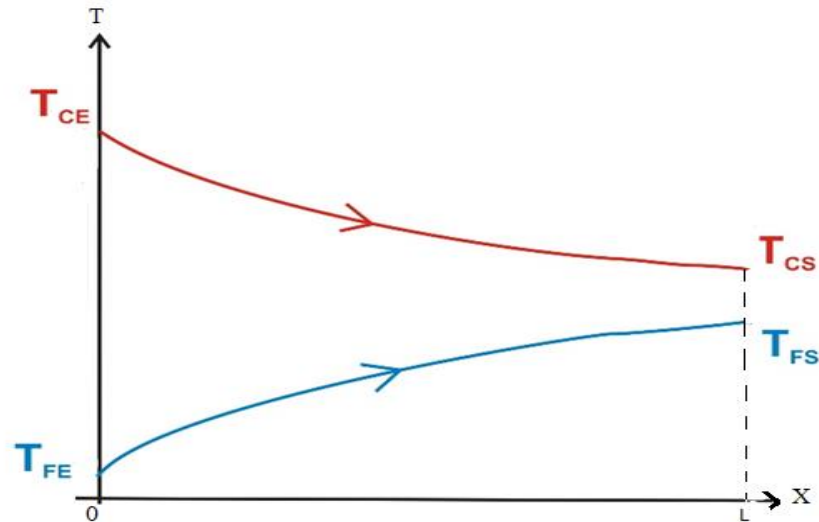


Figure 2-5: Distribution de température dans un échangeur Co-courant

### c) Analogie électrique

- Calcul du coefficient d'échange globale  $k$  :

En utilisant la méthode de l'analogie électrique, la résistance totale thermique équivalente  $R$  au niveau de la paroi d'acier inoxydable de l'échangeur.

$$Ke = \frac{1}{\frac{r_e}{r_i h_i} + \frac{r_e}{k} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{II.25})$$

### d) Calcul des coefficients d'échange thermique convectifs

- Coefficient d'échange interne  $h_i$  :

Pour des écoulements turbulents dans un cylindre, la corrélation de Gnielinski nous permet d'écrire que :

$$Nu_{Di} = \frac{\left(\frac{C_f}{2}\right)(Re_{Di} - 10^3)Pr}{1 + 12,7\left(\frac{C_f}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (\text{II.26})$$

$C_f$  : coefficient de frottement, donnée par

$$C_f \approx 0,079 Re_{Di}^{-\frac{1}{4}} \quad (\text{II.27})$$

$Pr$  : Est le nombre de Prandtl défini par  $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

$Re_{Di}$ : Nombre de Reynolds de la conduite interne, donné par

$$Re_{Di} = \frac{VD_i}{\nu} = \frac{4\dot{m}_e}{\pi(D_i)\mu} \quad (\text{II.28})$$

D'où

$$h_i = \frac{Nu_{Di}K}{D_i} = \frac{K\left(\frac{C_f}{2}\right)(Re_{Di}-10^3)Pr}{D_i\left[1+12,7\left(\frac{C_f}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)\right]} \quad (\text{II.29})$$

• Coefficient d'échange annulaire  $h_e$

$$Nu_{Deq} = \frac{\left(\frac{C_f}{2}\right)(Re_{Deq}-10^3)Pr}{1+12,7\left(\frac{C_f}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (\text{II.30})$$

Le nombre de Reynolds et donné en fonction d'un diamètre équivalent

$$Re_{Deq} = \frac{V}{\nu} \left(\frac{D_e^2 - D_i^2}{D_i}\right) = \frac{4\dot{m}_e}{\pi\left(\frac{D_e^2 - D_i^2}{D_i}\right)\mu} \quad (\text{II.31})$$

Donc

$$h_e = \frac{Nu_{Deq}K}{D_{eq}} = \frac{k\left(\frac{C_f}{2}\right)(Re_{Deq}-10^3)Pr}{D_{eq}\left[1+12,7\left(\frac{C_f}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)\right]} \quad (\text{II.32})$$

## 2.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, on s'intéresse à définir les différent grandeurs thermique et physique qu'on a utilisé comme base de donné de notre recherche.

Aussi on a défini les équations gouvernantes de dimensionnelle et de conservation de la quantité du mouvement, les conditions limites ont permet à réaliser et à faire plusieurs méthode du calcul de la température.

Donc elle est nécessaire d'utilisé un logiciel de simulation numérique qui permis de mieux comprendre le comportement thermique des deux fluides en circulations dans un échangeur de chaleur coaxial, c'est ce qu'on va voir dans le chapitre suivant.

# **Chapitre III :**

## **Résultat et discussions**

## 3. CHAPITRE III : Résultat et discussions

### 3.1 Introduction :

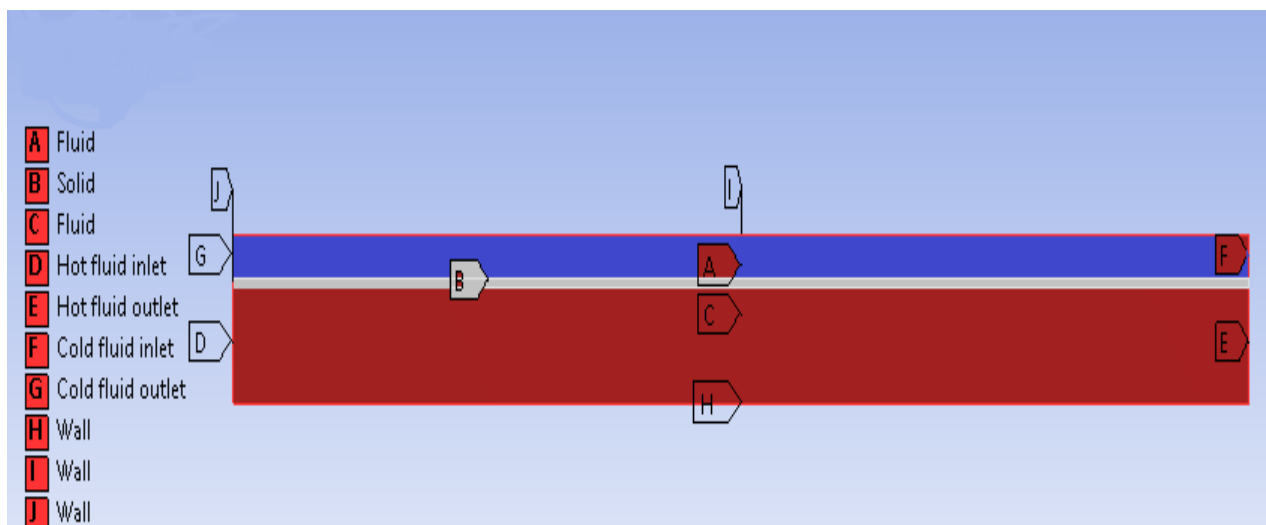
L'ordinateur a changé les pratiques des ingénieurs, avec la simulation numérique en les aidants à énoncer des hypothèses et des résultats, en produisant la démonstration de théorèmes qu'aucun humain ne peut mener, en validant des preuves complexes ou douteuses.

On utilise dans ce chapitre le logiciel de simulation, qui offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, des turbulences, des transferts de chaleur.

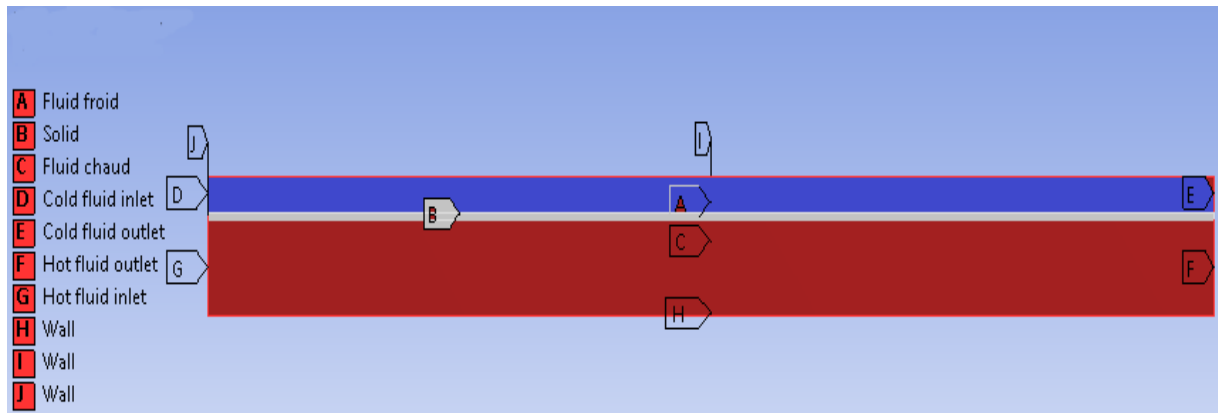
Nous allons nous intéresser aux contours de températures et l'évolution de température du chaque fluide le long des conduites de l'échangeur et cela pour un écoulement Co-courant et Contre-courant. Une étude comparative à la lumière de température de chaque échangeur a été mise en évidence.

### 3.2 Description de la géométrie et de maillage

Les configurations géométriques considérées dans le présent travail sont illustrée sur les figures suivantes :



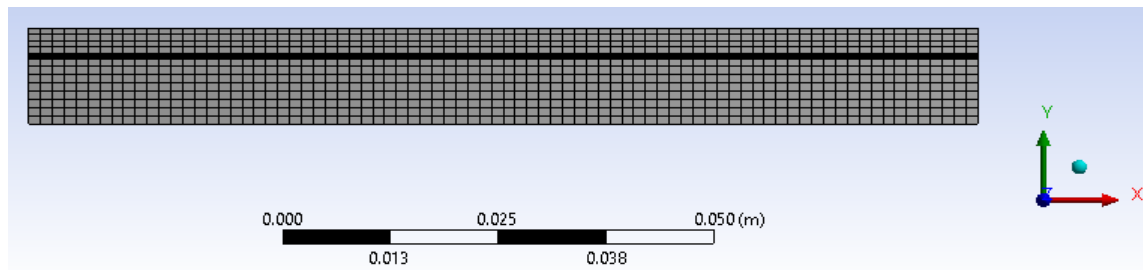
**Figure 3-1:** Cas de géométrie Contre-courant



**Figure 3-2:** Cas de géométrie Co-courant

Pour le maillage de l'échangeur de chaleur co-courant et contre-courant, on a utilisé un maillage quadratique, cela nous permet de réduire la diffusion numérique tout en s'assurant d'avoir le même nombre de subdivision sur chaque côté.

Pour le nombre de subdivision le long de la longueur de l'échangeur a été choisi de sorte que la taille des mailles sur la longueur ne soit pas trop grande devant les mailles verticales



**Figure 3-3 :** le maillage

### 3.3 Résultats et discussion :

Les conditions aux limites adoptées dans cette étude sont :

Propriété de l'eau	Fluide chaud	Fluide froid
rho	989,12	997
viscosité	0,000577	0,000855
conductivité thermique	0,64	0,613
Cp	4180	4179
diffusité thermique	0,0154794	0,0147126
Prandtl	4	6

**Tableau 3.1:** Conditions aux limites

Fluide Froid						
débit volumique (l/mn)	débit $\dot{m}$ (kg/s)	$D_{eq}$ (m)	$Re_{Deq}$	$C_f$	$Nu_{Deq}$	$h_e$ ( $W/m^2k$ )
1	0,0165	0,009049398	2715,24022	0,01094397	17,62907854	1194,181662
2	0,033	0,009049398	5430,48045	0,00920275	40,57341618	2748,415322
3	0,0495	0,009049398	8145,72067	0,00831562	61,12002547	4140,228512
Fluide Chaud						
débit volumique (l/mn)	débit $\dot{m}_e$ (kg/s)	$D_i$ (m)	$Re_{Di}$	$C_f$	$Nu_{Di}$	$h_i$ ( $W/m^2k$ )
2	0,033	0,0083	8777,89492	0,00816168	55,54700073	4283,142225

**Tableau 3.2:** coefficient d'échange annulaire

On remarque que les corrélations présentées précédemment, sont bien applicables pour notre cas, vu que :

$$0,5 \leq Pr \leq 10^6$$

$$2300 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$$

On remarque que les coefficients d'échange par convection calculés ont des valeurs comprise dans l'intervalle des coefficients d'échange thermique des fluides en convection forcée

$$300 \leq h \leq 12000$$

- Coefficient d'échange thermique globale K :

débit fluide froid (l/mn)	$r_i$	$r_e$	$h_i$	$h_e$	$Ke$ ( $W/m^2k$ )
1	0,00415	0,00475	4283,14223	1194,18166	902,6971346
2	0,00415	0,00475	4283,14223	2748,41532	1576,680862
3	0,00415	0,00475	4283,14223	4140,22851	1953,390942
k de l'aluminium (w/m K)					
202,4					

**Tableau 3.3:** Coefficient d'échange thermique globale K

- Température de sortie des deux fluides

Pour des températures d'entrées données  $T_{f,e} = 292 \text{ K}$  et  $T_{c,e} = 328 \text{ K}$

Longueur (m)	10							
$T_{fe} (k)$	292							
$T_{cs} (k)$	328				Contre courant		Co-courant	
debit fluide froid (l/mn)	$\beta$	$S_e (m^2)$	$KeS_e$	$(mCp)_f$	$T_{cs} (k)$	$T_{fs} (k)$	$T_{cs} (k)$	$T_{fs} (k)$
1	0,499880383	0,298451302	269,411135	68,9535	311,3768327	325,2542901	316,0361151	315,933496
2	0,999760766	0,298451302	470,562456	137,907	300,1633318	319,8433293	310,0217328	309,982569
3	1,499641148	0,298451302	582,99207	206,8605	295,5055717	313,668136	306,420901	306,389508

**Tableau 3.4:** Température de sortie des deux fluides

- Comparaison avec les valeurs numériques :

debit fluide froid(l/mn)	Contre courant			Co-Courant		
	$T_{cs} (k)$	$T_{cs} EXP (k)$	Erreur relative	$T_{cs} (k)$	$T_{cs} EXP (k)$	Erreur relative
1	311,3768327	310,194	0,3223789	316,036115	315,7986	0,316657515
2	300,1633318	298,709	0,33477398	310,021733	309,6126	0,322984271
3	295,5055717	294,46285	0,33960141	306,420901	305,6471	0,327174706
debit fluide froid(l/mn)	$T_{fs} (k)$	$T_{fs} EXP (k)$	Erreur relative	$T_{fs} (k)$	$T_{fs} EXP (k)$	Erreur relative
1	325,2542901	324,1429	0,30850591	315,933496	314,7158	0,317746996
2	319,8433293	318,863	0,31361431	309,982569	308,9997	0,32362491
3	313,668136	312,79796	0,31969518	306,389508	305,1245	0,327735072

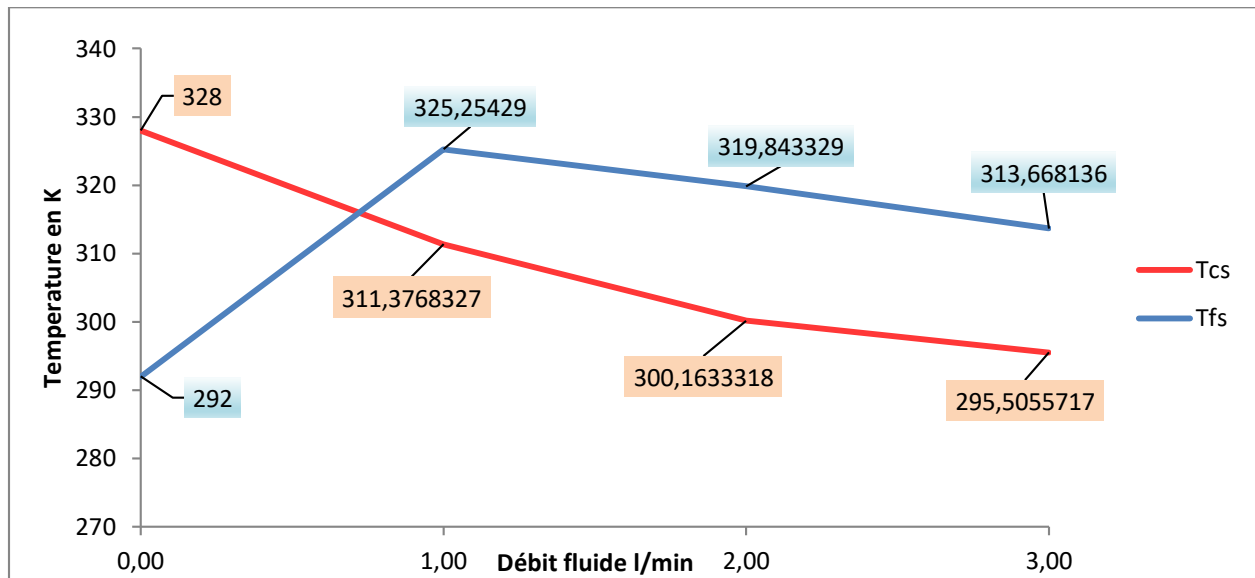
**Tableau 3.5:** Comparaison avec les valeurs numériques

On remarque que pour le fluide chaud, qui circule à l'intérieur du tube interne de l'échangeur, on a des résultats presque les mêmes (absence de perte de chaleur avec le milieu ambiant), mais le fluide froid il y a une différence entre les valeurs théorique et numérique à cause de l'échange de chaleur avec le milieu ambiant, et comme les équations qu'on a développées sont applicable dans le cas où le milieu est isolé du milieu ambiant.

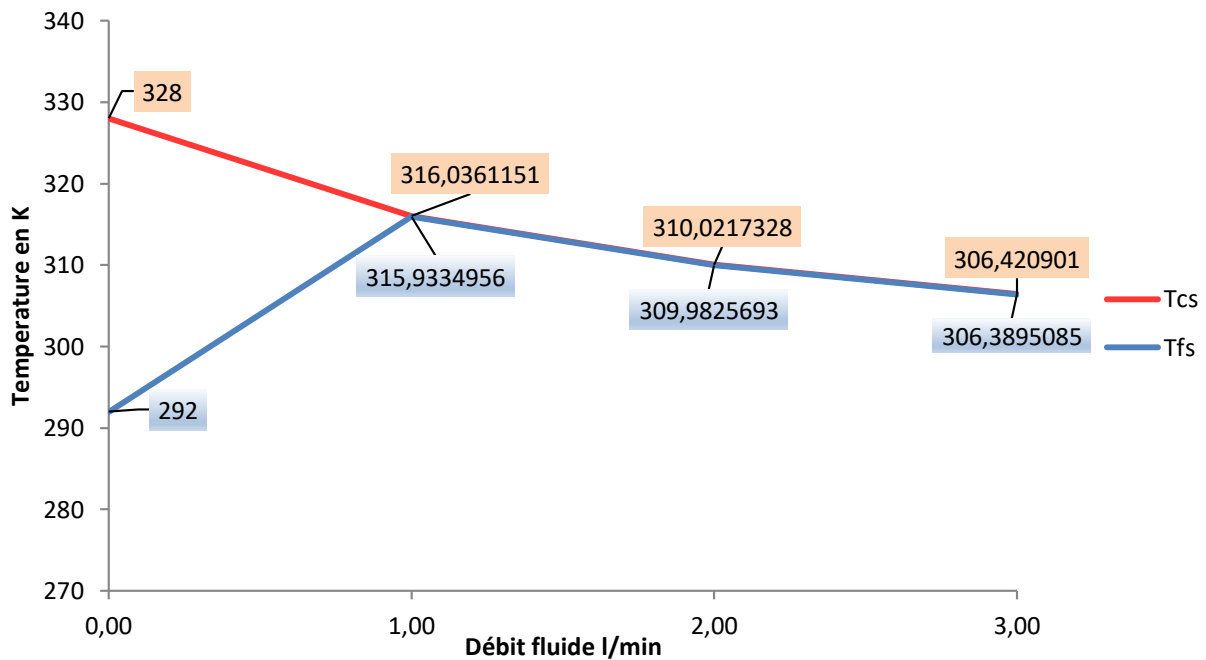
On remarque que l'écarte entre les résultats analytique et numérique sans faibles ( $\approx 1\%$ ).

D'où on peut dire que nous résultats sont acceptables.

• Profil des températures :



**Figure 3-4:** Variation de  $T_{cs}$  et  $T_{fs}$  en fonction de débit du fluide froid d'un échangeur contre-courant.



**Figure 3-5:** Variation de  $T_{cs}$  et  $T_{fs}$  en fonction de débit du fluide froid d'un échangeur co-courant.



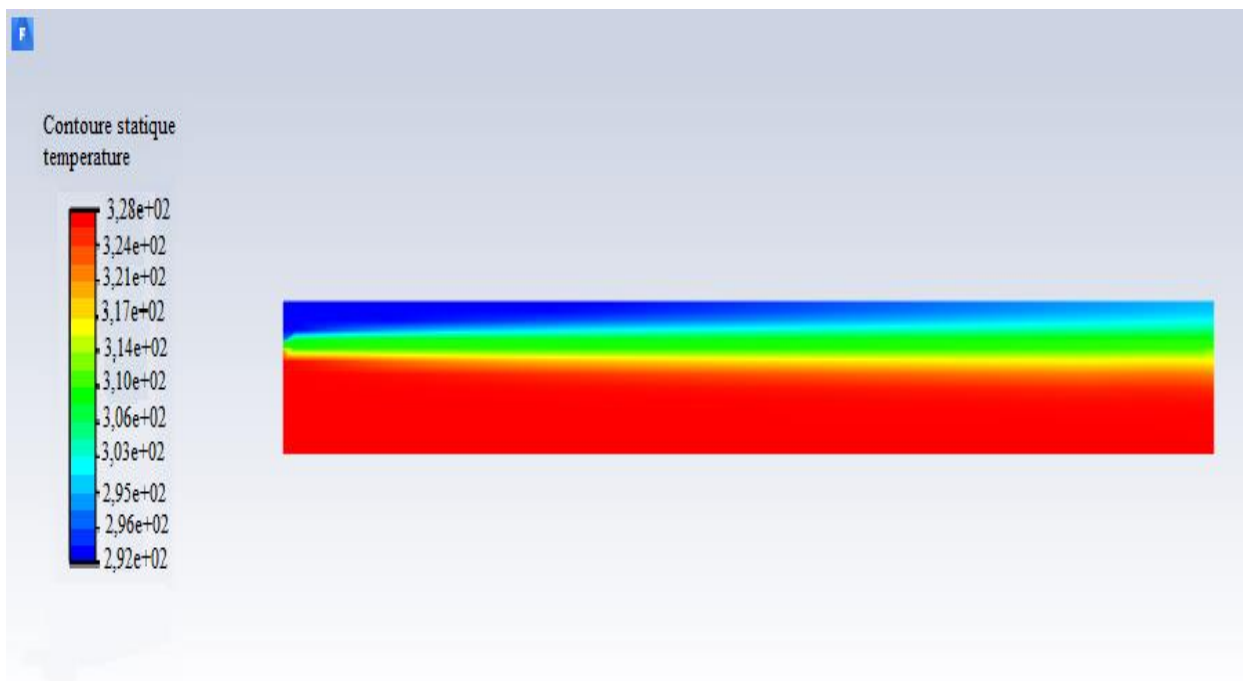
Sur ces figures on a représenté l'évolution de la température à la sortie de chaque échangeur. A partir des comparaisons des évolutions des températures de chaque fluide en fonction du débit d'eau froide, on remarque que

- Fluide chaud : plus le débit de fluide froid augmente plus la température de sortie du fluide chaud diminue.
- Fluide froid : plus le débit de fluide froid diminue plus la température de sortie du fluide froid augmente.

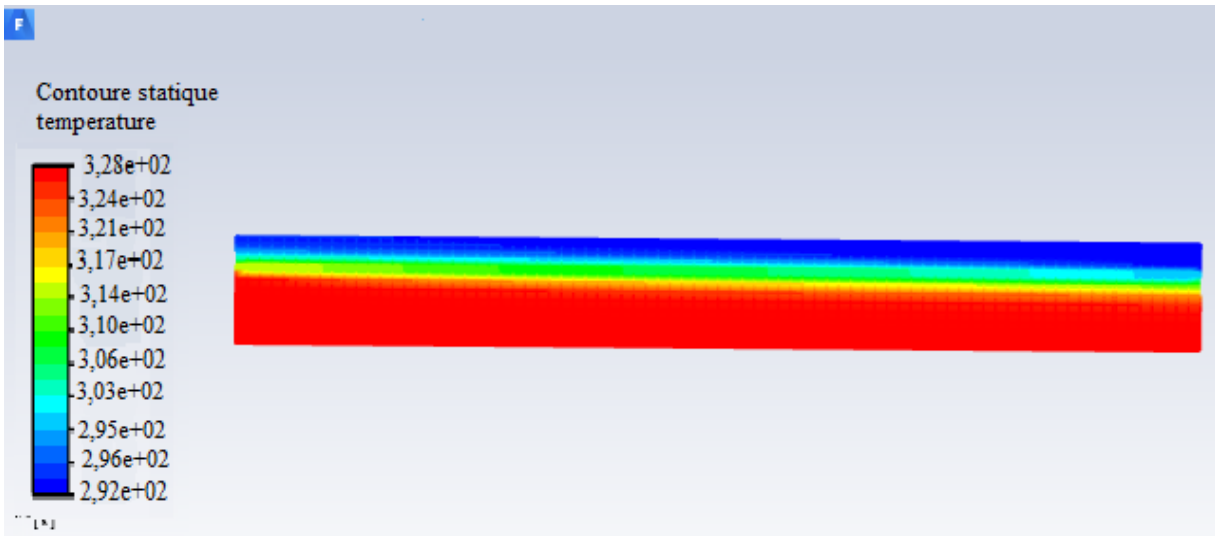
**a) Contours des températures à Co-courant et à Contre-courant :**

On fixe le débit de fluide chaud, et on a varié le débit de fluide froid dans chaque expérience.

- Avec débit fluide froid (1) :

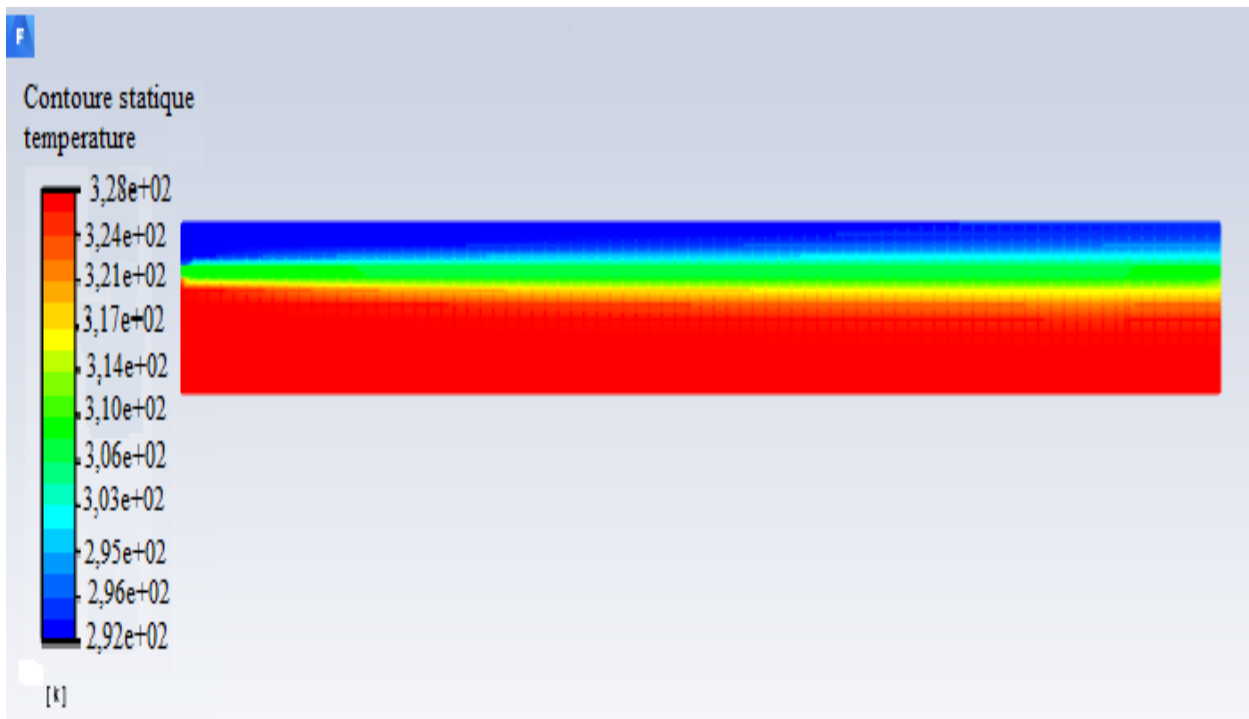


**Figure 3-6 :** Contours de température d'un échangeur de géométrie à Co-courant.

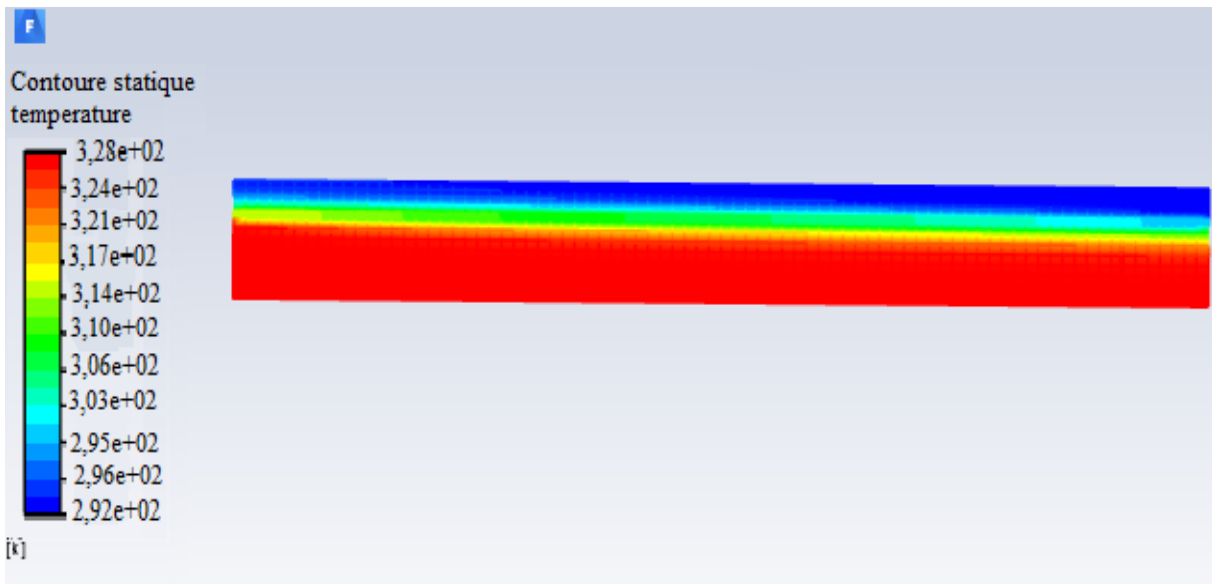


**Figure 3-7:** Contours de température d'un échangeur de géométrie à Contre-courant.

- Avec débit fluide froid (2) :

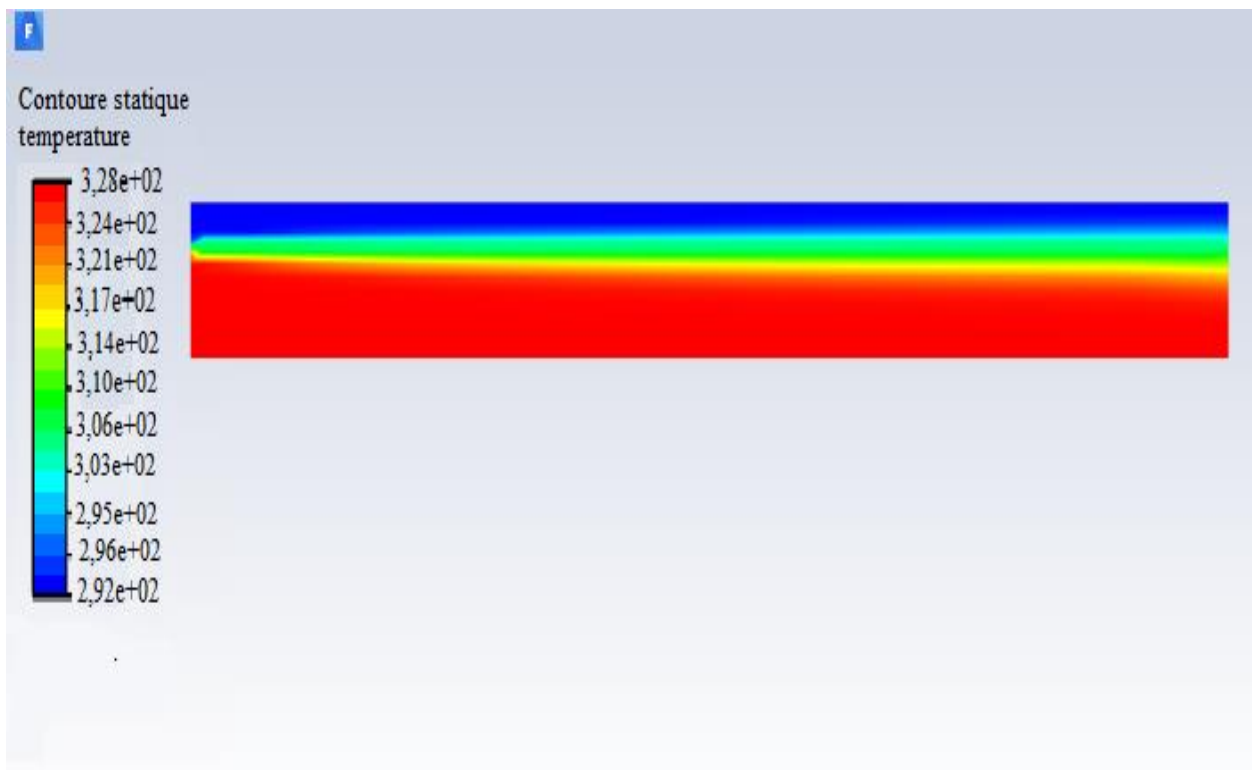


**Figure 3-8:** Contours de température d'un échangeur de géométrie à Co-courant

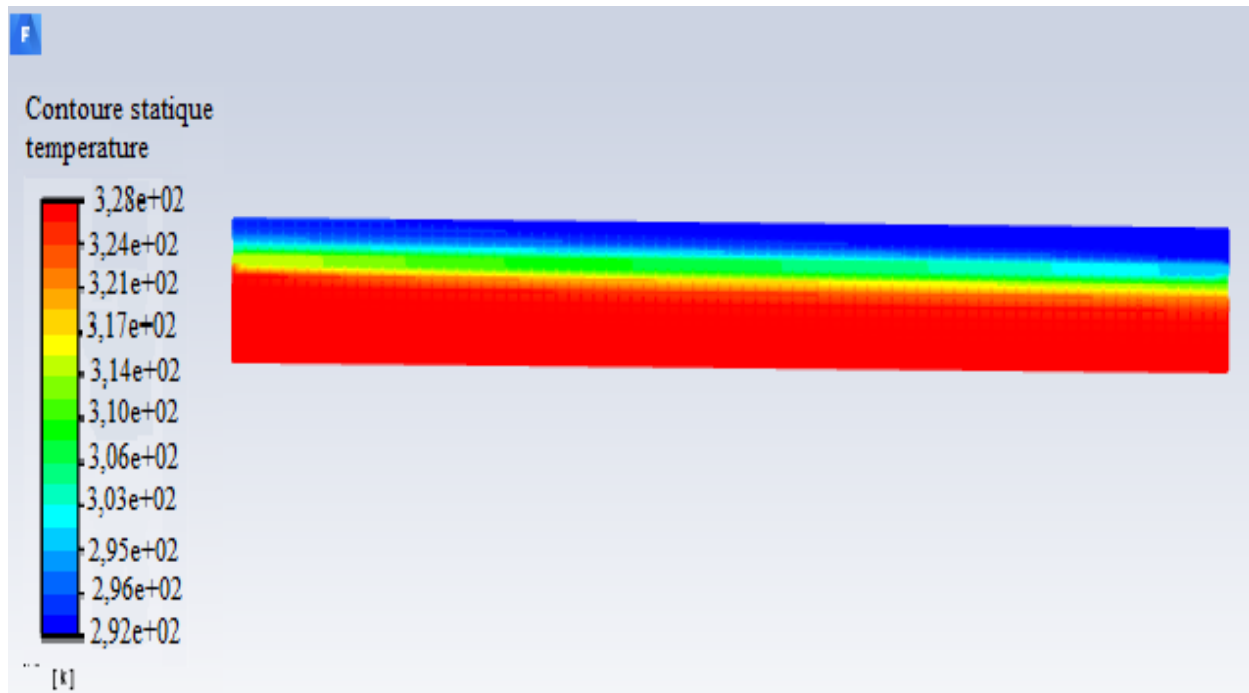


**Figure 3-9:** Contours de température d'un échangeur de géométrie à Contre-courant.

- Avec débit fluide froid (3) :



**Figure 3-10:** Contours de température d'un échangeur de géométrie à Co-courant



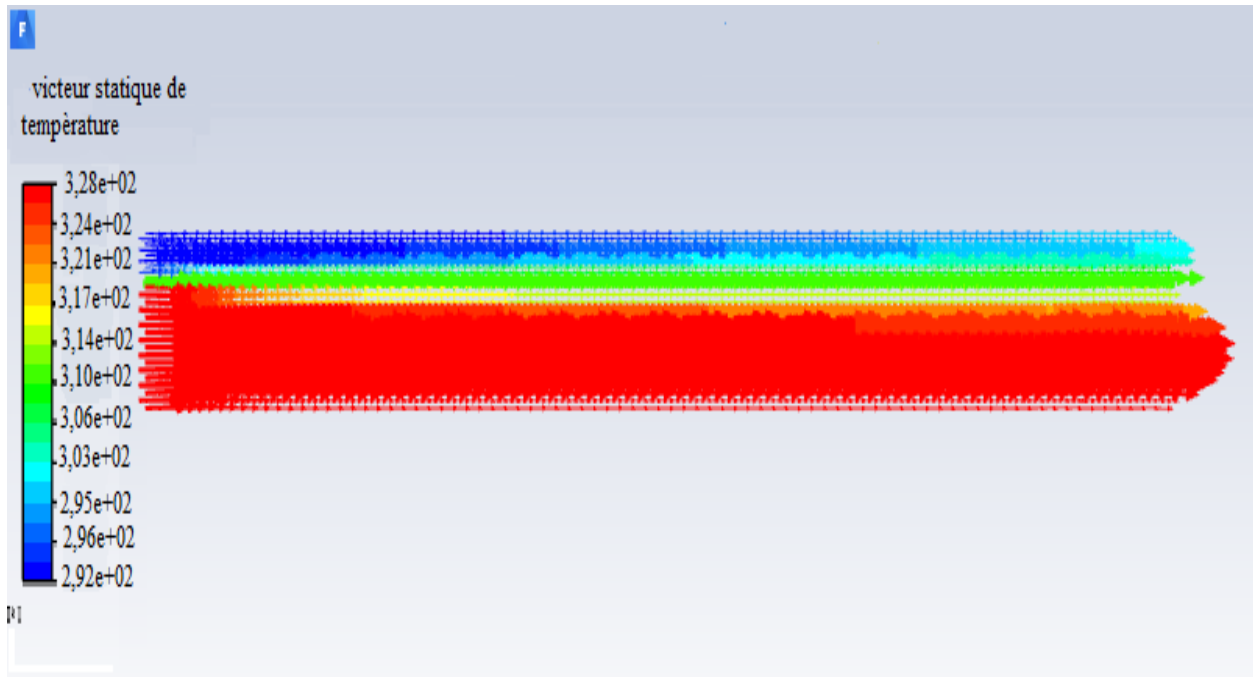
**Figure 3-11:** Contours de température d'un échangeur de géométrie à Contre-courant.

Ces figures, montre deux structures d'écoulement le premier est Co-courant et l'autre Contre-courant avec le même débit massique entre les deux structures, on voit dans chaque structure deux couche mince à les deux entrer et commencent à délatté jusqu'à la sortie du deux canal à cause de l'échange thermique. Le fluide froid gagner et l'autre perde de la chaleur. En vois les dégradations des couleurs qui nous montre l'échange de chaleur qui ce produis entre les parois (surface d'échange) et les deux fluides.

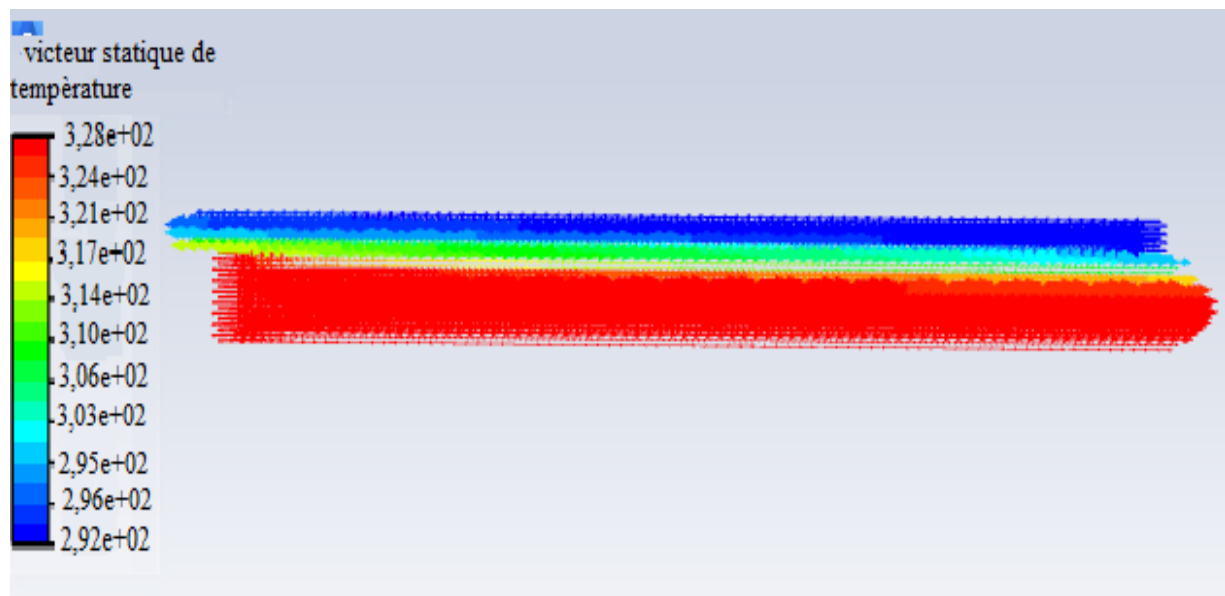
Avec l'augmentation de débit du fluide froid on remarque que la dégradation des couleurs ce diminue qui explique que l'échange thermique ce diminue.

**b) Contours des vitesses Co-courant et Contre-courant :**

- Avec débit fluide froid (1) :



**Figure 3-12:** Contours de vitesse dans un échangeur co-courant.



**Figure 3-13:** Contours de vitesse dans un échangeur contre-courant.

- Avec débit fluide froid (2) :

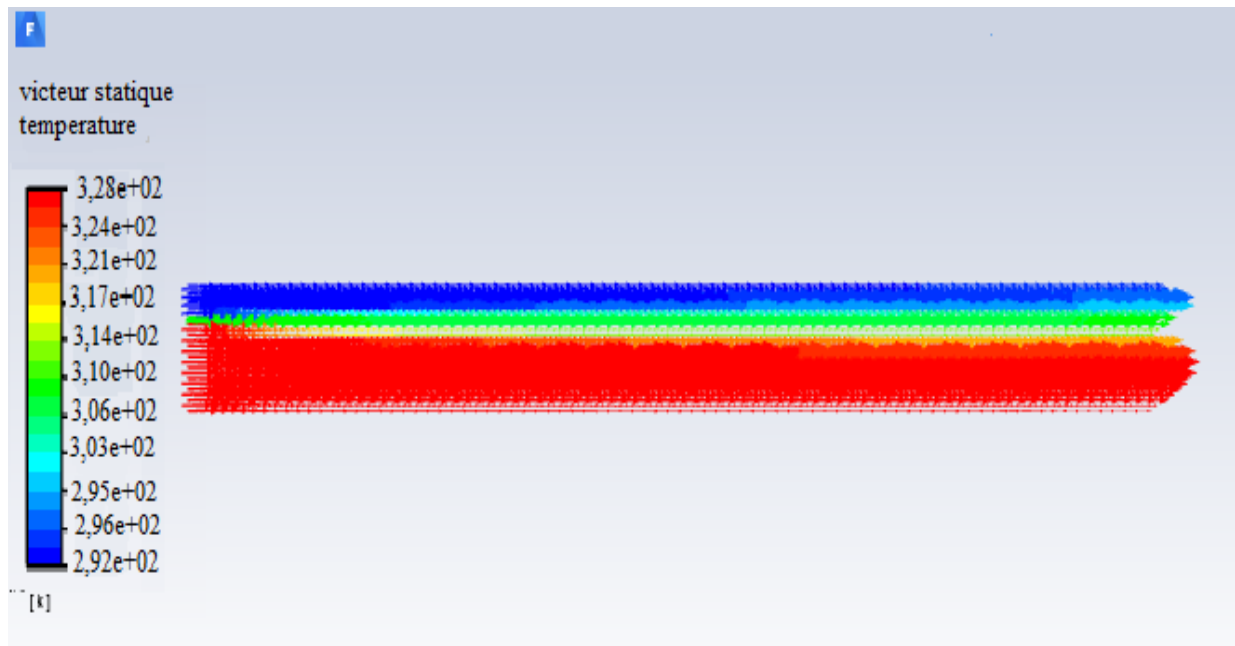


Figure 3-14: Contours de vitesse dans un échangeur co-courant.

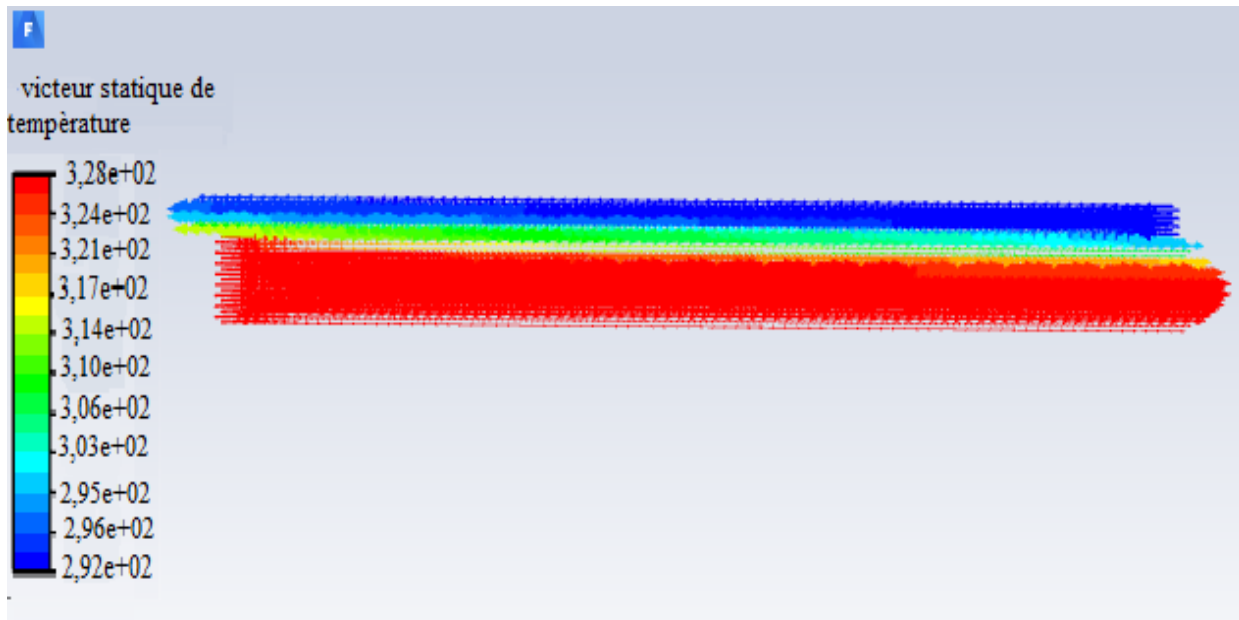
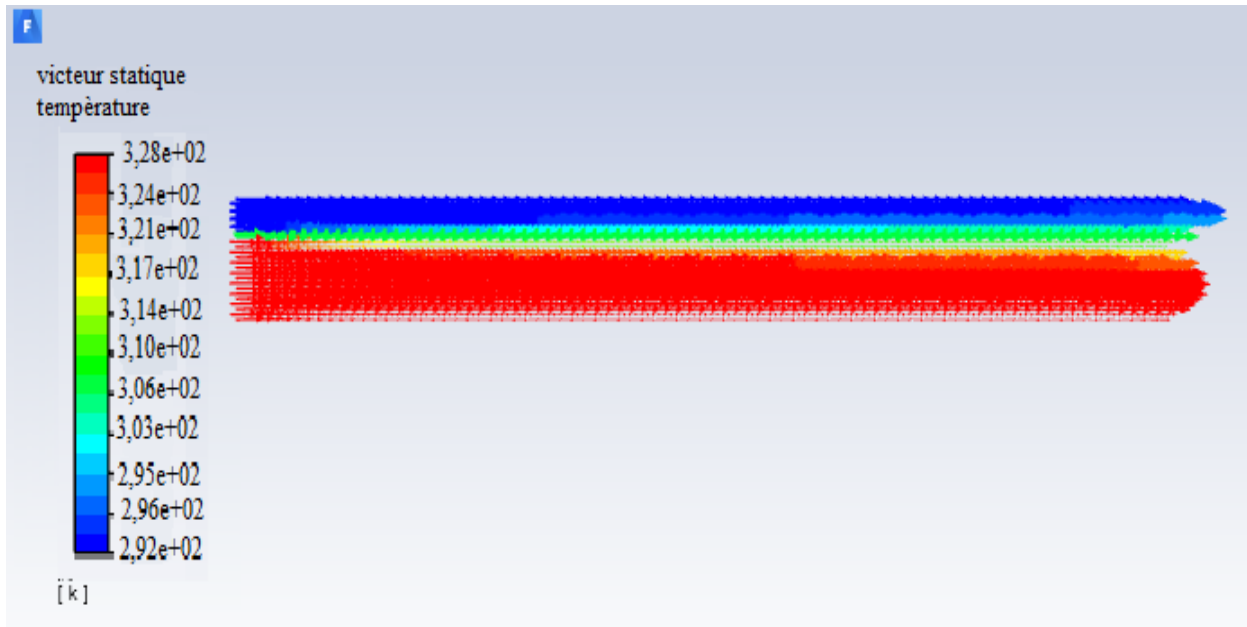
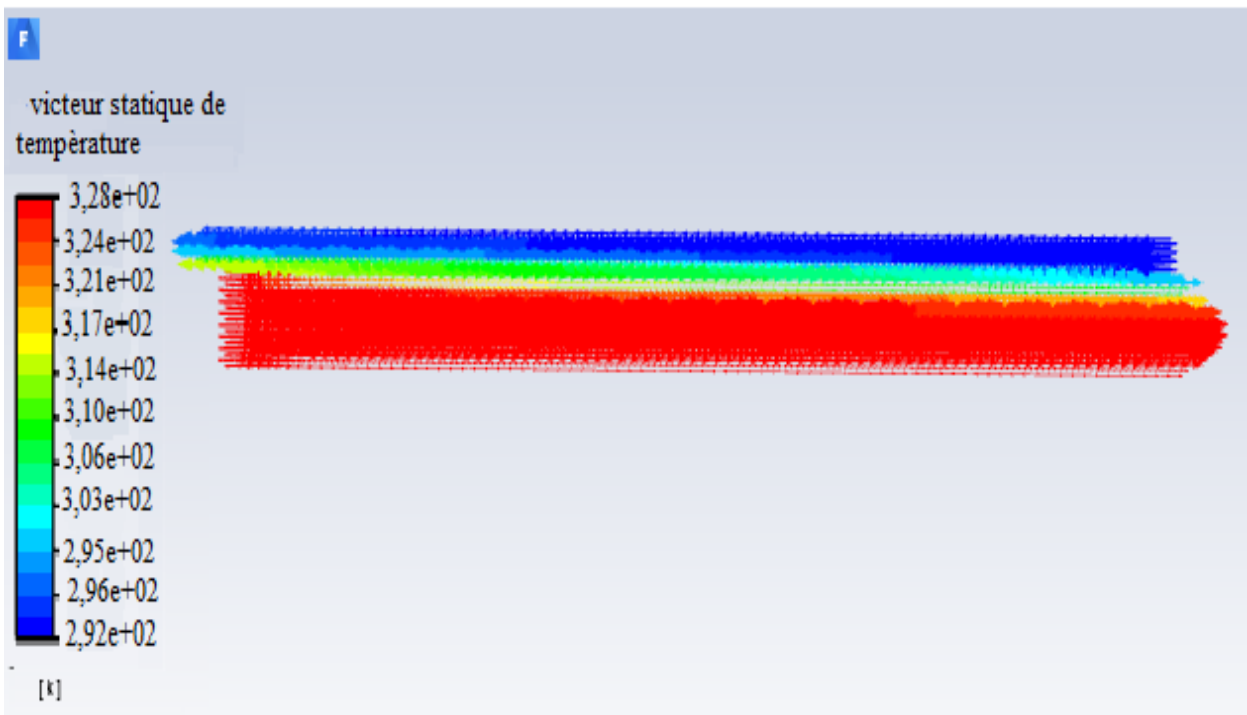


Figure 3-15: Contours de vitesse dans un échangeur contre-courant.

- Avec débit fluide froid (3) :



**Figure 3-16:** Contours de vitesse dans un échangeur co-courant.



**Figure 3-17:** Contours de vitesse dans un échangeur contre-courant.

Sur ces figures, on remarque que la vitesse des deux fluides pour chaque débit est maximale au milieu et s'affaiblit à la proximité des parois et l'évolution des températures est maximal à la proximité des parois (surface d'échange) et s'affaiblit au milieu.

### 3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié un échangeur de chaleur coaxial (co-courant et contre-courant) d'une manière analytique et numérique, Cela est nécessaire pour la compréhension du fonctionnement de ces dispositifs et l'étude des performances de ces derniers.

Nous avons examiné les températures de sortie des fluides chaud et froid pour différentes configurations de débit de fluide froid. Il est évident que le débit du fluide froid influence considérablement la température de sortie du fluide chaud, tandis qu'une diminution du débit augmente la température de sortie du fluide froid.

Les contours de température ont montré clairement l'échange de chaleur entre les fluides et la surface d'échange. L'intensité de cet échange thermique diminue lorsque le débit du fluide froid augmente.

Les contours de vitesse ont montré une distribution maximale au centre des canaux, diminuant vers les parois, ce qui influe directement sur l'évolution des températures, maximales près des parois.

Nos résultats numériques ont démontré une bonne corrélation avec les modèles théoriques pour le fluide chaud. Cependant, des écarts significatifs ont été observés pour le fluide froid, principalement en raison des pertes de chaleur avec l'environnement, des facteurs qui n'ont pas été pris en compte dans les modèles théoriques utilisés.



## **Conclusion général**

## Conclusion général

L'objectif de ce travail est d'étudier le transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur coaxial (co-courant, contre-courant) et d'apporter une amélioration à cet échange.

Le dimensionnement d'un échangeur de chaleur requiert la maîtrise de la mécanique des Fluides et les phénomènes de transferts thermiques, mais également, des logiciels de simulation numérique qui devenue un passage obligatoire dans le développement d'où le fonctionnement et lié à la circulation des Fluides, le CFD nous permet de tester plusieurs paramètres et configuration.

Dans le cas de notre travail, on à préparer la configuration géométrique du problème étudié et de générer le maillage de manière assez simple, ceci nous a permis de constaté que certains paramètres affectent sensiblement les résultats.

L'analyse des résultats obtenus nous a permis de souligner les points suivants :

- Le choix de la géométrie joue un rôle important dans la simulation car elle est un passage indispensable pour simuler une structure et pour extraire des résultats bien précis.
- L'échangeur de chaleur coaxial contre-courant est plus efficace que celui à co-courant, ceci peut être expliqué par le fait que, dans les échangeurs Co-courant la température de sortie du fluide chaud est limitée par la température de sortie du fluide froid (et vice versa), par contre en mode d'écoulement à contre-courant la température de sortie d'un fluide peut tendre vers la température d'entrée de l'autre fluide. par conséquent cette configuration est préférable pour un transfert thermique maximum
- Cette étude nous a permis de mettre en évidence les paramètres énergétiques de l'échangeur coaxial (co-courant et contre-courant), par deux méthodes : la méthode analytique et la méthode numérique, qui a donné des résultats selon la fixation du débit de fluide chaud et la variation de débit de fluide froid, et de comparer les résultats pour choisir la configuration idéal.

Enfin dans cette étude on a traité un échangeur coaxial simple qui nous a aidés à élargir nos connaissances et comprendre le fonctionnement et le choix des échangeurs, pour passe à l'application et de contribuer à l'amélioration de leur rendement dans la vie professionnel.

## References bibliographies

- [1] Kraus, Allan D. Heat—Transmission—Handbooks, manuals, etc. TJ250.B35 2003 621.402'2—dc21.
- [2] Bejan, Adrian. Heat transfer handbook / Adrian Bejan, Allan D. Kraus. ISBN 0-471-39015-1 (cloth: alk. paper).
- [3] Lekouch, Khalid. COURS DE TRANSFERTS THERMIQUES. Ecole Supérieure de Technologie d'Essaouira.
- [4] Seo Yoon Chung, Hyung Jin Sung. Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow, Part 2: Heat transfer. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24 (2003), 399–411.
- [5] Weber, Christophe, and André Magnificat. "Les échangeurs de chaleur." *Encyclopédie de l'énergie*, Article 055. En PDF.
- [6] Bennajah, Mounir, and Naïl Chaoui. Echangeur de chaleur, technologie, calcul et design.
- [7] Farid, T. Étude comportement dynamique et thermique de deux écoulements du fluide dans un échangeur de chaleur. *Mémoire de Master en Génie Energétique*, 2013.
- [8] Bianchi, Ana Maria, Yves Fautrelle, et al. *Transferts Thermiques*. Agence Universitaire de la Francophonie, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004.
- [9] Bott, T. R. ISBN: 0444821864. *Process Engineering*. April 1995. Elsevier Science & Technology Books.
- [10] Epstein, N. "Fouling In Heat Exchangers Fouling Of Heat Transfert," 1981.
- [11] Knudsen, J. G., Somerscales, E. F. C. *Equipment*. Hemisphere, Washington DC, 1975.
- [12] Bott, M. N. *Process Engineering P76*, 1975.
- [13] Somerscales, E. F. C., Knudsen, J. G. *Personal Communication*, (1), 1-4. (1977).
- [14] Nancollas, G. H., Reddy, M. M. "The Crystallization of Calcium Carbonate, Part I: Calcite Growth Mechanism," *Journal of Colloid Interface Sci* 37, 824-830, 1971.
- [15] Rodier. "L'analyse Chimique Et Physicochimique De L'eau." Editions Dunod, 1971.
- [16] Anastasios, J., Karablas. "Scale Formation in Tubular Heat Exchangers Research Priorities." *Research Institute*, 2002.
- [17] Leconte, J. "Protection Contre La Corrosion." *Techniques de L'ingénieur A830*.

- [18] Epstein, N. "Fouling: Technical Aspects In Fouling Of Heat Transfer Equipment." Somerscales Efc, Kundsen J. Hemispheres, Washington DC, 1981.
- [19] Memento. "Technique De L'eau De Degremont ET Nalco." Waters Handbook. Mac Grawn Hill Book Company.
- [20] Froment, G. F. "Fouling Of Heat Transfer Surfaces by Coke Formation in Petrochemical Reactor." Idem P 411, 1991.
- [21] Lund, D., Sandhu, N. "Chemical Reaction Fouling Due To Foods Staffs." Idem P 437, 1998.
- [22] Mostafa M. Awad Mansoura. "Fouling of Heat Transfer Surfaces." University, Faculty of Engineering, Mech. Power Eng. Dept., Egypt. p4/5.
- [23] Bennajah, M., Chaouni, N. "Echangeur de Chaleur, Technologie, Calcul et Design." Edition Techip, Paris, France, 2014.
- [24] Mathieu, J. P., Kastler, A., Fleury, P. Dictionnaire de la physique. Masson Eyrolles, 1985.
- [25] "Transfer de chaleur." CESIRE, Université de Joseph Fourier, Grenoble.
- [26] Mon, M. S., Gross, U. "Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers." International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp. 1953-1964, 2004.
- [27] JANNOT, YVES. Transfert thermique ; Ecole des minces NANCY ; 2012.

## Résumé

Les échangeurs de chaleur sont des éléments clés de l'industrie énergétique, leur domaine d'application s'étend pratiquement à toutes les usines chimiques et aux centrales thermiques. Le dimensionnement d'un échangeur de chaleur requiert une maîtrise de la mécanique des fluides et des phénomènes de transfert thermique, ainsi que l'utilisation de logiciels de simulation et de calcul scientifique.

Pour mener à bien notre projet de dimensionnement d'un échangeur de chaleur coaxial (en mode co-courant et contre-courant), il a été essentiel de maîtriser en premier lieu le logiciel CFD pour réaliser les simulations nécessaires. Ensuite, nous avons effectué une étude analytique en utilisant différentes tables thermodynamiques des fluides et des échangeurs, que nous avons comparées avec les résultats numériques afin de vérifier leur fiabilité. Cela nous a permis d'obtenir une idée précise de l'influence des différents paramètres considérés sur l'écoulement et le transfert de chaleur dans le cadre de notre projet d'étude.

## Abstract

**Heat exchangers are crucial components in the energy industry, with applications extending to virtually all chemical plants and thermal power stations. Designing a heat exchanger requires expertise in fluid mechanics, heat transfer phenomena, and the use of simulation software and scientific computing.**

**To successfully carry out our project of designing a coaxial heat exchanger (in both co-current and counter-current modes), mastering Computational Fluid Dynamics (CFD) software for necessary simulations was paramount. Subsequently, we conducted an analytical study using various thermodynamic tables of fluids and heat exchangers. These results were compared with numerical simulations to verify their reliability. This approach provided us with a precise understanding of how different parameters influence flow and heat transfer within the scope of our study project.**