

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.**

**Présenté Par :**

- 1) Melle. BEKRETI Maissa douaa
- 2) M HAMZI Mohamed el sadek

**Devant le jury composé de :**

Pr.BENSAAD Bourassia	Prof	UAT.B.B (Ain Temouchent )	Président
Mr.GUENDOUZ Bouhelal	MAA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Pr.BENZENINE Hamidou	Prof	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

*Année Universitaire 2023/2024*

# Remerciements

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

*Je remercie vivement mon encadreur le Professeur **BENZENINE Hamidou** qui a su me guider à chaque étape malgré ses obligations professionnelles, ainsi que pour son amabilité qui mérite toute l'admiration. Je désire aussi remercier les membres de jury, qui ont accepté sans réserve, de juger et d'évaluer ce travail.*

*J'adresse également mes sincères remerciements au madame **CHEREIT Rahmouna**, pour du soutien et des conseils.*

*J'adresse également un grand merci à mes parents et à ma famille qui m'ont soutenu depuis le début de mon parcours académique.*



## *Dédicace*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers à ceux qui ont fait de moi ce que je suis mes très chers parents pour qui je n'oublierai jamais leur grande affection, leur soutien et leur encouragements, tout le long de ma vie.*

*Je dédie ce travail, à mes très chers grands parents, mes sœurs et mon frère et surtout ma cousine.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes collègues de la promotion Energétique 2023/2024.*

*Bien sûr à mes chers amis.*

## ملخص

المبادلات الحرارية هي أنظمة هندسية مهمة مع مجموعة واسعة من التطبيقات. في هذه الأطروحة نقدم دراسة تجريبية مخبرية لمبادلي حراريين لهما نفس ANSYS FLUENT على المبادل الحراري مع حزمة و قشرة و دراسة عددية عن طريق برنامج الابعاد الخارجية عن طريق تعديل عدد اللفات. قمنا بدراسة تأثير معدل التدفق و درجة حرارة المدخل على الكفاءة و اجراء مقارنة على المبادلات الحرارية الثلاثة.

**الكلمات المفتاحية:** المبادل الحراري، النقل الحراري، الحلزوني، الحزمة والقشرة، طريقة الحجم المحدود

## Résumé

Les échangeurs de chaleur sont des systèmes d'ingénierie importants avec une grande variété d'applications.

Dans cette thèse, nous présentons une étude expérimentale dans laboratoire sur un échangeur de chaleur à faisceaux et calandre et une étude numérique sur logiciel ANSYS FLUENT sur deux échangeurs de chaleur à spirales avec les mêmes dimensions extérieures en modifiant le nombre de spires. Nous étudions les effets de débit et de la température d'entrée sur le rendement et faite une comparaison entre les trois échangeurs.

**Les mots clés :** Echangeur de chaleur, transfert thermique, Echangeur à tube spiralé, Echangeur à faisceau et calandre, méthode des volumes finis, Ansys Fluent.

## Abstract

Heat exchangers are important engineering systems with great variety of applications.

In this thesis, we present an experimental study on a bundle and TUBE heat exchanger and a numerical study on two spiral heat exchangers with the same external dimensions by modifying the number of turns. We study the effects of flow rate and inlet temperature on efficiency and make a comparison between the three exchangers.

**Key words:** Heat exchanger, thermal transfer, Heat exchanger spiral, Heat exchanger bundle and shell, finite volume method, Ansys Fluent.

## Sommaire:

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VII
Liste des acronymes et abréviation.....	VIII
Introduction générale.....	X
<b>Chapitre I:Généralité sur les échangeurs de chaleur .....</b>	<b>1</b>
I.1.Introduction .....	1
I.2.Principe de fonctionnement.....	1
I.3.Composition d'un échangeur de chaleur .....	2
I.4.Le rôle des échangeurs de chaleur .....	3
Fonction réfrigération.....	3
Fonction réchauffage .....	3
Fonction condensation .....	3
Fonction vaporisation .....	3
I.5.Les différents types des échangeurs de chaleur .....	3
I.5.1.Échangeurs à tubes et calandre .....	3
I.5.2.Echangeur à ailette .....	4
I.5.3.Echangeur à bloc.....	5
I.5.4.Échangeur à faisceau tubulaire horizontal .....	6
a) Echangeurs à tube en U.....	7
I.5.5.Echangeur à plaques .....	8
1) Les plaques.....	8
2) Les bâtis .....	8
3) Un joint .....	8
I.5.6.Echangeur à Colonne de Bouhy .....	9
I.5.7.Echangeur à spirales .....	9
I.6.Critères de classement des échangeurs .....	10
I.6.1.Classement de technologique .....	11
I.6.2.Classement suivant le procédé de transfert de chaleur.....	11
I.6.3.Classement suivant l'état des fluides .....	11

1.Le transfert par conduction .....	11
2.Le transfert par convection.....	12
3.Le transfert par rayonnement.....	12
I.6.5.Clasement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange .....	12
I.6.6.Clasement suivant la disposition des écoulements .....	13
1.Circulation à contre-courant.....	13
2.Circulation à co-courant .....	13
3.Circulation à courant croisé.....	13
I.6.7.Classification suivant le mécanisme de transfert de chaleur.....	14
I.6.8.Clasement suivant la compacité de l'échangeur .....	15
I.7.L'encrassement.....	16
1. Définition.....	16
2. Les différents types d'encrassement .....	17
I.8. Conclusion .....	17
Bibliographie .....	19
<b>Chapitre II : Recherche bibliographique.....</b>	<b>20</b>
II. 1. Introduction .....	20
II.2. Quelque travaux sur les échangeurs de chaleur .....	20
II-3-Conclusion .....	30
Bibliographie.....	31
<b>Chapitre III : Matériels et Méthodes.....</b>	<b>32</b>
III.1. Introduction.....	32
III.2. Grandeurs thermiques .....	32
III.2.1. Champ de température.....	32
III.2.2. Flux de chaleur.....	32
III.2.3. La chaleur .....	33
III.2.4. La chaleur spécifique .....	33
III.2.5. Conductivité thermique .....	33
III.2.6. Résistance de contact .....	33
III. 3. Grandeurs physiques .....	34
II.3.1. La densité ( $\rho$ ).....	34
III. 3.2. La viscosité ( $\mu$ ) .....	34
III.3.3. Le débit.....	34
III.3.4. Le nombre de Reynolds .....	34

<b>III.4. Modes de transfert de chaleur</b> .....	<b>35</b>
<b>III.4.1. La conduction thermique (4)</b> .....	<b>35</b>
<b>III.4.2. Convection thermique</b> .....	<b>36</b>
<b>III.5. Étude d'un échangeur</b> .....	<b>36</b>
<b>III.5.1. Coefficient global de transfert de chaleur</b> .....	<b>36</b>
<b>III.6. Hypothèses simplificatrices</b> .....	<b>36</b>
<b>III.7. Equations gouvernantes</b> .....	<b>37</b>
Equation de continuité .....	37
Equation de conservation de la quantité de mouvement .....	37
L'équation de la chaleur .....	38
<b>III.8. Méthodes numériques</b> .....	<b>39</b>
Définition .....	39
Le principe de l'élément fini.....	39
Définition.....	40
Le principe des volumes finis .....	40
Les étapes des volumes finis .....	40
<b>III.9. Présentation du logiciel ANSYS FLUENT</b> .....	<b>42</b>
<b>III.10. Présentation du problème</b> .....	<b>43</b>
<b>III.11. L'échangeur de chaleur à faisceau de tubes et calandre (TD360c)</b> .....	<b>45</b>
<b>III.11.1. Description et fonctionnement de l'échangeur de chaleur à faisceau et calandre TD360c</b> .....	<b>45</b>
<b>III.11.2. Spécifications techniques requises</b> .....	<b>45</b>
<b>III.11.3. Expérience réalisée</b> .....	<b>46</b>
<b>III.11.3.2. Changement de débit de l'eau chaude</b> .....	<b>47</b>
<b>III.11.3.3. Changement de débit de l'eau froide</b> .....	<b>48</b>
Le rendement .....	48
<b>III.12. Etude de l'échangeur à tube spirale</b> .....	<b>49</b>
Les cas étudiés .....	49
1. Le premier cas .....	49
2. Le deuxième cas.....	49
3. Le troisième cas .....	50
<b>III.13. Conditions aux limites</b> .....	<b>50</b>
<b>III.14. Conclusion</b> .....	<b>50</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>51</b>
<b>Chapitre IV : Résultats et Interprétations</b> .....	<b>52</b>
<b>IV.1. Introduction</b> .....	<b>52</b>

<b>IV.2.Présentation et discussion des résultats.....</b>	<b>52</b>
<b>IV.2.1. Effet de variations de température .....</b>	<b>53</b>
<b>IV1.2.Effet de variation de débit chaud.....</b>	<b>59</b>
<b>IV1.3.Effet de variation de débit froid .....</b>	<b>63</b>
<b>IV.2.Contour de température .....</b>	<b>66</b>
<b>Cas de variation de température d'entrée de l'eau chaude «50 °C et 60°C».....</b>	<b>66</b>
<b>Cas de variation de débit chaude.....</b>	<b>68</b>
<b>Cas de variation de débit de l'eau froide .....</b>	<b>69</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>71</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>72</b>

# Liste des Figures

---

## Chapitre I :

<b>Figure I.1</b> : Les composants d'un échangeur de chaleur. ....	2
<b>Figure I.2</b> : La matrice tournante de l'échangeur rotatif. ....	3
<b>Figure I.3</b> :Echangeur de chaleur multitubulaire à tubes et calandre.....	4
<b>Figure I.4</b> : Echangeur de chaleur multitubulaire avec tubes à ailettes. ....	5
<b>Figure I.5</b> : Schéma d'un échangeur de chaleur à bloc simple et complexe. ....	6
<b>Figure I.6</b> : Echangeur à tube en U. ....	7
<b>Figure I.7</b> : Echangeur à tête flottante.....	7
<b>Figure I.8</b> : Composition d'un échangeur à plaques. ....	8
<b>Figure I.9</b> : Echangeur à spirale. ....	10
<b>Figure I.10</b> : Les différents types de transfert de chaleur.....	12
<b>Figure I.11</b> : Circulation à contre-courant.....	13
<b>Figure I.12</b> : Circulation à co-courant.....	13
<b>Figure I.13</b> : Circulation à courant croisé.....	13

## Chapitre II :

<b>Figure II.1</b> : (a) Modèle simplifié du passage de calandre d'un échangeur de chaleur à tube circulaire enroulé ; (b) Modèle global d'échangeur de chaleur à tube circulaire enroulé en spirale continue (3) .....	20
<b>Figure II.2</b> : (a) Modèle global d'échangeur de chaleur à tubes ondulés enroulés en spirale continue ; (b) Modèle géométrique de tubes ondulés enroulés en spirale. (3) .....	20
<b>Figure II.3</b> : Schéma de la géométrie de l'échangeur de chaleur et du système de coordonnées.....	21
<b>Figure II.4</b> : Les deux configurations d'échangeurs de chaleur étudiés par Huang et al (5) .....	22
<b>Figure II.5</b> : Structures de l'écoulement générées par un générateur trapézoïdal (6) .....	23
<b>Figure II.6</b> : Problème considéré par Zhang (7) .....	23
<b>Figure II.7</b> : Condenseur à tubes et calandre (8) .....	24
<b>Figure II.8</b> :Arrangement de faisceaux de tubes pour les motifs (a) triangulaires (STHE_T), (b) triangulaires tournés (STHE_RT) et (c) combinés (STHE_C) (9) .....	25
<b>Figure II.9</b> : Géométrie d'un échangeur tubulaire à double tube (10).....	25
<b>Figure II.10</b> : Vue en coupe de l'échangeur de chaleur étudié (11).....	26
<b>Figure II.11</b> : Divers constituants d'un échangeur à faisceau et calandre (12).....	27

## Liste des Figures

---

<b>Figure II.12:</b> Cas de géométrie simple (13) .....	28
<b>Figure II.13:</b> Cas de géométrie avec chicanes (13) .....	28
<b>Figure II.14 :</b> Cas de géométrie ondulée (13) .....	28

### Chapitre III :

<b>Figure III.1:</b> Etapes de méthodes des volumes finis (12).....	39
<b>Figure III.2:</b> Description d'un volume élémentaire de base (12).....	40
<b>Figure III.3:</b> Interface de logiciel ANSYS Workbench.....	41
<b>Figure III.4:</b> Géométrie d'un échangeur à tube spiralé .....	43
<b>Figure III.5 :</b> Echangeur à faisceau et calandre.....	45
<b>Figure III.6:</b> Expérience sur l'échangeur de chaleur à faisceau.....	47
<b>Figure III.7 :</b> Echangeur de chaleur à tube spiralé de 15 tours.....	48
<b>Figure III.8 :</b> Echangeur de chaleur à tube spiralé de 25 tours.....	49

### Chapitre IV :

<b>Figure IV.1 :</b> Variation de température d'entrée et de sortie coté chaud et froid en fonction de distance pour les trois types d'échangeurs pour une température d'entrée de.....	53
<b>Figure IV.2 :</b> Ecart de température du centre de tuyauterie chaude en fonction de la distance (température dans chaque spire) pour une température d'entrée de (a) : 50°C et (b) :60°C.....	55
<b>Figure IV.3 :</b> Ecart de température coté chaud ( $\Delta T_c$ ) pour les trois types d'échangeurs en fonction de température d'entrée.....	56
<b>Figure IV.4:</b> Rendement en fonction de température d'entrée de l'eau chaude pour les trois types d'échangeurs.....	57
<b>Figure IV.5 :</b> Variation de température d'entrée et de sortie coté chaud et froid en fonction de distance pour les trois échangeurs pour un débit (a) : 2 et 50°C et (b) : 2 et 60°C .....	59
<b>Figure IV.6 :</b> Ecart de température coté chaud ( $\Delta T_c$ ) pour les trois types d'échangeurs en fonction de température d'entrée.....	60
<b>Figure IV.7 :</b> Rendement en fonction de température d'entrée de l'eau chaude.....	61
<b>Figure IV.8 :</b> Variation de température d'entrée et de sortie coté chaud et froid en fonction de distance pour les trois échangeurs pour un débit de l'eau froid de (a) :2 et 50°C et (b) : 2 et 60°C.....	63

## Liste des Figures

---

<b>Figure IV.9</b> : Ecart de température coté chaud ( $\Delta T_c$ ) pour les trois types d'échangeurs en fonction de température d'entrée. ....	63
<b>Figure IV.10</b> : Rendement en fonction de température d'entrée de l'eau chaude. ....	64
<b>Figure IV.11</b> : Contour de température à droite à gauche (a) : cas 1 et (b) : cas 2.....	65
<b>Figure IV.12</b> : Contour à droite, 25 tours et à gauche, 15 tours, (a) : cas 1 et (b) : cas 2...	67
<b>Figure IV.13</b> : Contours de températures des fluides le long de l'échangeur, à droite, 25 tours et à gauche, 15 tours, (a) :cas 1 et (b) :cas 2 .....	68

# Liste des Tableaux

---

## Chapitre I :

<b>Tableau I.1 :</b> Les avantages et les inconvénients et les utilisations d'Echangeur à ailettes .	5
<b>Tableau I.2 :</b> Les avantages et les inconvénients et les utilisations d'Echangeur à bloc simple et complexe.....	6
<b>Tableau I.3 :</b> Les avantages et les inconvénients et les utilisations d'Echangeur à faisceau tubulaire horizontal .....	6
<b>Tableau I.4 :</b> Les avantages et les inconvénients et les utilisations d'Echangeur à spirale	10
<b>Tableau I.5 :</b> Les modes de circulation des fluides.....	14
<b>Tableau I.6 :</b> Les applications et les matériels et les caractéristiques principales d'Echangeur de chaleur.....	15

## Chapitre III :

<b>Tableau III.1 :</b> Dimension d'un échangeur de chaleur à tube spiralé .....	43
---	----

## Chapitre IV :

<b>Tableau IV.1:</b> Récapitulatif des données d'entrées et de sorties pour les trois types d'échangeurs et pour une température d'entrée de (a) : 50°C et (b) : 60°C	53
<b>Tableau IV.2 :</b> Récapitulatif des données d'entrées et de sorties pour les trois types d'échangeurs et pour un débit d'entrée coté chaud de (a) : 2 et 50°C et (b) : 2 et 60°C .....	58
<b>Tableau IV.3 :</b> Récapitulatif des données d'entrées et de sorties pour les trois types d'échangeurs et pour un débit d'entrée coté froid de (a) : 2 et 50°C et (b) : 2 et 60°C .....	62

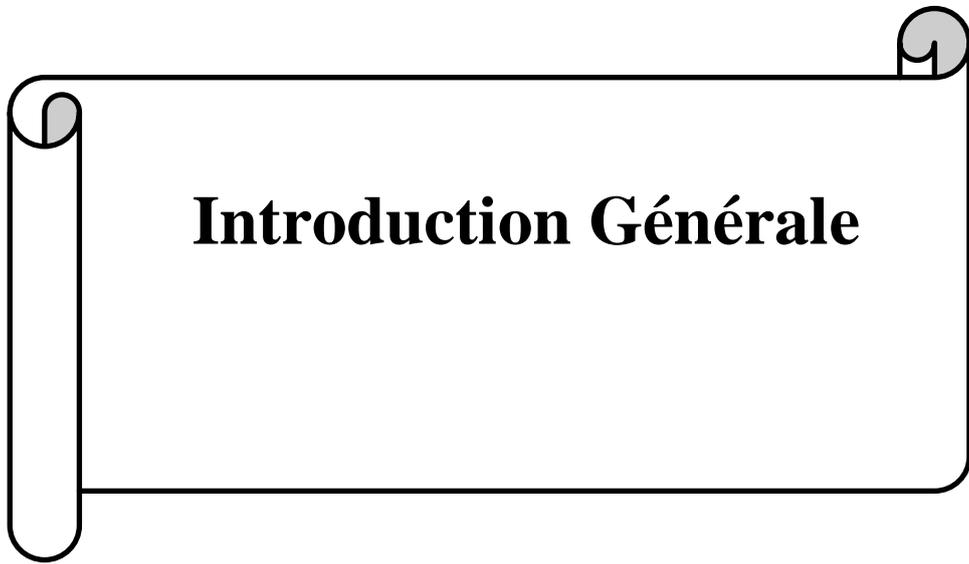
## Liste des acronymes et abréviation

$R_e$	Nombre de Reynolds	[-]
T	Température	[°C]
$T_C$	Température de l'eau chaude	[°C]
$T_f$	Température de l'eau froide	[°C]
$Q_C$	Débit de l'eau chaude	[L/min]
$Q_f$	Débit de l'eau froide	[L/min]
$\eta$	Le rendement	[L/min]
L	Longueur	[m]
$\mu$	Viscosité dynamique	[N.s/m <sup>2</sup> ]
v	Vitesse du fluide suivant l'axe Y	[m/s]
U	Vitesse du fluide suivant l'axe X	[m/s]
W	Vitesse du fluide suivant l'axe Z	[m/s]
A	surface	[mm <sup>2</sup> ]
$C_{min}$	La différence entre les températures chaude au froide	[°C]
$C_{max}$	La différence entre les températures chaude au froide	[°C]
$Q_{réel}$	Le flux de chaleur réel	[w]
$Q_{max}$	Le flux de chaleur max	[w]
$\Delta T$	La différence de température	[°C]
D	Diamètre	[mm]
$d_i$	diamètre intérieur de tube spiralé	[mm]
$D_i$	diamètre extérieur de tube spiralé	[mm]
$d_f$	diamètre d'entrée de fluide froid	[mm]
b	la longueur de pas entre les cycles	[mm]
$N_t$	nombre de tour	[-]
$\rho$	La masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
P	Pression	[Pa]
t	Le temps	[s]
m	La masse	[kg]
$h_c$	le coefficient d'échange thermique	[W/m <sup>2</sup> .K°]
h	La hauteur	[mm]
$\phi$	Coefficient global de transfert de chaleur	[W]
$C_p$	Capacité thermique	[J/K°]
$d_i$	Le diamètre intérieur de tube spiralé	[mm]

## Liste des acronymes et abréviation

---

Di	Le diamètre extérieur de tube spiralé	[mm]
df	Le diamètre d'entrée de fluide froid	[mm]
Do	Le diamètre de coque	[mm]
b	La longueur de pas entre les cycles	[mm]
Nt	Le nombre de tour	[-]



# Introduction Générale

---

## Introduction

Dans le domaine de l'ingénierie thermique et énergétique, les échangeurs de chaleur sont des composants vitaux et importants pour le transfert efficace de chaleur entre deux fluides à des températures différentes (transmettre la chaleur d'une source chaude à une autre source de plus faible température).

Il existe plusieurs types d'échangeurs de chaleur, tels que, l'échangeur de chaleur à tubes et calandre, l'échangeur de chaleur à tube spiralé, etc... Avec une grande diversité géométrique.

L'échangeur de chaleur à tube spiralé est un échangeur de chaleur utilisé pour transférer la chaleur entre deux fluides. Dans ce type d'échangeur, les tubes à travers lesquels d'écoulent les fluides sont enroulés en forme de spirale.

L'étude de cet appareil est complexe et nécessite une connaissance précise de sa géométrie (surface d'échange et section de passage des fluides). Ses caractéristiques thermo physique, les vitesses d'écoulement des fluides, les températures d'entrée des fluides, etc...

Vue l'importance de l'amélioration du transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur, cette étude est consacrée à une simulation numérique d'un échangeur de chaleur à tube spiralé. L'objectif principal de cette étude est l'optimisation des performances d'un échangeur de chaleur à tube spiralé, cela se fait en changeant la température d'entrée de fluide chaude, le nombre de pas entre les spires et les débits.

Le manuscrit de mémoire est structuré en quatre chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre donne un aperçu sur l'échangeur de chaleur notamment leur principe de fonctionnement, leur classement technologique. Un exposé sur ses différents types, de leurs applications et composition a été également présenté.

Le deuxième chapitre consiste à effectuer une recherche bibliographique sur les échangeurs de chaleur.

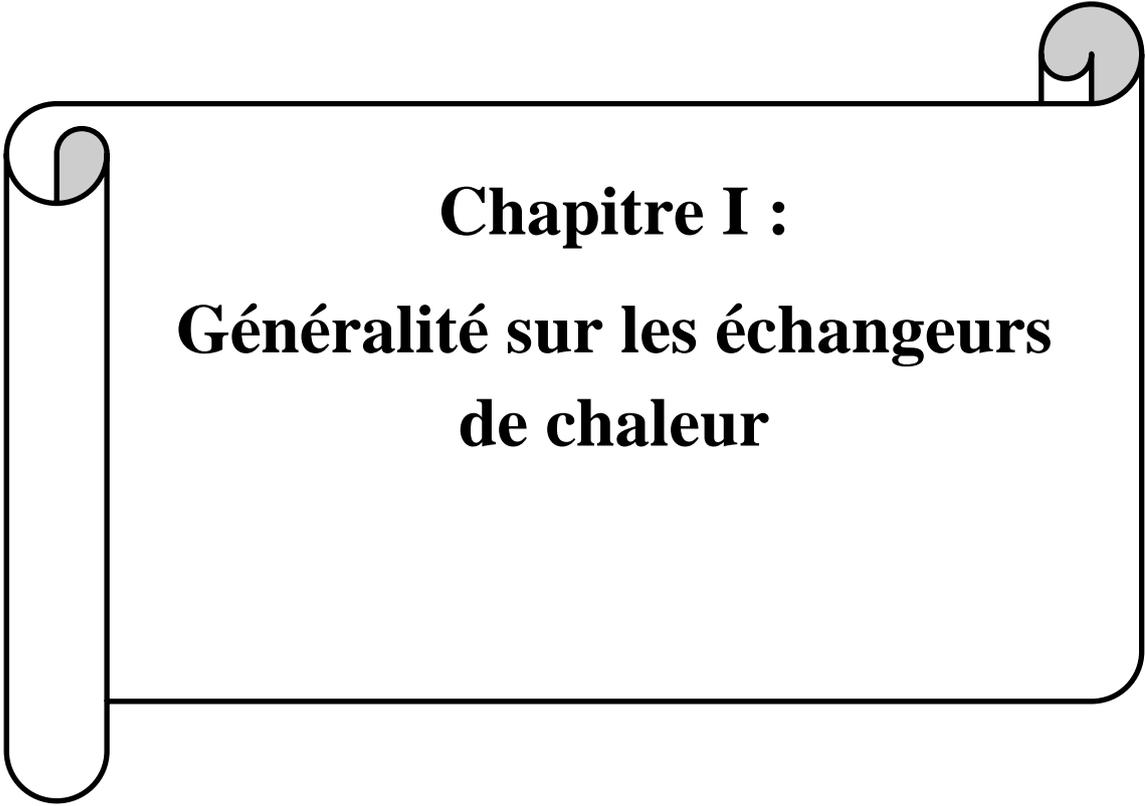
Le troisième chapitre présente les modèles physiques étudiés, les équations générales qui les régissent et la manière dont ces équations sont résolues à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT Workbench. Le protocole d'expérience mené sur un banc d'essai TD360 a été également présenté

# Introduction Générale

---

Le quatrième chapitre aborde les interprétations et les résultats de la simulation numérique obtenus grâce à AnsysWorkbench pour l'échangeur de chaleur à tube spiralé ainsi que les résultats tirés des expériences sur l'échangeur à faisceau et calandre.

Des courbes analysées et commentées ont été utilisées pour présenter les résultats obtenus et finaliser ce travail par une conclusion générale et perspective.



**Chapitre I :**  
**Généralité sur les échangeurs  
de chaleur**

## I.1.Introduction

Un échangeur de chaleur est un dispositif très utilisé dans l'industrie destiné à transmettre la chaleur d'un fluide à un autre, il est indispensable dans toute maîtrise de l'énergie. Ils sont utilisés dans différentes applications telles que les chauffages, la climatisation, le stockage d'énergie, le refroidissement, ... Etc.

Il existe plusieurs types d'échangeurs et cela selon des critères de classement. Dans les échangeurs les plus courants, les deux fluides sont séparés par une paroi dans laquelle les échanges se font par conduction. La transmission fluide-paroi relève essentiellement de la convection. Dans ce chapitre nous allons aborder les différents types d'échangeurs d'une manière détaillée toutes les relations concernant les calculs dans les échangeurs que ce soit à contre ou à Co- courant ou bien à courant croisé.

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), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés. (1)

## I.2.Principe de fonctionnement

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

# Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

uniquement de la surface, mais aussi des températures d'entrée, des caractéristiques thermiques (chaleur spécifique, conductivité thermique) et des coefficients d'échange par convection. (2), (3)

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

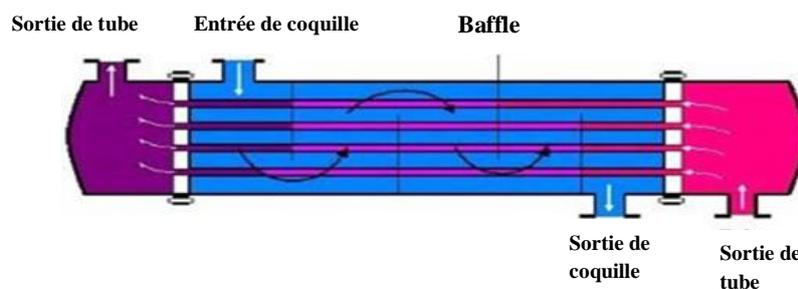
- Echange de chaleur les la conduction.
- Echange de chaleur entre les parois et les fluides : la convection.
- Echange radiatif entre les parois et les fluides souvent négligeable : le rayonnement. Il existe aussi trois modes d'écoulement dans les échangeurs de chaleur :

- Co-courant : écoulement parallèle des fluides et dans la même direction.
- Contre-courant : écoulement parallèle des fluides mais dans des directions inverses.
- Courants croisés : écoulement perpendiculaire entre les deux fluides.

## I.3.Composition d'un échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est constitué d'éléments d'échange de chaleur (Figure I.1) tels que:

- ✓ un noyau ou une matrice contenant la surface de transfert de chaleur.
- ✓ les éléments de distribution de fluides comme les en-têtes ou les réservoirs, les busesou les tuyaux d'entrée et de sortie...etc.



**Figure I.1** : Les composants d'un échangeur de chaleur.

Habituellement, il n'y a pas de pièces mobiles dans l'échangeur de chaleur, mais il y a des exceptions, comme le récupérateur rotatif (Figure I.2) dans lequel la matrice est entraînée en rotation à une vitesse déterminée.

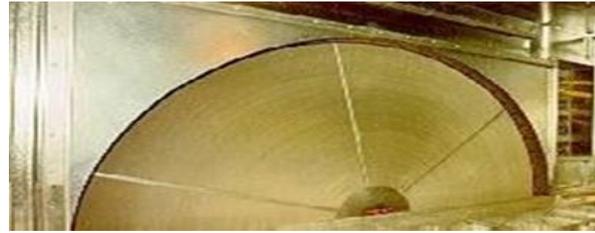
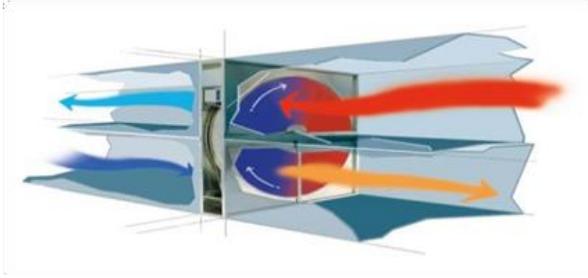


Figure I.2 : La matrice tournante de l'échangeur rotatif.

## I.4. Le rôle des échangeurs de chaleur

### ✓ Fonction réfrigération

Dans le cas d'un Réfrigérant il refroidit un liquide ou un gaz par circulation d'un fluide auxiliaire, généralement de l'eau. (4)

### ✓ Fonction réchauffage

Réchauffeur veut dire qu'il réchauffe également un fluide de procédé mais le terme s'emploie surtout pour désigner l'appareil qui réchauffe un produit stocké généralement pour assurer sa comptabilité.

### ✓ Fonction condensation

1. Condenseur : il assure la condensation totale ou partielle de vapeur par circulation d'eau ou d'un fluide de procédé suffisamment froid.
2. Aérocondenseur : il a la même fonction que le précédent en utilisant l'air comme fluide froid.
3. Subcooler : il assure simultanément la condensation de vapeur et le refroidissement généralement des condensats par circulation d'eau.

### ✓ Fonction vaporisation

Dans ce type, il assure la vaporisation totale ou partielle d'un liquide de procédé, l'apport de chaleur étant fait par la vapeur d'eau ou un fluide chaud de procédé éventuellement en condensation.

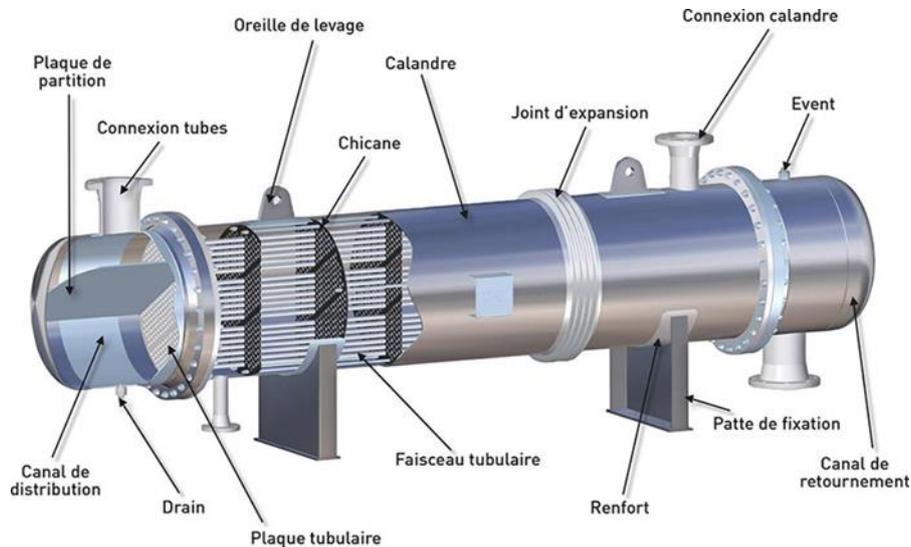
## I.5. Les différents types des échangeurs de chaleur

On a plusieurs types des échangeurs mais le plus importants sont :

### I.5.1. Échangeurs à tubes et calandre

# Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

Ce sont les échangeurs le plus répandus dans l'industrie, pour faire un premier choix les deux paramètres principaux sont l'encrassement et l'écart de températures entre les deux fluides. (5)

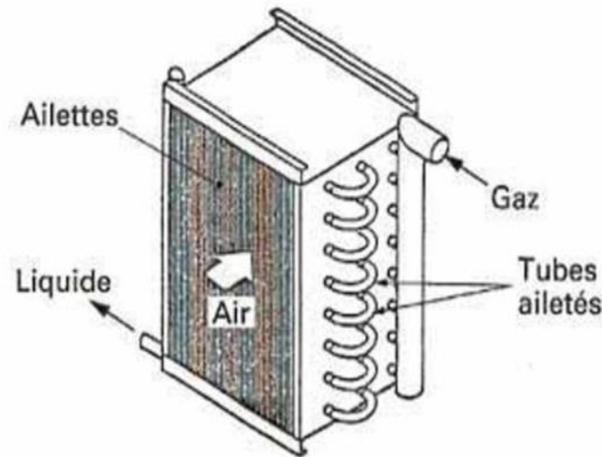


**Figure I.3:**Échangeur de chaleur multitubulaire à tubes et calandre.

## I.5.2.Échangeur à ailette

Un échangeur à ailettes est un échangeur relativement simple : il consiste en un conduit cylindrique ou rectangulaire sur lequel sont fixées des lames métalliques de différentes formes. Le fluide de refroidissement est en général l'air ambiant. La chaleur est transférée du fluide chaud circulant dans le conduit principal aux lames métalliques par conduction thermique ; ces lames se refroidissent au contact de l'air.

Ce type d'échangeur est utilisé pour le chauffage dans les bâtiments : de l'eau est chauffée dans l'installation de chauffage et circule dans des radiateurs qui sont des échangeurs à ailettes. On utilise également ce type d'installation pour refroidir les moteurs de voiture ou encore les moteurs en tout genre. (6)



**Figure I.4:** Echangeur de chaleur multitubulaire avec tubes à ailettes.

**Tableau I.1 :** Les avantages et les inconvénients et les utilisations d'Echangeur à ailettes

Avantages	Inconvénients	Utilisations
Bon rendement	Crain les chocs	eau/air
Peut prendre des formes précises		huile/air
		solide/air

### I.5.3. Echangeur à bloc

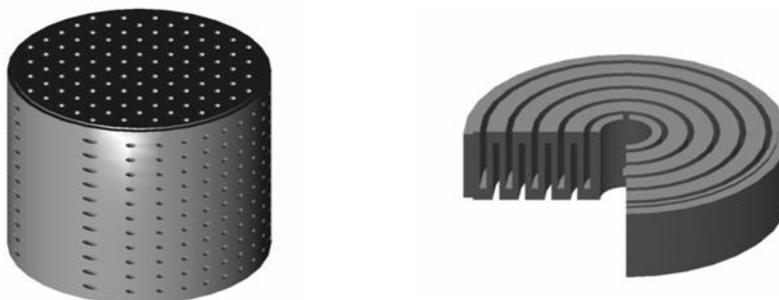
L'échangeur à bloc est un type d'échangeur de chaleur réservé à des applications particulières. Il consiste en un bloc d'une matière thermiquement conductrice percé de multiples canaux dans lesquels circulent les fluides. Le bloc est le plus souvent composé de graphite additionné parfois de polymères pour améliorer les propriétés mécaniques de l'échangeur. Le bloc est placé dans une structure qui assure la distribution des liquides dans les canaux.

Le bloc peut avoir différentes formes : cylindrique ou cubique. Il peut encore être composé d'un seul bloc ou de plusieurs parties empilées de manière à permettre les fluides de passer d'une partie à l'autre. L'intérêt de ce type d'échangeur de chaleur est principalement sa résistance chimique aux liquides corrosifs ainsi que sa capacité modulaire : le bloc peut facilement être remplacé en cas de fuites.

Le prix est relativement élevé par rapport aux autres types d'échangeurs et le transfert de chaleur est en général moyen : l'épaisseur de la paroi d'échange est plus grande que pour

## Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

une surface d'échange en métal pour cause de fragilité, ce qui augmente la résistance au transfert. (7)



**Figure I.5 :** Schéma d'un échangeur de chaleur à bloc simple et complexe.

**Tableau I.2 :** Les avantages et les inconvénients et les utilisations d'Echangeur à bloc simple et complexe

Avantages	Inconvénients	Utilisations
Bonne résistance chimique.	Sensible aux grands écarts de T.	Vapeur/eau.
Inertie.	Sensible aux chocs.	Eau/eau.
Peu de pertes thermiques.	Coefficients de transfert moyen.	Eau surchauffée/eau.
Modulable.	Prix.	Liquides corrosifs.

### I.5.4.Échangeur à faisceau tubulaire horizontal

Comme leur nom l'indique, les échangeurs tubulaires sont constitués de tubes dont la paroi forme la surface d'échange. Ils comportent soit un tube unique deux tubes coaxiaux (échangeurs bitubes), soit un faisceau de tubes enfermé dans une enveloppe appelée calandre (7) .

**Tableau I.3 :** Les avantages et les inconvénients et les utilisations d'Echangeur à faisceau tubulaire horizontal

# Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

Avantages	Inconvénients	Utilisations
Résiste aux fortes pressions	Contraintes sur les tubes	
Pour toutes les puissances	Difficulté nettoyage	Eau/eau
Economique	(multitube)	Vapeur/eau
Accepte des grands écarts de température	Sensible aux vibrations	Huile/eau
Peut être utilisé en condensation partielle		Eau
		Surchauffée/eau

a) **Echangeurs à tube en U** : l'utilisation de tubes coudés supprime une tubulaire (7).

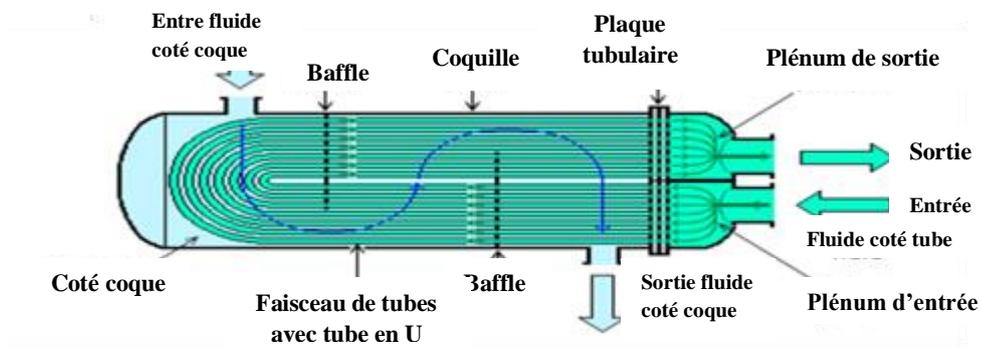


Figure I.6 : Echangeur à tube en U.

b) **Les échangeurs à tête flottante** : l'une des plaques tubulaires est fixe. (7)

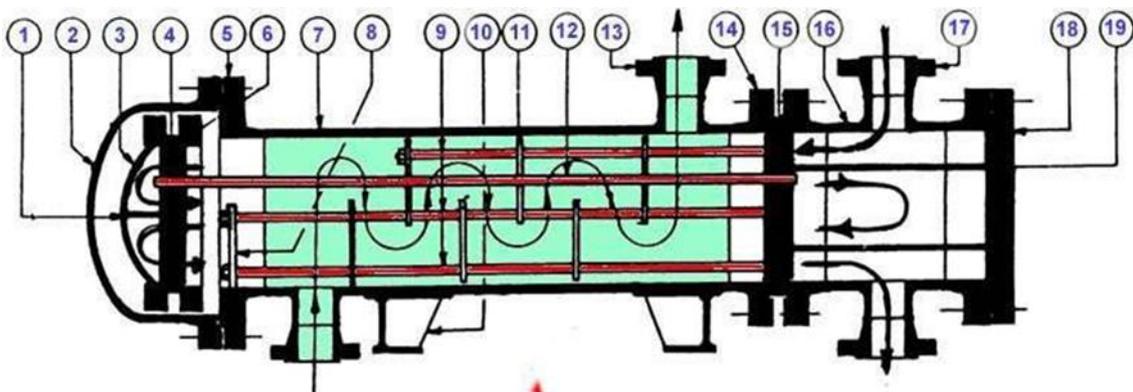


Figure I.7 : Echangeur à tête flottante.

- 1. Cloison de couvercle de tête flottante
- 11. Chicane

## Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

---

- |                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 2. Couvercle calandre             | 12. Tube de faisceau                |
| 3. Couvercle tête flottante       | 13. Piquage sur calandre            |
| 4. Plaque flottante               | 14. Bride calandre                  |
| 5. Bride calandre                 | 15. Plaque fixe                     |
| 6. Contre bride de tête flottante | 16. Boite distribution              |
| 7. Calandre                       | 17. Piquage sur boite distribution  |
| 8. Plaque support                 | 18. Couvercle de boite distribution |
| 9. Entretoises et tirants         | 19. Plaque partage sur boite        |
| 10. Support de l'appareil         |                                     |

### I.5.5. Echangeur à plaques

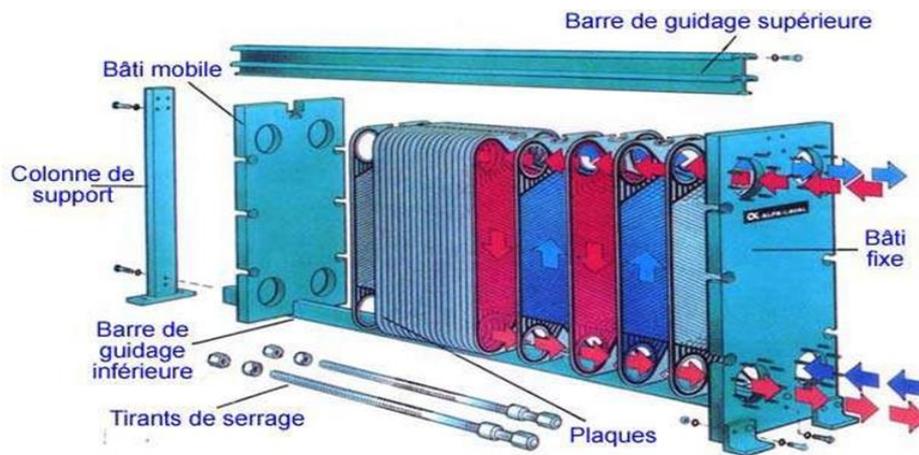
L'échangeur à plaque est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie et dans le génie climatique. Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de mille-feuille et séparées les unes des autres d'un espace de quelques millimètres où circulent les fluides. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de l'ensemble d'éviter

les fuites, tant entre les deux fluides que vers l'extérieur. (8)

Il est constitué de :

- 1) **Les plaques** : sont serrées entre un bâti fixe et un bâti mobile. Elles sont positionnées et guidées par deux barres support inférieur et supérieur.
- 2) **Les bâtis** : maintiennent les plaques serrées au moyen de tirants. Les deux barres guides sont-elles mêmes supportées par un pied support.
- 3) **Un joint** : par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par les deux plaques.

Le raccordement des fluides s'effectue généralement sur le bâti fixe de l'appareil. L'emboutissage des plaques en chevrons ou en cannelures (industries alimentaires) favorise la turbulence des fluides et assure une bonne tenue à la pression.



**Figure I.8** : Composition d'un échangeur à plaques.

## I.5.6. Echangeur à Colonne de Bouhy

Excellente alternative aux échangeurs à plaques dans les sècheurs d'air comprimé, la colonne de Bouhy est en fait un échangeur à tête d'épingle auquel a été ajouté un séparateur air/eau centrifuge dans la partie inférieure. Le dispositif dispose de deux échangeurs coaxiaux, le premier servant à amener l'air en dessous de son point de rosée, le second servant à la fois à ramener l'air à une température convenant à son utilisation et surtout à augmenter l'efficacité du refroidissement. Ce type d'échangeur se caractérise par une très faible perte de charge. (9)

## I.5.7. Echangeur à spirales

Un échangeur à spirales consiste en deux plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale pour former une paire de canaux en spirale. Le diamètre de l'échangeur est relativement grand, la surface d'échange maximale atteignant environ  $450 \text{ m}^2$  pour un diamètre de 3 m (10), ce qui le place dans la catégorie des échangeurs non compacts. L'échange de chaleur n'est pas aussi bon que celui de l'échangeur à plaques, car la surface d'échange ne possède pas en règle générale de profil, mais pour une même capacité d'échange, un échangeur spiral nécessite 20 % de moins de surface d'échange qu'un échangeur à faisceau tubulaire. (10)

Il est utilisable pour les liquides visqueux ou pour les mélanges liquide-solide et possède une capacité autonettoyante garantissant un encrassement réduit par rapport à l'échangeur à faisceau tubulaire. Il ne peut travailler que sous des différences de températures et de pression limitées.

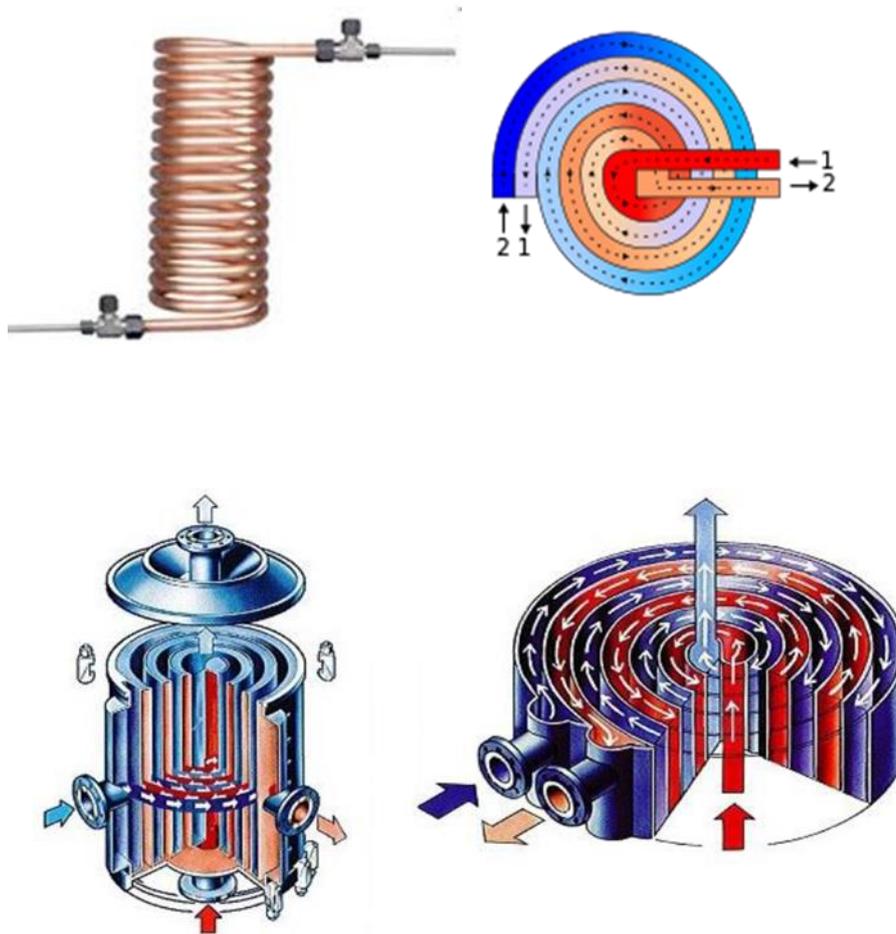


Figure I.9 : Echangeur à spirale.

Tableau I.4 : Les avantages et les inconvénients et les utilisations d'Echangeur à spirale

Avantages	Inconvénients	Utilisations
Grande surface de contact		
Large passage	Non démontable	Eau/eau
Encombrement réduit	Ecarts de Température	Vapeur/eau
Excellent condenseur	limités	Eau surchauffée/eau
Autonettoyant		

## I.6.Critères de classement des échangeurs

# Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

---

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux :

## I.6.1. Classement de technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- ✚ à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
- ✚ à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;
- ✚ autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

## I.6.2. Classement suivant le procédé de transfert de chaleur

Suivant qu'il y ait ou non stockage de chaleur, on définit le fonctionnement en récupérateur pour le transfert sans stockage ou le fonctionnement en régénérateur pour le transfert avec stockage (11).

-Transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec deux ou n passages et un écoulement en général continu ;

-Transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique.

## I.6.3. Classement suivant l'état des fluides

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 présente un changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;

les deux fluides présentent un changement de phase, cas des évapo-condenseurs.

Il existe trois modes de transfert de chaleur conduction, convection et rayonnement. (11)

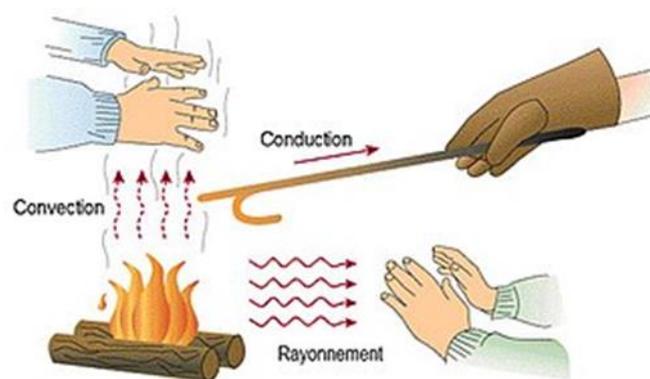
**1. Le transfert par conduction :** est un échange d'énergie avec contact. Dans un gaz ou un liquide, l'énergie se propage par contact direct entre molécules au gré des chocs aléatoires à l'échelle microscopique. Dans les solides, la conduction thermique est assurée par les électrons de conduction et les phonons. La conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse. Cette loi dite de Fourier établit que la densité de flux de chaleur est proportionnelle au

# Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

gradient de température. Au contraire, une paroi adiabatique, comme une bouteille thermos, s'oppose au transfert de chaleur. (12)

**2.Le transfert par convection :** Ce transfert d'énergie s'accompagne de mouvement de molécules dans un liquide ou un gaz. La convection naturelle ou libre évoque un échange de chaleur responsable du mouvement. C'est le transfert thermique qui provoque le mouvement. Un radiateur électrique sans ventilateur ni soufflerie va naturellement par exemple diffuser de l'air chaud. On parle au contraire de convection forcée lorsqu'un système mécanique entraîne les molécules vers le système chauffant. Le mouvement facilite alors le transfert thermique, comme lorsque l'on souffle sur un liquide chaud dans sa tasse. C'est ce même principe qui s'observe dans les radiateurs à circulation d'eau ou d'air. (12)

**3.Le transfert par rayonnement :** Le transfert se fait par rayonnement électromagnétique comme l'infrarouge peut se réaliser dans le vide sans la présence de matière. Le rayonnement du soleil dans l'espace en est l'exemple caractéristique. Le corps récepteur réfléchit alors certaines longueurs d'ondes. Ce sont uniquement ces longueurs d'onde absorbées qui contribuent à son équilibre thermique. Si le récepteur est un corps noir, il absorbera l'ensemble des rayonnements électromagnétiques, sans en réfléchir ni en transmettre, alors l'ensemble des rayonnements contribueront à son équilibre thermique. Mais le corps noir est un objet parfait, qui n'existe pas dans la réalité. Il sert uniquement de base aux physiciens. (12)



**Figure I.10** : Les différents types de transfert de chaleur.

## I.6.5. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

Il existe deux types de paroi:

- Les échangeurs métalliques en : acier, cuivre, aluminium, superalliages, métaux ou alliages réfractaires.
- Les échangeurs non métalliques en : plastique, céramique, graphite ET verre.

## I.6.6. Classement suivant la disposition des écoulements

**1. Circulation à contre-courant :** Dans ce cas, les deux fluides circulent dans un sens opposé, de chaque côté de la paroi comme la figure ci-dessous

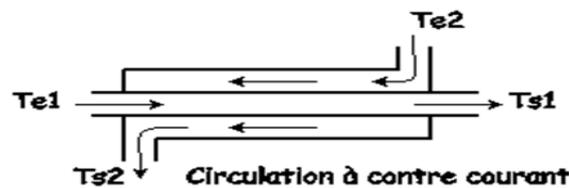


Figure I.11: Circulation à contre-courant.

**2. Circulation à co-courant :** Dans ce cas, les deux fluides circulent dans le même sens, de chaque côté de la paroi, comme la figure en dessous

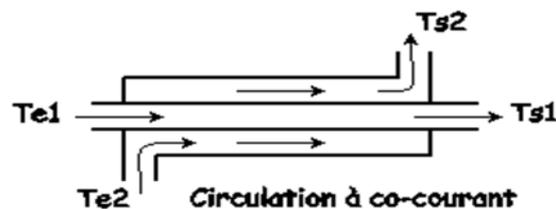
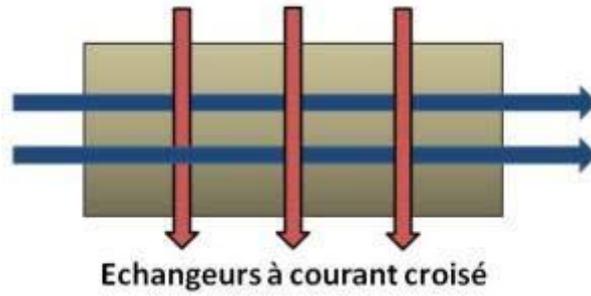


Figure I.12 : Circulation à co-courant.

**3. Circulation à courant croisé :** L'écoulement des deux fluides se fait dans deux directions perpendiculaires.



**Figure I.13** : Circulation à courant croisé.

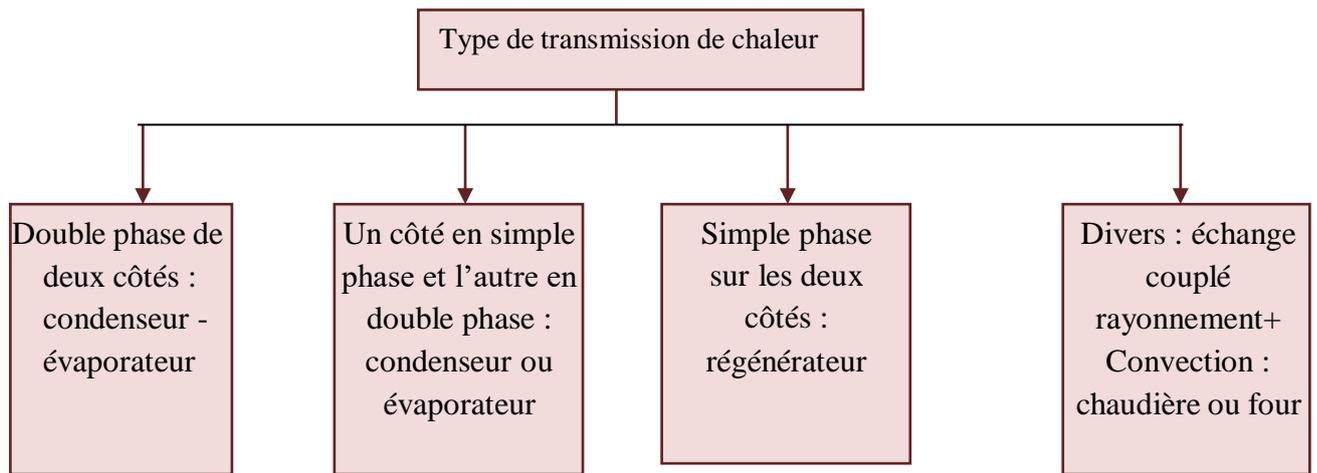
**Tableau I.5** : Les modes de circulation des fluides.

courants croisés	Co-courant	Contre-courant

## I.6.7. Classification suivant le mécanisme de transfert de chaleur (13)

Le schéma suivant exprime les différents mécanismes de transfert de chaleur.

# Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur



## I.6.8. Classement suivant la compacité de l'échangeur

La compacité est le rapport entre la surface d'échange et le volume de l'échangeur (11).

Un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à  $700\text{m}^2/\text{m}^3$ .

**Tableau I.6 :** Les applications et les matériels et les caractéristiques principales d'Echangeur de chaleur

APPLICATION	MATERIEL ADAPTE	CARACTERISTIQUES PRINCIPALES
Géothermie	Plaques	-Récupérations élevées -Très bonne tenue des matériaux -Extensions
Effluents Industriels	Plaques Lamelles Spirales	-Très bonne tenue des matériaux -Extensions - Maintenance réduite
Purges de Chaudières	Plaques Lamelles Multitubulaires Spirale	-Récupérations élevées  -Faible encombrement
Pompes à chaleur	Plaques	-Récupérations élevées
Luminaires Climatisation	Plaques Plaques	-Récupérations élevées -Récupérations élevées
Thalasso- thérapie	Plaques	-Faible encombrement -Tenue à l'eau de mer

## Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

Centrales	Plaques	-Récupérations élevées -Très bonne récupération
Calogènes		-Extensions aisées
Refroidissement	Plaques	-Extensions aisées
Eaux thermales		-Maintenance réduite
Energie solaire	Plaques	-Très bonne récupération
		-Extensions aisées
Energie solaire	Lamelles	-Très bonne récupération
Concentration	Spirales	-Faible encombrement
Rejets de bacs	Plaques	-Très bonne récupération
Industries textiles	Spirales	- Faible encombrement

### I.7.L'encrassement

#### 1.Définition

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables ou de substances non désirées sur une interface, affecte un grand nombre d'opérations industrielles.

Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus Biologiques, des produits d'une réaction chimique. (14)

Il est très important de considérer ce phénomène d'encrassement pour être en mesure de choisir un échangeur thermique qui ait les dimensions appropriées, car l'encrassement peut réduire considérablement la capacité de transmission de chaleur et d'augmenter la chute de pression. Un nettoyage et un entretien périodiques sont requis. Comme l'encrassement et les difficultés de maintenance augmentent avec le temps, les nettoyages doivent être fréquents.

Il est souvent important de prévoir certains types de cloisons qui filtrent les impuretés de fluides caloporteurs avant son admission dans l'échangeur afin de réduire les risques d'encrassement.

Il a été démontré au cours des longues années passées dans la recherche de moyens de lutte contre l'encrassement, que ce dernier était lié aux conditions opératoires, aux propriétés

# Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

---

physico-chimiques des fluides mis en jeu, à la géométrie du système ainsi qu'à la nature des surfaces. La connaissance de l'origine du phénomène est un facteur déterminant pour répondre aux variations de ces paramètres. (14)

Les inconvénients économiques de l'encrassement sont attribués à :

- De grosses pertes d'énergie provoquées par l'inefficacité thermique.
- Le coût élevé de maintenance pendant la période de nettoyage des échangeurs.
- De grosses pertes de production durant la période d'arrêt pour le nettoyage. (15)

## 2. Les différents types d'encrassement

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt « régime d'écoulement », selon les conditions d'utilisation des équipements d'échange thermique Il existe six grands types d'encrassement différents : (16) , (17).

- Encrassement par corrosion.
- Encrassement biologique.
- Encrassement par réaction chimique.
- Encrassement par précipitation (entartrage).
- Encrassement particulaire.
- Encrassement par solidification.

## I.8. Conclusion

Les échangeurs de chaleur sont principalement employés dans les domaines de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le domaine résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). La sélection d'un échangeur de chaleur pour une application spécifique est influencée par divers paramètres tels que la température et la pression des fluides, leurs caractéristiques physiques et leur agressivité, ainsi que leur entretien et leur encombrement. Il est clair que le fait d'avoir un échangeur bien conçu et bien dimensionné est essentiel. Une

## Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

---

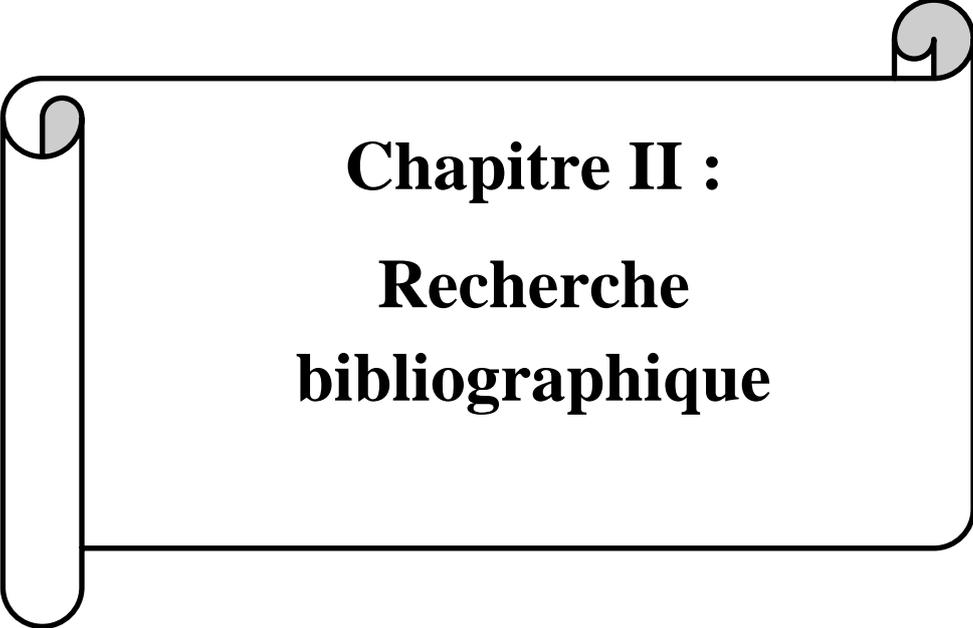
réalisation et une utilisation adéquates permettent d'améliorer le rendement et l'efficacité des procédés.

# Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur

---

## Bibliographies

1. **A.L, W.M Keys and.** Compact Heat Exchangers 3rd Ed. [Online] 1984.
2. *Encyclopédie de l'énergie les échangeurs de chaleur* . **Magnificat, Weber Christophe et.** 055,
3. **CHAOUNI, MOUNIR BENNAJAH et NAOIL.** Livre Echangeur de chaleur, technologie, calcul et design.
4. **André, Weber Christophe Et Magnificat.** Echangeurs De chaleur Journal De Greth 055, (P3-17). [Online] Février 2016.
5. **J.F.SACADURA.univ-tlemcen.** S.Sall, Introduction gongtiongransfertsthermiques. [Online] 2014.
6. *Echangeurs De Chaleur-Description, Journal De Technique De L'ingénieur.* **Patrice Clément, Nadia Caney, Philippe Marty, Philippe Bandelier, Zoé Minvielle, Claude Roussel, Jean Antoine Gruss,.** Be9516, (P 1-27), Janvier 2014.
7. **www.motaindustrialcooling.com.** Echangeurs tubulaires standards( huile, eau, air, carburant...)de MOTA [ archive]? voir " Fiabilité". [Online] 17septembre 2020.
8. **Cedrati, J.F.SACADURA A. Mekhnache. R.** Les, Les ti, Les Leserts thermiques;. [Online] 2006.
9. Technique de L'ingénieur, traité génie énergétique volume[BE5]. [Online]
10. **Ramesh K. Shah 1, Alfred C. Mueller,.** Heat Exchange in Ullmann's, Encyclopedia of Industrial Chemistry, DOI: 10.1002/14356007. b03\_02, Wiley-VCH. [Online] juin 2000. [Cited: ]
11. Technique de l'ingénieur: échangeur de chaleur;Description En PDF. [Online]
12. **Benayad, N.** Etude et optimisation des échangeurs de chaleur.Thèse de Magistere. Université Mentouri Consyantine. [Online] 2008.
13. **Bougriou, C.** "Calcul et technologie des échangeurs de chaleur " Note de cour Université de Batna, pp. C76-110. [Online] 2000.
14. **Stephan, H. D. Baehr and.** -Heat and Mass transferl, 2nd revised edition, Springer Verlag editor. [Online] 2006.
15. *Les échangeurs de chaleur.* **WEBER Christophe et MAGNIFICAT André.** 055,
16. **N, Epstein.** Fouling In Heat Exchangers Foiling Of Heat Tranfert. [Online] 1981.
17. **Bott. M. N, B.** Process Engineering P76. [Online] 1975.



**Chapitre II :**  
**Recherche**  
**bibliographique**

### II. 1. Introduction

Un échangeur de chaleur comme son nom l'indique, est un appareil servant à transmettre la chaleur d'un fluide à un autre. Dans les échangeurs les plus courants les deux fluides sont séparés par une paroi à travers de laquelle les échanges se font par conduction. La transmission de chaleur fluide-paroi relevant essentiellement de la convection. Dans certains appareils, l'échange de chaleur est associé à un changement de phase de l'un des deux fluides, c'est le cas des condenseurs, et des évaporateurs (1)

L'utilisation de surfaces d'échange ou d'échangeurs de chaleur est le meilleur moyen de transmettre la chaleur entre deux ou plusieurs fluides sans risquer de détériorer leurs propriétés par mélange. Depuis plusieurs années, de nombreuses recherches ont été menées sur les échanges de chaleur dans le but principal d'améliorer leurs performances.

L'objectif de ce chapitre est d'enquêter sur leurs caractéristiques, leurs performances et les méthodes et outils utilisés pour améliorer ces performances.

### II.2. Quelques travaux sur les échangeurs de chaleur

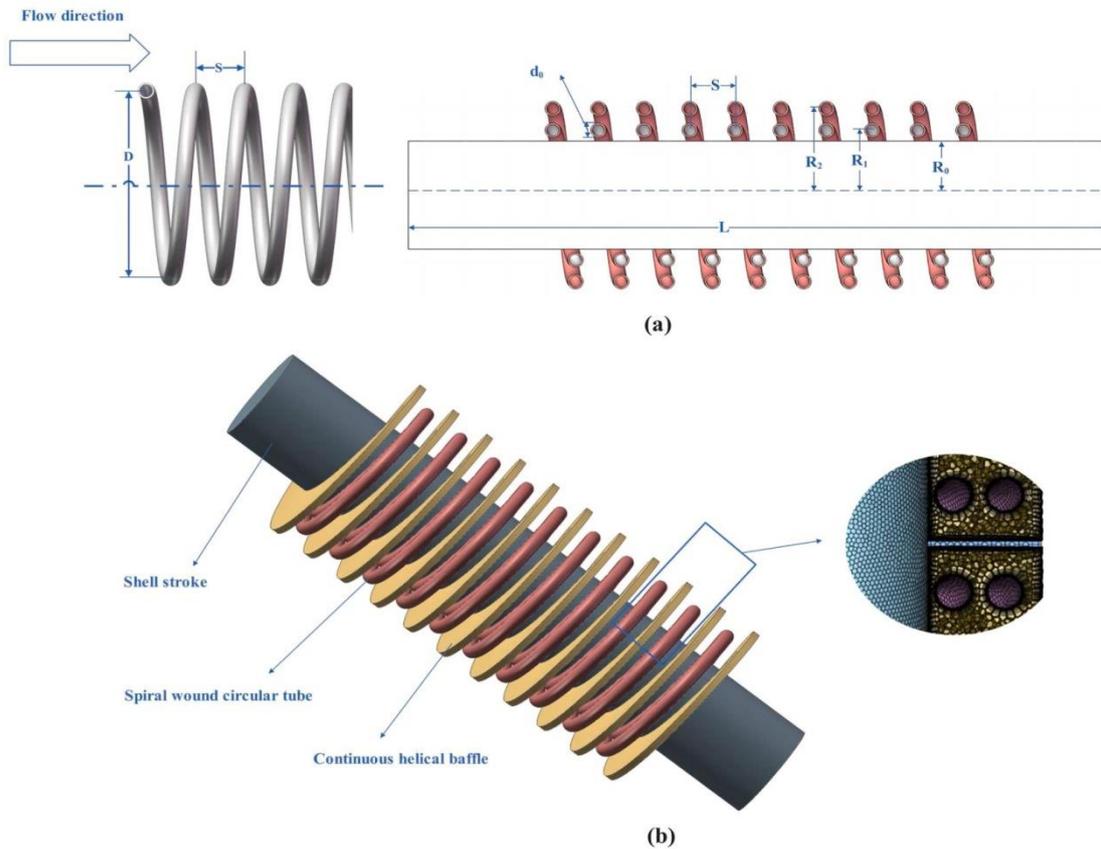
**Zuritz, en 1989** a développé un ensemble d'équations analytiques pour un échangeur de chaleur à trois tubes. Les débits massique, les températures d'entrée des fluides et les coefficients de transfert de chaleur sont des paramètres d'entrées requis pour les calculs de température. L'étude a révélé des équations permettant des calculs d'une manière indépendante par rapport aux fluides utilisés. Elles permettent également d'avoir les températures des fluides à n'importe quel emplacement axial le long de l'échangeur de chaleur. Ces équations sont valables pour les configurations à co-courant et à contre-courant.

L'étude a montré aussi que la création d'une région annulaire dans le tube interne augmente l'efficacité globale du transfert de chaleur et réduit de 25 % la longueur nécessaire pour l'échangeur thermique. (2)

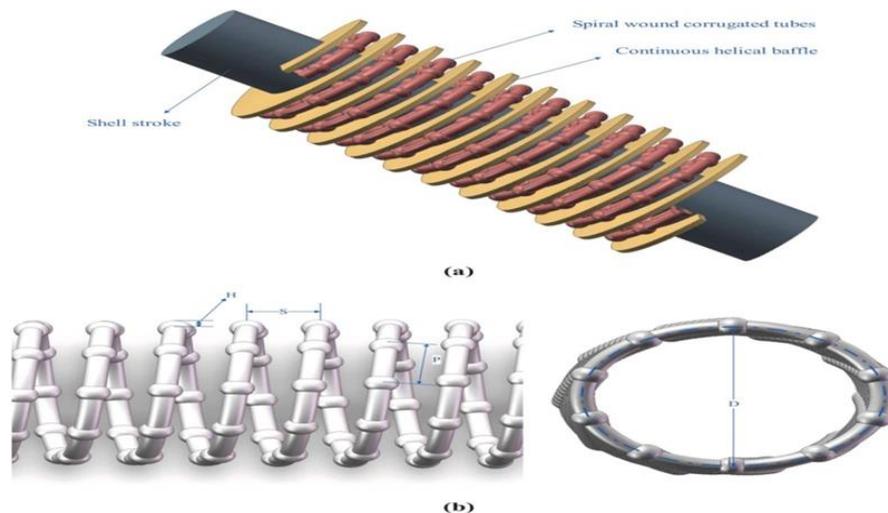
**En 2004, Wang et al** ont proposé une nouvelle étude traitant les échangeurs de chaleur munis d'une structure de déflecteur ondulés continue dans des tubes enroulés en spirale . Grâce à des procédures expérimentales et de simulation numérique, cette étude a examiné le champ de l'écoulement et les caractéristiques de transfert thermique au sein de la coque, les auteurs ont découvert que l'augmentation de la vitesse d'entrée sur le passage de la

## Chapitre II : Recherche bibliographique

coque entraîne à la fois, une baisse de la température du liquide, une réduction du segment à basse température et une augmentation de la résistance dans le conduit de chaleur. (3)



**Figure II.1:** (a) Modèle simplifié du passage de calandre d'un échangeur de chaleur à tube circulaire enroulé ; (b) Modèle global d'échangeur de chaleur à tube circulaire enroulé en spirale continue (3)



**Figure II.2 (a) :** Modèle global d'échangeur de chaleur à tubes ondulés enroulés en spirale continue ; (b) Modèle géométrique de tubes ondulés enroulés en spirale. (3)

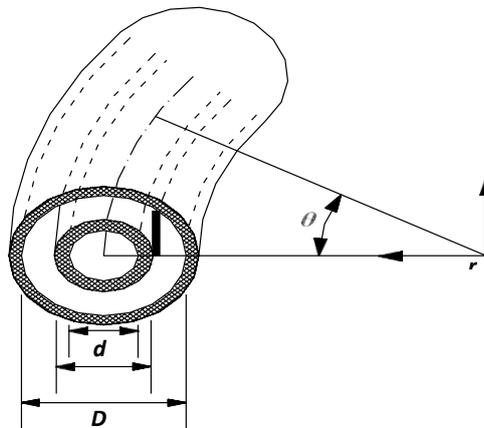
Grâce à cette étude, il a été conclu que les échangeurs de chaleur à tubes ondulés à enroulement continu en spirale surpassent leurs homologues à tubes circulaires dans les

## Chapitre II : Recherche bibliographique

mêmes conditions, opérationnelles. La température à la sortie du passage de coque est de 364,684 K à 336,009 K, environ 8 K au-dessus de celle de l'échangeur de chaleur à tube circulaire enroulé en spirale continue, avec une vitesse d'écoulement de passage de coque de 1 m/s à 20 m/s.

De même, dans les échangeurs de chaleur à tubes circulaires à enroulement continu, dans les mêmes conditions de travail, une diminution du pas ondulé ( $P$ ) entraîne une augmentation de 30 à 55 % du coefficient de frottement ( $f$ ), une augmentation de 10 à 40 % de  $Nu$ , et une amélioration globale de 7 à 21 % des performances de transfert de chaleur.

Un échangeur de chaleur hélicoïdal à double tube a été modélisé numériquement par **TIMOTHY et al. (2006)** ; pour les caractéristiques d'écoulement de fluide laminaire et de transfert de chaleur sous différents débits de fluide et tailles de tubes. Les coefficients globaux de transfert de chaleur ont été calculés pour le flux parallèle et le contre-courant et pour deux diamètres de tubes différents. La validation des simulations a été réalisée en comparant les nombres de Nusselt dans le tube avec ceux trouvés dans la littérature. (4)



**Figure II.3:** Schéma de la géométrie de l'échangeur de chaleur et du système de coordonnées.

Les résultats obtenus par ces simulations étaient dans limites portées par des résultats de la littérature sur les bobines hélicoïdales. Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de doyens intérieurs entraîne une augmentation des coefficients de transfert de chaleur globaux ; cependant, les conditions d'écoulement dans l'anneau ont eu un impact plus important sur le coefficient de transfert de chaleur global. Les résistances thermiques de l'anneau, de la chambre à air et de la bobine ont été calculées. La résistance thermique totale était principalement dominée par l'anneau, ce qui suggère que la conception

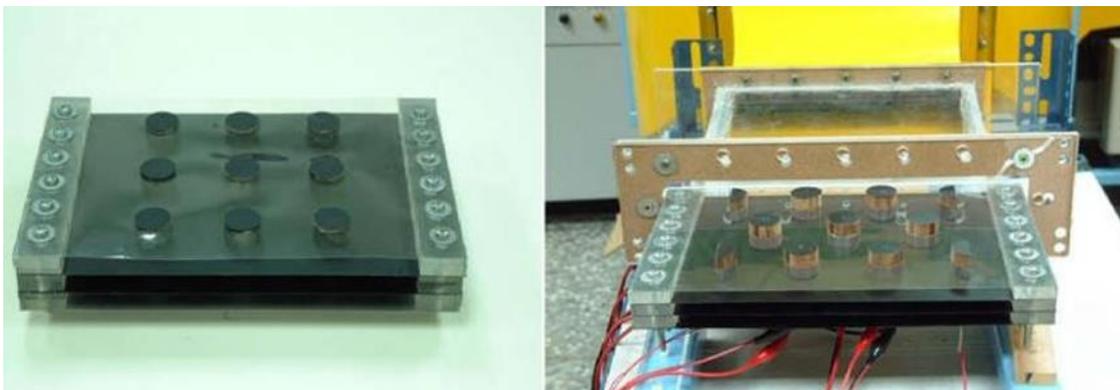
## Chapitre II : Recherche bibliographique

---

d'échangeurs de chaleur hélicoïdaux à double tube devrait accorder la plus grande attention à ce domaine. Augmente efficacement l'efficacité du transfert de chaleur dans son ensemble. De plus, l'augmentation de la taille de la chambre à air et entraîne une résistance thermique inférieure dans l'anneau, mais la résistance thermique de la chambre à air a été assez constante.

**Huang et al** en **2009** ont présenté des simulations numériques en 3D pour résoudre le problème inverse des conditions aux frontières. Ils appliquent la méthode de plus forte pente SDM (steepest descent method) et un code de calcul universel CFX4.4 pour estimer les coefficients de transfert convectif locaux dans un échangeur de chaleur de tubes à ailettes planes. Dans leurs études, ils ont examiné les arrangements en ligne et en quinconce et avec le régime stationnaire et transitoire d'écoulement. La distribution des températures sur les surfaces d'ailettes a été prise expérimentalement par la thermographie infrarouge.

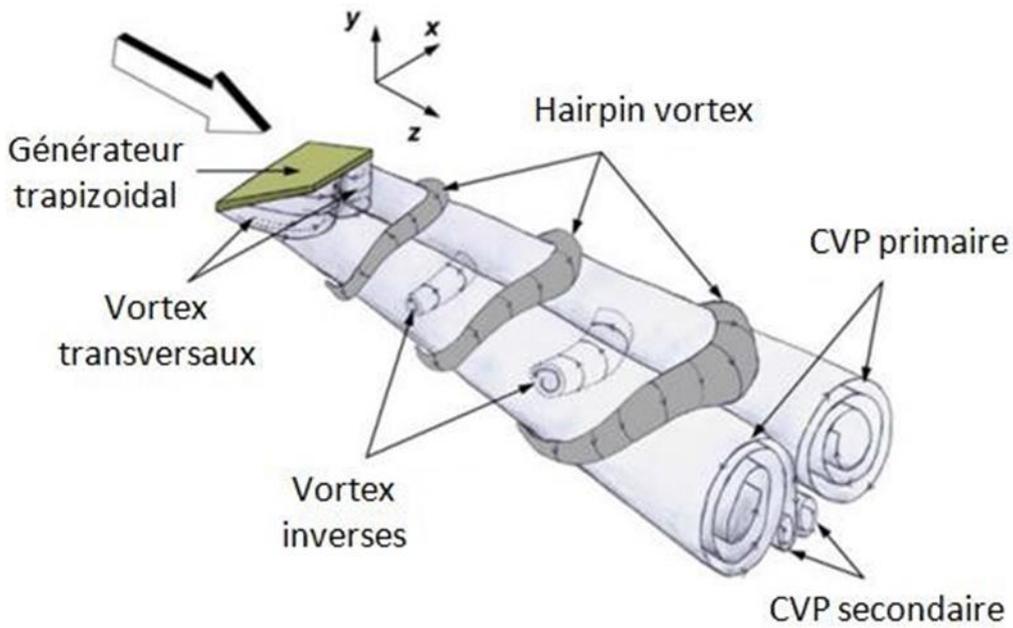
Les résultats de cette étude indiquent que le coefficient de transfert thermique moyen pour les tubes en quinconce est environ 8-13 % supérieur à celui pour les tubes en ligne. (5)



**Figure II.4:** Les deux configurations d'échangeurs de chaleur étudiés par Huang et al (5)

**Kaci et al ;2010**, ont analysé comment on peut générer des structures d'écoulement tourbillonnaires par l'insertion des inserts sur les parois d'un tube cylindrique. Le but de ce travail est d'étudier les effets globaux de ces vortex sur le transfert de chaleur à partir d'un mur de tube maintenu à une température constante d'un échangeur de chaleur à épingles.

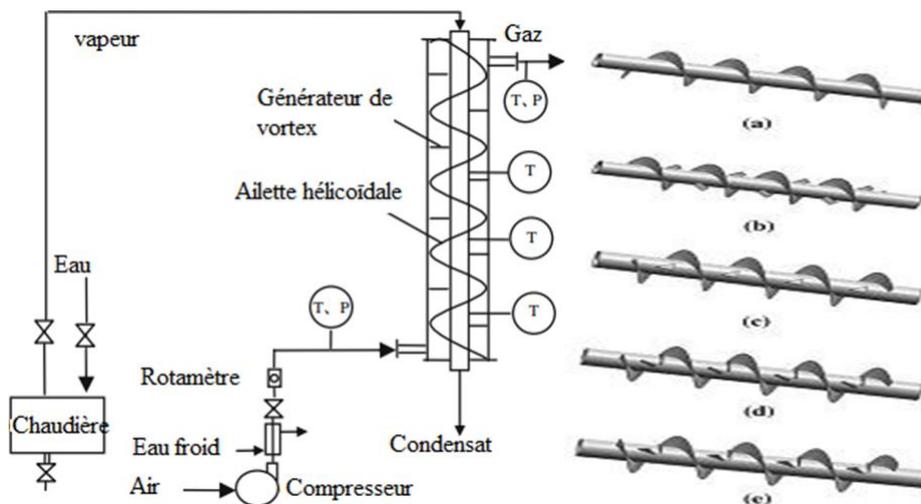
En résultat, Le taux de transfert thermique s'intensifie principalement grâce aux paires de vortex longitudinales contrarotatives, qui transportent la chaleur dans la direction radiale de l'écoulement, comme le démontrent les résultats numériques obtenus. (6)



**Figure II.5 :** Structures de l'écoulement générées par un générateur trapézoïdal (6)

**Zhang et al. (2012)**, travaillé expérimentalement sur l'amélioration du transfert de chaleur, dans un échangeur de chaleur coaxial combiné avec des ailettes hélicoïdale et des obstacles pour la génération des tourbillons (**Figure II.6**).

Selon les résultats de l'expérience, il est démontré que les ailettes hélicoïdales et les obstacles jouent un rôle crucial dans l'amélioration du transfert thermique. Par ailleurs, le transfert de chaleur augmente lorsqu'il y a des obstacles triangulaires et rectangulaires par rapport à l'état naturel. (7)

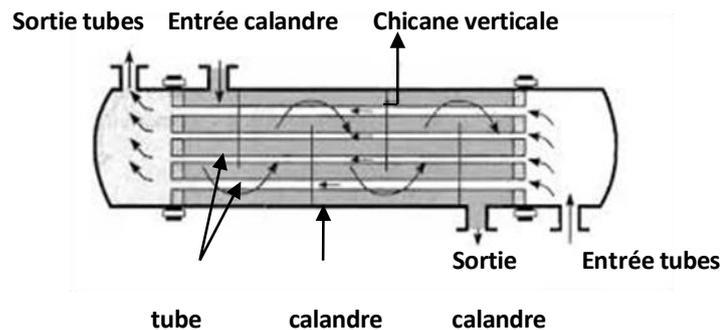


**Figure II.6 :** Problème considéré par Zhang (7)

## Chapitre II : Recherche bibliographique

**S.SALAOUATCHI et al.** en 2015 ont fait un travail pour but d'élaboration d'un programme de calcul des performances d'un échangeur de type tube-calandre.

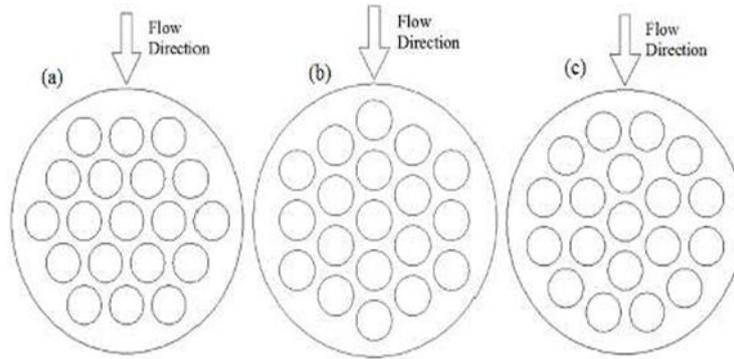
Selon le programme fortran et basé sur le modèle de Bell-Delaware, un programme a été développé pour calculer les performances d'un condenseur disposé verticalement où la condensation a lieu à l'intérieur de la calandre a été élaboré (8)



**Figure II.7 :** Condenseur à tubes et calandre (8)

Après avoir collaboré avec cette approche développée, les résultats obtenus ont été confrontés à ceux présents dans la littérature. Dans cette optique, il est possible d'adapter facilement le programme à la configuration horizontale du condenseur à condition de mettre en place une corrélation pour le coefficient d'échange de chaleur en condensation à l'extérieur des tubes.

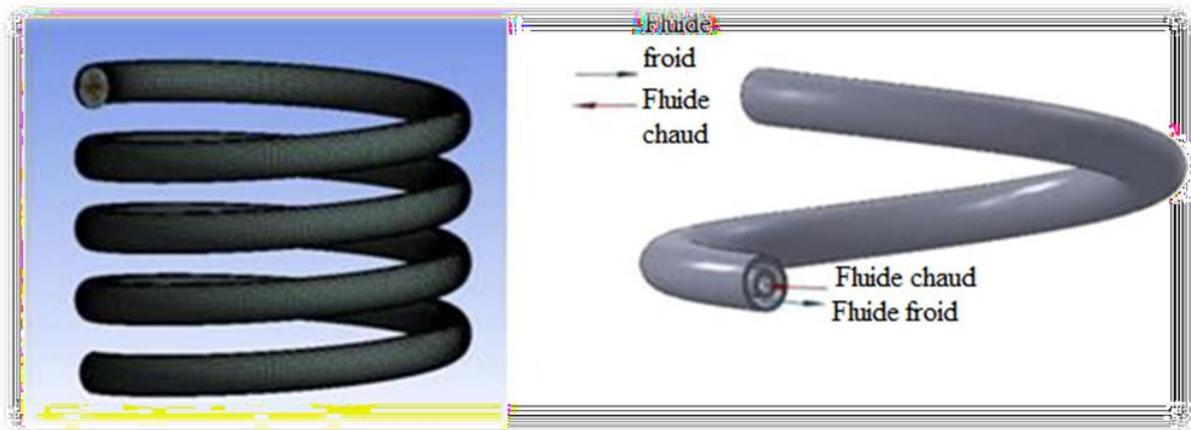
**En 2016, Moses Omolayo Petinrin et al.** ont réalisé une analyse numérique sur les performances hydrauliques et thermiques de trois ensembles d'échangeurs de chaleur à tube et calandre avec différentes variations géométriques de disposition des tubes. : Triangulaires (30°, STHE\_T), triangulaires tournés (60°, STHE\_RT) et combinés (STHE\_C).simulation montrent que STHE\_T a des performances supérieures et constantes en fonction du nombre de Reynolds. Dans la région où le nombre de Reynolds est inférieur à 10000, les facteurs de performance de STHE\_RT et STHE\_C diminuent fortement mais cette tendance s'est ralentie dans la région du nombre de Reynolds supérieur à 10000. Dans la région de chute de pression inférieure, le coefficient de transfert de chaleur global augmente à un rythme plus rapide que l'augmentation observée dans la région de chute de pression supérieure. Pour la même perte de charge le STHE\_T donne un coefficient de transfert de chaleur plus élevé, suivi de STHE\_RT et STHE\_RT. (9)



**Figure II.8:** Arrangement de faisceaux de tubes pour les motifs (a) triangulaires (STHE\_T), (b) triangulaires tournés (STHE\_RT) et (c) combinés (STHE\_C) (9)

L'optimisation d'un échangeur de chaleur tubulaire à double tubes (**Figure II.9**) a été étudiée numériquement par **Kareem en 2016**. Les simulations numériques sont effectuées pour trouver quelle est la forme de la section transversale et de la tuyauterie (bobine hélicoïdale ou tube droit) permettant d'obtenir une bonne performance thermique.

Le transfert de chaleur est plus élevé dans le cas de la section transversale rectangulaire, comme le démontrent les résultats. Par ailleurs, le débit thermique dans la bobine hélicoïdale est deux fois plus élevé que dans le tube droit. La bobine hélicoïdale présentait un facteur de frottement supérieur à celui du tube droit.



**Figure II.9:** Géométrie d'un échangeur tubulaire à double tube (10)

L'étude de **N. Boultif et all. en 2017**, consiste sur l'étude de l'évolution et la distribution de la température dans un échangeur à deux tubes coaxiaux en régime permanent (état stationnaire). Un schéma unidimensionnel de différences finies a été utilisé pour analyser la distribution de température et de pression dans cet échangeur de chaleur. Les propriétés thermo physiques des fluides utilisées varient avec la température de long de l'échangeur. La conduction thermique axiale dans les parois et le transfert convectif à travers les interfaces

## Chapitre II : Recherche bibliographique

sont pris en compte. Les fluides transitant dans l'échangeur sont monophasiques. Le programme développé analyse la circulation des fluides en deux modes : à Co-courant( anti-méthodique) et à contre-courant ( méthodique).

Le coefficient d'échange global  $K$  a une forte variation pendant le premier intervalle du temps en régime transitoire et prends graduellement l'allure de celle du régime permanent après ce temps. Malgré l'utilisation des fluides incompressibles, les pertes de charge varient dans cet intervalle du temps, c'est-à-dire : variation appréciable de la masse volumique en fonction de la température. Au-delà de cet intervalle, les pertes de charge ne sont plus fonction du temps, elles dépendent uniquement de la longueur. (11)

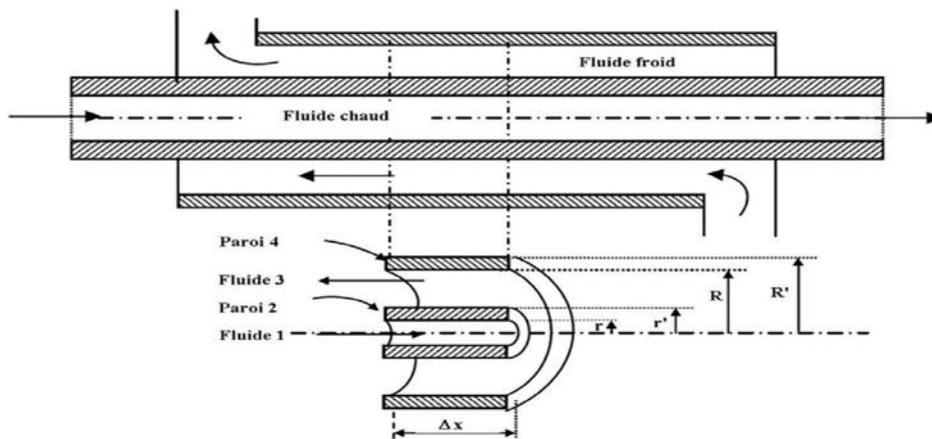


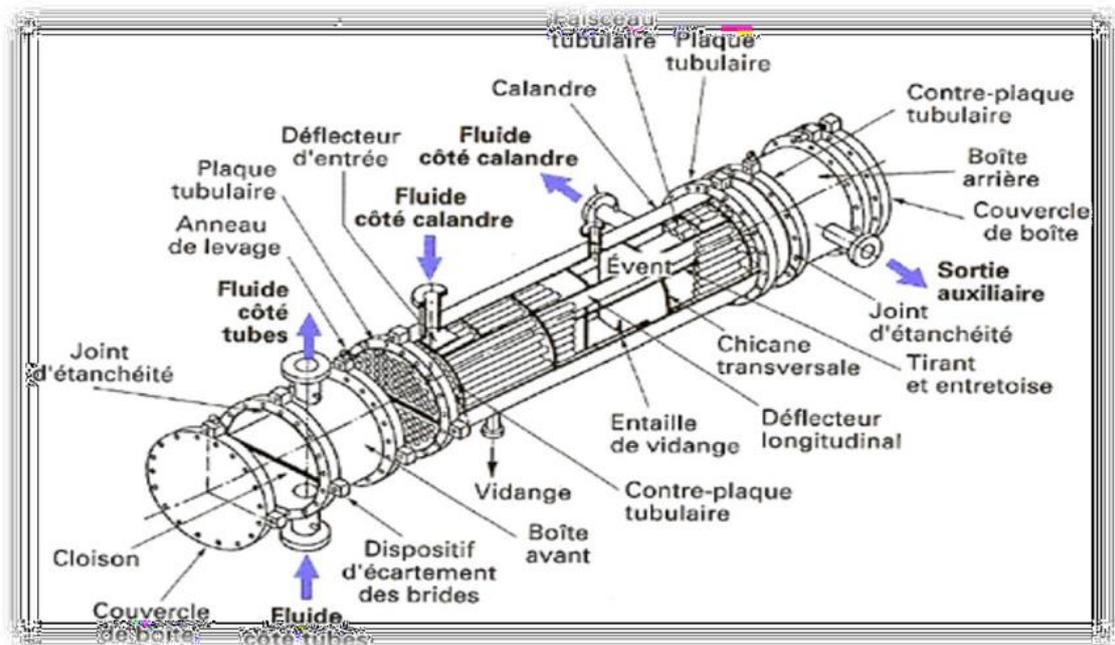
Figure II.10 : Vue en coupe de l'échangeur de chaleur étudié (11)

Le coefficient d'échange global  $K$  a une forte variation pendant le premier intervalle du temps en régime transitoire et prends graduellement l'allure de celle du régime permanent après ce temps. Malgré l'utilisation des fluides incompressibles, les pertes de charge varient dans cet intervalle du temps, c'est-à-dire : variation appréciable de la masse volumique en fonction de la température. Au-delà de cet intervalle, les pertes de charge ne sont plus fonction du temps, elles dépendent uniquement de la longueur.

L'étude de **REHRAH et al**, a été réalisée sur l'échangeur de chaleur à faisceau et calandre (E102 A/B), l'objectif de cette étude est de contribuer à l'amélioration de l'efficacité de cet appareil notamment pour lutter contre la corrosion et réduire le risque de perforation des tubes donc une injection d'inhibiteur est une solution envisageable. et pour atteindre ces but ,ils ont mené cette étude sur un échangeur expérimental similaire au vrai. (12)

## Chapitre II : Recherche bibliographique

Après les calculs qu'ils ont effectués dans ce travail, Les résultats ont démontré que la surface estimée est similaire à celle de l'échangeur et que les pertes de charge calculées sont inférieures à celles qui sont admissibles. Ainsi, cet appareil fonctionne de manière satisfaisante, ce qui confirme ou confirme le calcul de l'efficacité qui a atteint les 93%. De plus, la présence de 9,6 % de tubes obstrués a entraîné une diminution de la chaleur, ce qui a entraîné une baisse de l'efficacité de cet échangeur de 6 %. Le problème sera résolu en augmentant le débit de fluide froid, ce qui entraînera une augmentation de 1,58 kg/s.

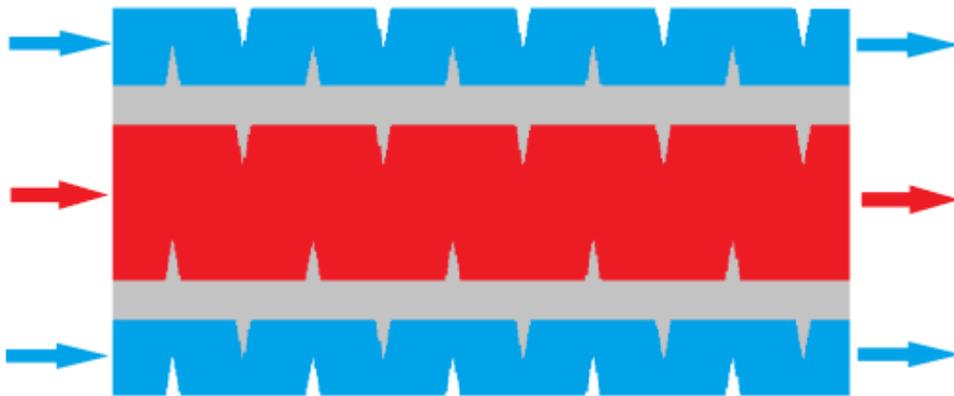


**Figure II.11:** Divers constituants d'un échangeur à faisceau et calandre (12)

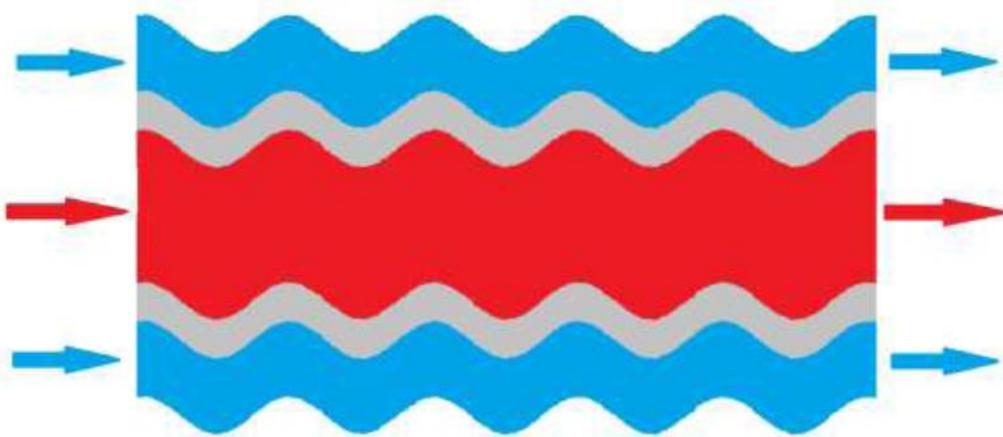
En 2019, M.AMZAL et AL, ont fait une comparaison de trois modèles d'échangeurs de chaleur à plaques (échangeur à plaques simple, à plaques munies de chicanes et à plaques ondulées) à l'aide de la simulation numérique, le but de ce travail est d'étudier le transfert thermique dans un échangeur de chaleur à plaques et d'apporter une amélioration à cet échange, avec une simulation 2D de l'écoulement des deux fluides (chaud et froid) en régime laminaire, à l'aide du logiciel Fluent. (13)



**Figure II.12:** Cas de géométrie simple (13)



**Figure II.13:** Cas de géométrie avec chicanes (13)



**Figure II.14 :** Cas de géométrie ondulée (13)

Les trois configurations ont été simulées pour comparer leur efficacité et sélectionner la plus rentable.

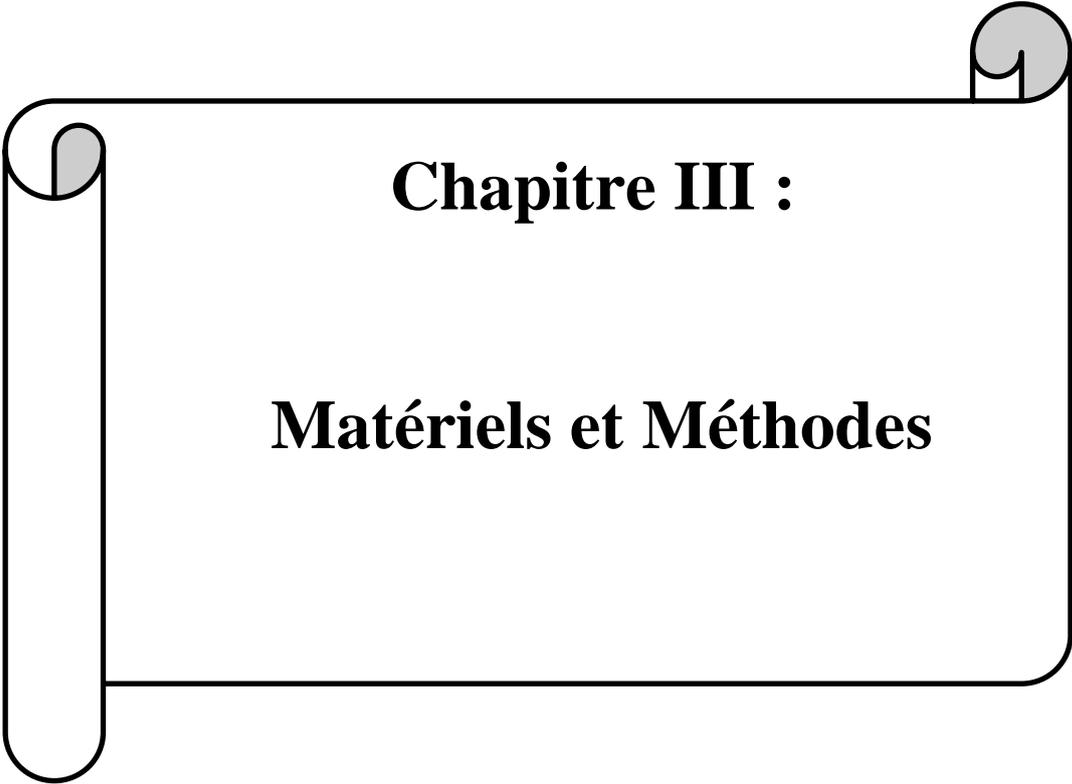
Les résultats obtenus indiquent que l'échangeur à plaques ondulées à contre-courant offre un échange de chaleur plus efficace.

### **II.3.Conclusion**

Toutes ces expériences et recherches mentionnées démontrent que des échanges de chaleur se produisent dans divers domaines d'activité humaine. La plupart de ces activités transfèrent la chaleur sans altérer les milieux impliqués dans le transfert thermique. L'objectif principal des échangeurs de chaleur est d'améliorer l'échange thermique entre les deux fluides tout en minimisant les pertes de charges ou en les réduisant à leur niveau le plus bas possible. C'est pourquoi la majorité des études se concentrent sur le côté calandre en étudiant l'impact de divers paramètres, tels que l'organisation des tubes, l'espacement entre les chicanes, la coupe des chicanes, etc.

### Bibliographie

1. **A.OUGANA.** Etude et dimensionnement d'un système de refroidissement. [En ligne] 2019.
2. **Zuritz, C.** .On the design of triple concentric-tube heat exchangers. Food Process Engineering. [En ligne] 1989.
3. **Wang, : F.J.** Computational Fluid Dynamics Analysis - CFD Software Principles and Applications,. [En ligne] 2004.
4. **J. Timothy, G. Vijaya.** Numerical studies of a double-pipe Helical heat exchanger Applied Thermal Engineering. [En ligne] 2006.
5. **Huang, C.H., I.C. Yuan, and H. Ay.** An experimental study in determining the local heat transfer coefficients for the plate finned-tube heat exchangers. [En ligne] 2009.
6. **Kaci, H.M., et al.** Flow structure and heat transfer induced by embedded vorticity. International Journal of Heat and Mass Transfer. [En ligne] 2010.
7. **Li Zhang, Hongmei Guo, Jianhua Wu,.** Wenjuan du compound heat transfer enhancement for shell side of double-pipe heat exchanger by helical fins and vortex generators Heat Mass Transfer. [En ligne] 2012.
8. **S.SALAOUATCHI.** ETUDE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A TUBES ET CALANDRE, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU. [En ligne]
9. **Petinrin, M. O., & Dare, A. A.** Performance of shell and tube heat exchangers with varying tube layouts. British Journal of Applied Science &Technology. [En ligne] 2016.
10. **Kareem, Rashid.** Optimization of double pipe helical tube heat exchanger and its comparison with straight double tube heat exchange. [En ligne] 2016.
11. **Boultif, N.** Etude d'un échangeur de chaleur à triple tube concentrique en régime permanente et transitoire,. [En ligne] 2017.
12. **REHRAH.** ETUDE THERMIQUE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A FAISCEAU ET CALANDRE E102. [En ligne]
13. **AMZAL, M et al.** ETUDECOMPARATIVE DES TROIS MODELSD'ECHANGEUR DE CHALEUR A PLAQUES PAR SIMULATION NUMERIQUE,. [En ligne]
14. **Fatima, BOUCHENTOUF.** ETUDE SISMIQUE PARAMETRIQUE D'UN BATIMENT IMPLANTE DANS DEUX SENS ORTHOGONAUX. [En ligne] 2017.
15. **Ilhem, GASMI, et al., et al.** ETUDE D'UN BATIMENT R+3 A USAGE D'HABITATION CONTREVENTE PAR DES VOILES PORTEURS EN BA. [En ligne] 2020/2021.



## **Chapitre III :**

### **Matériels et Méthodes**

### III.1. Introduction

Dans le but de la simulation de dispositifs physiques, il est nécessaire de passer par la modélisation mathématique de tous les phénomènes mis en jeu.

Dans le cas des échangeurs thermiques, l'étude du fonctionnement et des performances de ces derniers, requiert une modélisation multi-physique englobant, particulièrement les phénomènes d'écoulement et les phénomènes thermiques.

Ainsi, les formulations mathématiques concernent les équations de Navier-Stokes, qui traduisent le principe de conservation de masse et le principe de conservation de la quantité de mouvement, ainsi que l'équation de la chaleur qui représente le principe de conservation de l'énergie.

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

### III.2. Grandeurs thermiques

Afin d'expliquer avec succès les phénomènes de transfert de chaleur d'un milieu à autre, et plus généralement de conservation de la chaleur dans les systèmes isolés, il est nécessaire de définir un certain nombre de grandeurs physiques. Pour une quantité de matière donnée, l'apport d'une quantité de chaleur induit un changement de sa température ou un changement d'état de la matière. La température quant à elle est une grandeur physique qui caractérise un niveau d'énergie de la matière. Ces différentes notions seront explicitées ci-après. **(1)**

#### III.2.1. 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 » **(2)**.

#### III.2.2. 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  $\varphi$  **(3)** :

$$\varphi = \frac{1}{S} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (\text{III.1})$$

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

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{III.2})$$

### III.2.3. 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) (1).

### III.2.4. La chaleur spécifique

Par définition, la chaleur spécifique  $C_p$  correspond à la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un matériau de masse donnée pour que sa température s'élève d'un degré. C'est-à-dire la quantité de chaleur échangée entre deux corps respectivement à la température  $T_1$  et  $T_2$

( $T_1 > T_2$ ) s'exprime par :

$$C = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT} \quad (\text{III.3})$$

### III.2.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors d'un transfert thermique par conduction. Cette constante apparaît dans la loi de Fourier. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température. La conductivité dépend principalement de:

- La nature du matériau,
- La température.
- D'autres paramètres comme l'humidité et la pression.

Donc la conductivité thermique  $\lambda$  caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur (4).

### III.2.6. 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  $RC$  définie par la relation suivante :

$$Rc = \frac{1}{hc} \quad (\text{III.4})$$

Où  $hc$  est le coefficient d'échange thermique.

### III. 3. Grandeurs physiques

#### III.3.1. La densité ( $\rho$ )

C'est le rapport de la masse d'un matériau par unité de volume. Appelée aussi masse volumique (5).

#### III. 3.2. 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 (5).

#### III.3.3. 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  $m$  [ $Kg/s$ ] et le débit volumique  $\dot{Q}v$  [ $m^3/s$ ].

#### III.3.4. Le nombre de Reynolds

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

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

Il caractérise le régime d'écoulement des fluides.

#### 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.

#### 2. Régime turbulent

L'écoulement est perturbé, le mouvement des particules fluides est aléatoire. 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 (6).

Dans notre cas et notre étude, le nombre de REYNOLDS est :

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (\text{III.6})$$

D : diamètre spécifique

$\mu$  : la viscosité dynamique de fluide

$\rho$  : la masse volumique du fluide

V : la vitesse de l'eau calculé par la formule suivante:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (\text{III.7})$$

Ou A : la section de passage

Après les calculs correspondant notre cas, le nombre de Reynolds supérieur de 2300

**Re > 2300** et donc, l'écoulement est considéré turbulent.

### III.4. Modes de transfert de chaleur

#### III.4.1. La conduction thermique (4)

Le phénomène de conduction est régi par la loi de Fourier :

$$\phi = -\lambda \cdot s \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{III.8})$$

Alors si un corps à température  $T_1$  est raccordé à un corps à la température  $T_2$  par l'intermédiaire d'un corps thermique de section S et d'épaisseur  $e$ . Le flux de chaleur qui s'écoule entre les deux corps est donné par la relation :

$$\phi = \lambda \cdot s \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{e} \quad (\text{III.9})$$

#### III.4.2. Convection thermique

Pour le transfert de convection, le transport d'énergie par conduction a toujours lieu, néanmoins le mode dominant est celui due au mouvement de particules fluides (7).

$$\phi = h \cdot s \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{III.10})$$

### III.5. Étude d'un échangeur

Dans l'étude d'un échangeur, on cherche toujours à obtenir une puissance d'échange donnée, avec la plus faible surface d'échange et le moins de pertes de charge possible, autrement dit meilleur coût d'investissement et d'exploitation. Des contraintes d'encombrement, de poids, de corrosion, de normalisation, interviennent, ce qui fait que les paramètres dont on dispose sont généralement bien plus nombreux que les équations, certains impératifs étant de nature essentiellement technologique ou économique. L'étude complète d'un échangeur fait donc appel à différentes disciplines (thermique, mécanique des fluides, technologie, etc...).

Dans notre cas, nous n'avons abordé que l'aspect thermique, autrement dit l'évaluation des performances thermiques des échangeurs de chaleur **(8)**.

### III.5.1. Coefficient global de transfert de chaleur

Le Coefficient de transfert de chaleur représente la "force " avec laquelle la puissance est transmise entre la paroi et le fluide, ce coefficient peut être petit ce que signifie que la chaleur est transmise d'une façon non performante.

De même, ce coefficient peut prendre des valeurs importantes ce qui conduit à un transfert très efficace.

Ce coefficient est directement affecté par les propriétés physiques des fluides **(8)**, **(9)**.

$$\phi = h. s. (T_c - T_f) \quad \text{(III.11)}$$

### III.6. Hypothèses simplificatrices

Dans certains modèles, nous sommes amenés à considérer certaines hypothèses simplificatrices.

Dans notre cas, nous avons examiné les hypothèses suivantes pour permettre une solution simple et pratique :

1. L'écoulement de fluide est turbulent stationnaire.
2. Le fluide visqueux est newtonien et incompressible.
3. Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
4. Les propriétés des fluides ( $C_{pf}, \lambda_f, \rho_f, \mu_f$ ) et de solide ( $C_{ps}, \lambda_s, \rho_s, \mu_s$ ) sont considérées constantes .
5. Les profils de vitesse et de température à l'entrée du domaine sont uniformes.

### III.7. Equations gouvernantes

Les équations qui gouvernent le problème étudié sont les suivantes :

➤ **Equation de continuité**

Cette équation est déduite du principe de conservation de masse. Elle s'écrit en forme vectorielle sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (\text{III.12})$$

Puisque l'écoulement de notre cas est permanent et tridimensionnel, l'équation devient :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.13})$$

U, V et W sont les composantes de la vitesse du fluide dans les axes x, y et z respectivement.

➤ **Equation de conservation de la quantité de mouvement**

Cette équation est déduite de la deuxième loi de la dynamique, qui stipule que la variation de la quantité de mouvement d'une particule fluide est égale à la somme des forces extérieures sur cette particule. Elle s'écrit sous forme vectorielle :

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \text{div}[\rho \vec{U} \otimes \vec{U}] = -\overrightarrow{\text{grad}P} + \mu \Delta \vec{U} + \vec{f} \quad (\text{III.14})$$

$\vec{f}$ : force volumique

Le fluide de notre cas est incompressible, l'écoulement tridimensionnel est turbulent et stationnaire alors **l'équation de conservation de la quantité de mouvement** devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.15})$$

$$\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial w u}{\partial x} + \frac{\partial w v}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

$$\vec{U} \begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases}$$

Dans ces équations  $u$  et  $v$  et  $w$  sont les composantes de la vitesse du fluide dans la direction  $x$  et  $y$  et  $z$ , respectivement.

### ➤ L'équation de la chaleur

En faisant un bilan d'énergie sur un domaine  $v$ , et d'après le premier principe de la thermodynamique, la quantité de chaleur élémentaire correspondante à la variation d'énergie interne dans un élément  $dv$  par unité de temps comprend la puissance échangée sur la surface entourant  $dv$  et la puissance engendrée dans  $dv$  **(10)**.

L'équation traduisant ce bilan d'énergie est :

$$\int_s \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \cdot ds + \int_v \dot{Q} dv = \int_v \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad \text{(III. 16)}$$

Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas.

**En tridimensionnel**, et pour un écoulement turbulent l'équation est :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \cdot \mathbf{u} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{(III.17)}$$

### III.8.Méthodes numériques

Les méthodes numériques les plus utiles et les plus utilisées pour les dimensionnements et les calculs des échangeurs sont :

- la méthode des éléments finis.
- la méthode des volumes finis.

### III.8.1. La méthode d'élément finis

#### ❖ Définition

La méthode des éléments finis est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées. La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème.

#### ❖ Le principe d'élément fini

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations.

### III.8.2. Méthode des volumes finis

#### ❖ Définition

Aussi appelée la méthode de boîte. La méthode a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar (Numerical Heat Transfer and Fluid Flow) (11).

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

C'est une méthode de simulation numérique, elle suppose connue la géométrie exacte de l'appareil que l'on désire modéliser, ainsi que les caractéristiques de deux fluides à l'entrée de l'appareil et une bonne idée de la configuration d'écoulement c'est à dire du champ de vitesse des fluides à l'intérieur de l'appareil.

### ❖ Le principe des volumes finis

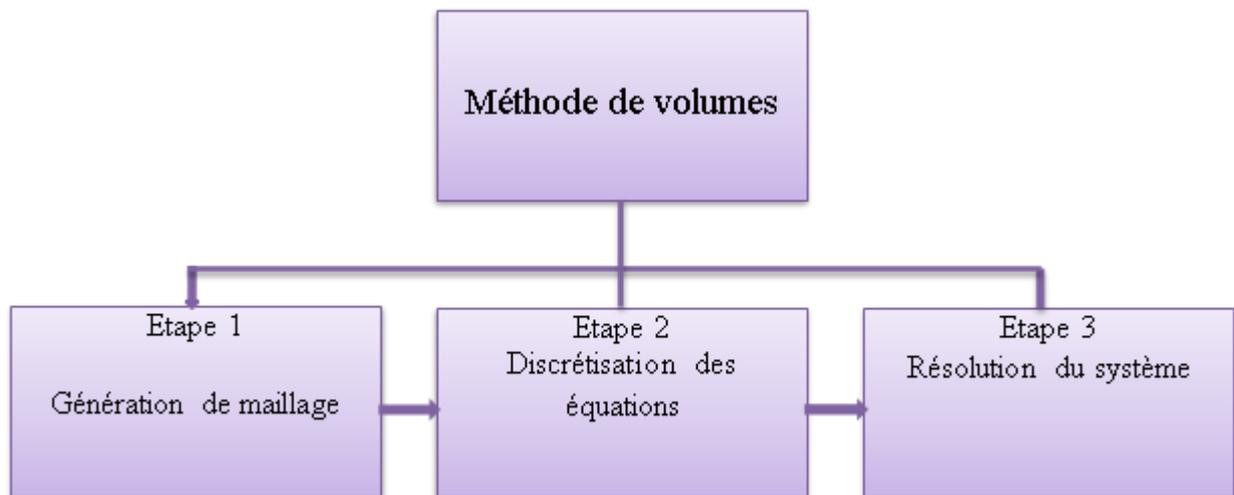
Elle repose sur les principes suivants :

1. Décomposition de l'échangeur en un certain nombre de volumes de contrôle ou de mailles.
2. Sur chacune de ces cellules, un bilan d'énergie est effectué, en supposant la température du fluide constante à l'intérieur du volume.

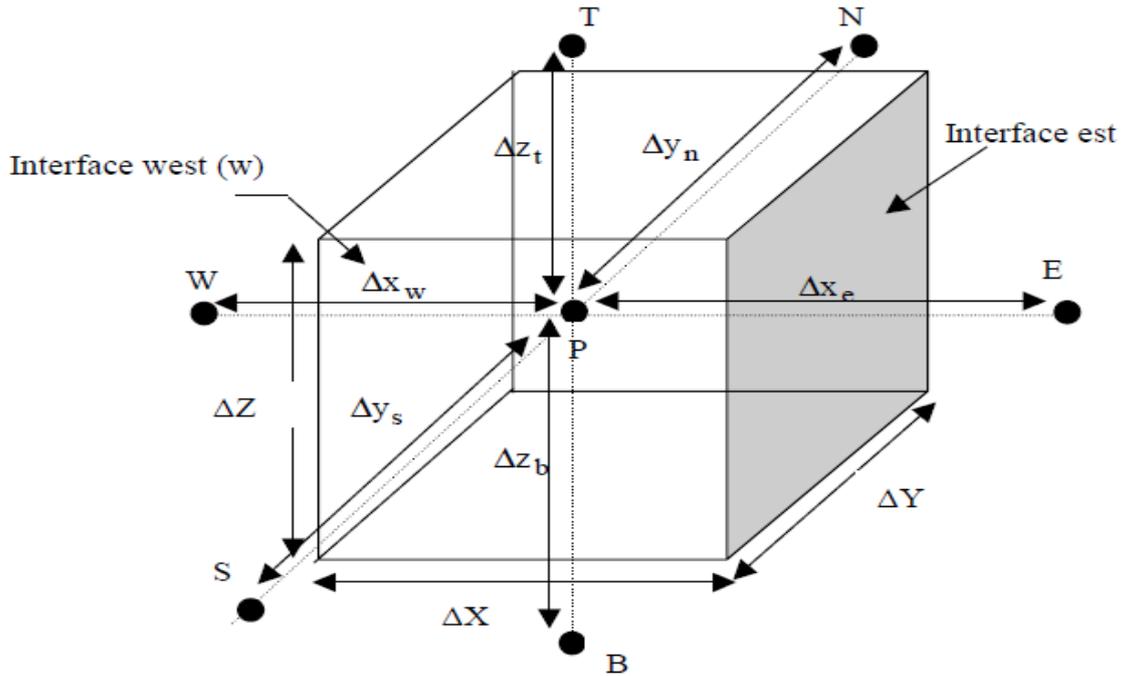
La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équation algébriques, qui peuvent être résolus numériquement.

### ❖ Les étapes des volumes finis

Cette méthode passe par les étapes suivantes :



**Figure III.1:** Etapes de méthodes des volumes finis (12).



**Figure III.2:** Description d'un volume élémentaire de base (12).

E : nœud est.

e : interface est.

W : nœud west.

w : interface west.

N : nœud nord.

n: interface nord.

S : nœud sud.

s: interface sud.

T : nœud top.

t: interface top.

B : nœud bottom.

b: interface bottom.

$\Delta X$  : est le pas de discrétisation suivant la direction X.

$\Delta Y$  : est le pas de discrétisation suivant la direction Y.

$\Delta Z$  : est le pas de discrétisation suivant la direction Z.

$\Delta x_e$  : est le pas de discrétisation suivant la direction X entre le nœud P et E.

$\Delta x_w$  : est le pas de discrétisation suivant la direction X entre le nœud P et W.

$\Delta y_n$  : est le pas de discrétisation suivant la direction Y entre le nœud P et N.

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

$\Delta y_s$  : est le pas de discrétisation suivant la direction Y entre le noud P et S.

$\Delta z_t$  : est le pas de discrétisation suivant la direction Z entre le noud P et T.

$\Delta z_b$  : est le pas de discrétisation suivant la direction Z entre le noud P et B.

### III.9.Présentation du logiciel ANSYS FLUENT

**A) ANSYSWORKBENCH** : Le Workbench permet la gestion des fichiers et le lancement de nombreuses applications logicielles à partir d'une seule fenêtre. La fenêtre principale de Workbench est l'endroit où les fichiers sont créés, les programmes sont lancés et les interactions entre les différents programmes utilisés pour la géométrie, le maillage, la simulation précise et le post-traitement sont gérés.

Les étapes citées ci-dessous ont été suivi pour faire notre simulation numérique en utilisant ANSYS Fluent :

- ✚ Création de la géométrie sous le logiciel Design Modeler.
- ✚ Création du maillage avec le logiciel ANSYS Meshing.
- ✚ Définition du problème sous le logiciel ANSYS FLUENT.
- ✚ Calcul avec ANSYS FLUENT pour les différents cas retenus.
- ✚ Analyse des résultats obtenus.

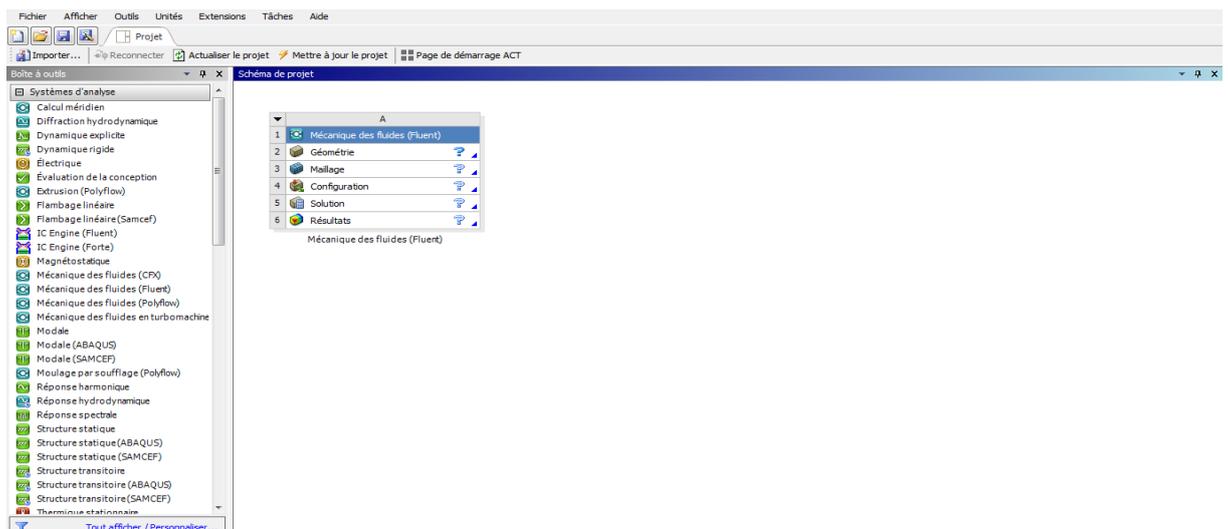


Figure III.3: Interface de logiciel ANSYS Workbench.

**B) ANSYSFLUENT** : Fluent est un programme informatique conçu pour la simulation des

écoulements de fluide et du transfert de chaleur dans des géométries complexes.

Il présente une grande flexibilité des résultats et une adaptation avec n'importe quel type de maillage. Il permet le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenue. Cela est très utile dans la région à gradients importants (couches limites, couches à cisaillement libre).

Fluent écrit en langage C, il emploie toute la flexibilité et la puissance qu'offre ce langage. Il utilise l'architecture serveur client nécessaire au calcul parallèle sur plusieurs machines.

Fluent dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation.

Le logiciel FLUENT est basé sur la méthode de modélisation numérique connue pour sa puissance de calcul et facilité de mis en œuvre : **méthode des volumes finis**. Dans cette méthode, on intègre des équations de conservation que l'on applique sur chaque volume de contrôle élémentaire.

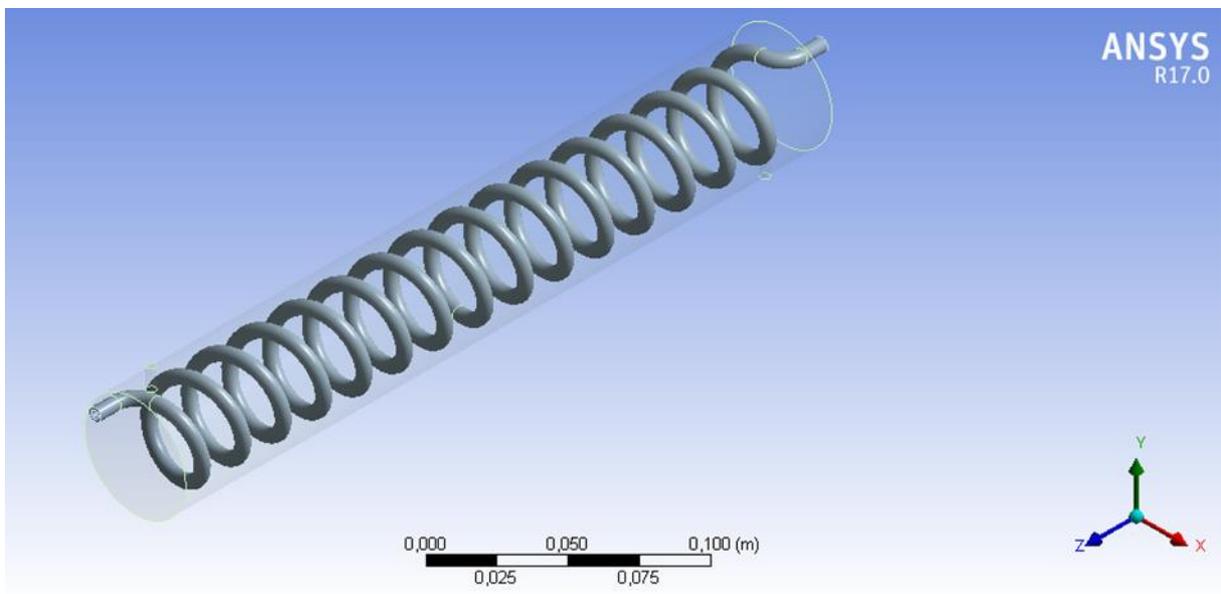
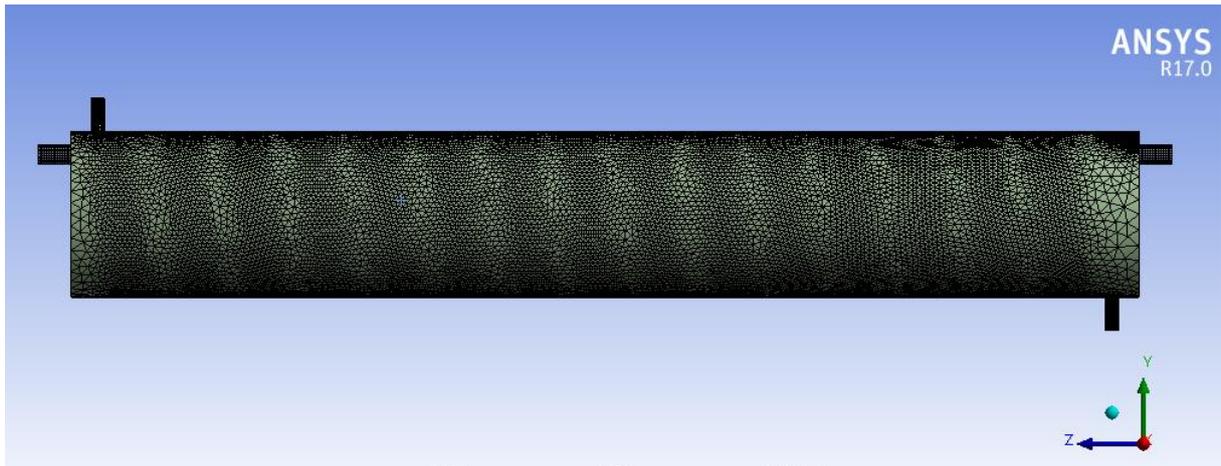
### III.10. Présentation du problème

La simulation numérique d'un écoulement stationnaire dans un échangeur de chaleur a été menée. La configuration géométrique du modèle étudié est montrée dans **la figure III.4**.

L'échangeur de chaleur étudié est de type spiralé de tube et est fabriqué en aluminium.

Deux fluides circulent dans cet échangeur de chaleur, le premier fluide (l'eau chaude) s'écoule dans le tube interne alors que le deuxième fluide (l'eau froide) circule à l'extérieur du tube, dans la coque de l'échangeur de chaleur, ces deux fluides ont des températures différentes.

Les fluides circulent à contre-courant et l'échangeur est isolé (adiabatique), on utilise le tube spiralé pour augmenter la surface d'échange de chaleur et par conséquent améliorer le rendement de fluide.



**Figure III.4:** Géométrie d'un échangeur à tube spiralé

Cette configuration géométrique a été utilisée pour la simulation par le code de calcul ANSYS FLUENT. Toutes les dimensions concernant les caractéristiques de tube et de calandre sont mentionnées dans le **Tableau III.1**

$d_i$ , mm	$D_e$ , mm	$d_f$ , mm	$D_o$ , mm	$b$ , mm	$L$ , mm	$N_T$	$S$ , mm <sup>2</sup>
4	6	4	50	20	320	15	11875,22
4	6	4	50	12	320	25	19792,03

**Tableau III.1 :** Dimension d'un échangeur de chaleur à tube spiralé

- **di** : diamètre intérieur de tube spiralé
- **De** : diamètre extérieur de tube spiralé
- **df** : diamètre d'entrée de fluide froid
- **Do** : diamètre de coque
- **b** : la longueur de pas entre les cycles
- **L** : la longueur de tube
- **Nt** : nombre de tour
- **S** : surface

### **III.11.L'échangeur de chaleur à faisceau de tubes et calandre(TD360c)**

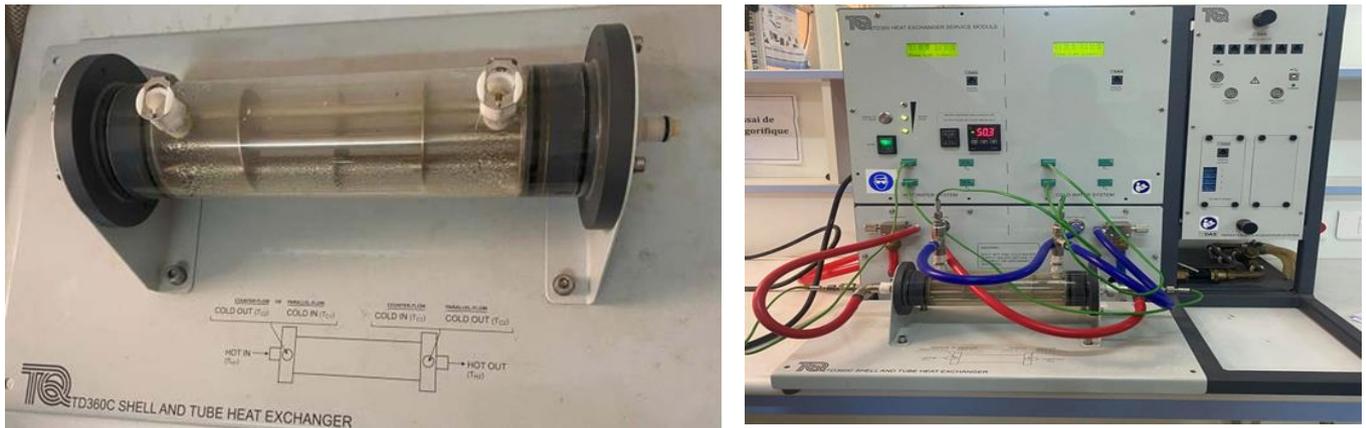
#### **III.11.1.Description et fonctionnement de l'échangeur de chaleur à faisceau et calandre TD360c**

L'échangeur de chaleur TD360c est expliqué par un fluide qui passe à travers la coque et l'autre fluide passe à travers le faisceau de tubes. Les chicane autour du faisceau aident à créer la turbulence. Le module de service (TD360) fournit de l'eau chaude et froide à l'échangeur de chaleur et à tous les instruments nécessaires pour mesurer ses performances.

Tous les raccordements de fluide à l'échangeur de chaleur sont des connecteurs rapides auto-étanches pour sécurité et simplicité. Les flux de fluide chaud et froid ont différents connecteurs pour réduire les erreurs. Connecter la chaleur de l'échangeur prend moins d'une minute.

#### **III.11.2.Spécifications techniques requises**

L'échangeur de chaleur à faisceau est constitué par un tube extérieur transparent de diamètres externe 60 mm et interne 50 mm et un faisceau tubulaire composé de six tubes en acier inoxydable de diamètre externe 6 mm et diamètre intérieur 4 mm (épaisseur de la paroi de 1 mm), et de trois chicanes et sa surface de transfert moyenne est de  $0,02 m^2$ . Sont raccordement est aussi rapide pour une connexion au module de base ces dimensions sont :  $500 \times 260 \times 150$  mm .



**Figure III.5 :** Echangeur à faisceau et calandre.

### III.11.3. Expérience réalisée

Les expériences que nous avons menées sont les suivantes :

- Variation de la température d'entrée de fluide chaud.
- Variation du débit de fluide chaud.
- Variation du débit de fluide froid.

#### III.11.3.1. Changement de la température d'entrée de l'eau chaude

Nous avons installé et fixé l'échangeur de chaleur à faisceau de tubes et calandre (TD360c) dans un banc d'essai Td360 de manière inverse (contre-courant), ce qui signifie que l'entrée et l'écoulement de l'eau chaude sont inversés par rapport à l'entrée et à l'écoulement de l'eau froide.

Ce banc d'essai fonctionne en remplissant et en évaporant l'eau, affiché sur sa silhouette les températures chaudes et froides et aussi les débits, ce qui nous permet de les contrôler.

On a changé la température d'entrée de l'eau chaude, en prenant deux valeurs  $T_{c1}=50^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{c2}=60^{\circ}\text{C}$ , de façon de fixer la température de l'entrée de l'eau froide  $T_f=21,3^{\circ}\text{C}$ , et en plus de cela, nous avons ajusté et fixé le débit de l'eau, d'eau chaude et d'eau froide sur  $Q_c=1$  L/min,  $Q_f=1,5$  L/min.

Nous avons appliqué cette procédure au cas la configuration de contre-courant. Pendant le changement de la température de l'eau chaude, nous avons refroidi l'appareil et nous avons recommencé à zéro et cela en utilisant les afficheurs de circuit d'eau froide d'eau chaude du banc d'essai TD360 sur lequel nous avons travaillé.

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

---

Ensuite, nous avons procédé à l'enregistrement des résultats qui seront communiqués indiqués dans le chapitre suivant.

**Cette procédure peut être donc résumée comme suit**

- ✓ Type de l'échangeur : à faisceau et calandre
- ✓ La configuration de courant de transfère : contre-courant
- ✓ Débit : fixé :  $Q_c=1$  L/min,  $Q_f=1,5$  L/min
- ✓ La température d'entrée de l'eau froide : fixé :  $T_f=21,3^\circ\text{C}$
- ✓ La température d'entrée de l'eau chaude : variable

### III.11.3.2.Changement de débit de l'eau chaude

Pour la deuxième expérience, nous avons gardé le débit de l'eau froide  $Q_f= 1,5$  L/min fixe et travaillé à la modification du débit d'eau chaude  $Q_c=2$  L/min pour deux températures d'entrées différentes de l'eau chaude  $T_{c1}= 50^\circ\text{C}$  et  $T_{c2}= 60^\circ\text{C}$ . Nous avons par la suite suivi les températures ( $T_{c2}$  et  $T_{f1}$  et  $T_{f2}$ ) sur les afficheurs de banc TD360 et les enregistré.

**Cette procédure peut être donc résumée comme suit :**

- ✓ La configuration du courant de transfert : contre-courant
- ✓ Les températures d'entrée de l'eau chaude : fixé  $T_{c1}=50^\circ\text{C}$  et parfois  $60^\circ\text{C}$
- ✓ Le débit de l'eau froide : fixé  $Q_f=1,5$  L/min
- ✓ Le débit de l'eau chaude : variable.

### III.11.3.3.Changement de débit de l'eau froide

Dans cette expérience, nous avons fait les mêmes étapes que les précédentes, mais cette fois ci nous avons changé le débit de l'eau froide  $Q_f= 2$  L/min.

**Cette procédure peut être donc résumée comme suit :**

- ✓ La configuration du courant de transfert : contre-courant
- ✓ La température d'entrée de l'eau chaude : fixé  $T_{c1}= 50^\circ\text{C}$   $T_{c2}=60^\circ\text{C}$
- ✓ La température d'entrée de l'eau froide : fixé  $T_f= 21,3^\circ\text{C}$
- ✓ Le débit de l'eau chaude : fixé  $Q_c=1$ L/min

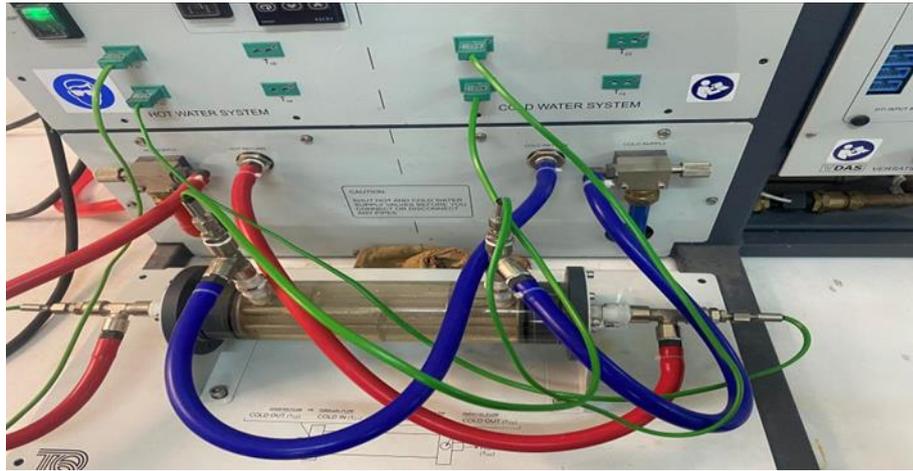


Figure III.6: Expérience sur l'échangeur de chaleur à faisceau.

**Le rendement** Plus les pertes thermiques sont minimisées, plus le rendement de l'échangeur thermique est important. Pour cette raison, il est donc très important que le matériau utilisé dans la conception soit le plus conducteur possible.

Ainsi, en choisissant un système ayant le meilleur rendement, les économies d'énergie se font immédiatement ressentir.

$$\eta = \frac{Q_{réel}}{Q_{max}} \times 100 \quad (\text{III.18})$$

$Q_{réel}$  et  $Q_{max}$  Sont respectivement les flux réels et maximal.

$$\text{Avec } Q_{réel} = C_p \cdot \Delta T_c \quad (\text{III.19})$$

Et donc l'équation devient :

$$\eta = \frac{(T_{c1} - T_{c2})}{(T_{c1} - T_{f1})} \times 100 \quad (\text{III.20})$$

### III.12. Etude de l'échangeur à tube spirale

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 TD360c comme modèle de référence, ensuite nous avons remplacé l'ensemble des tubes rectilignes par un seul tube spirale et cela en gardant la même longueur.

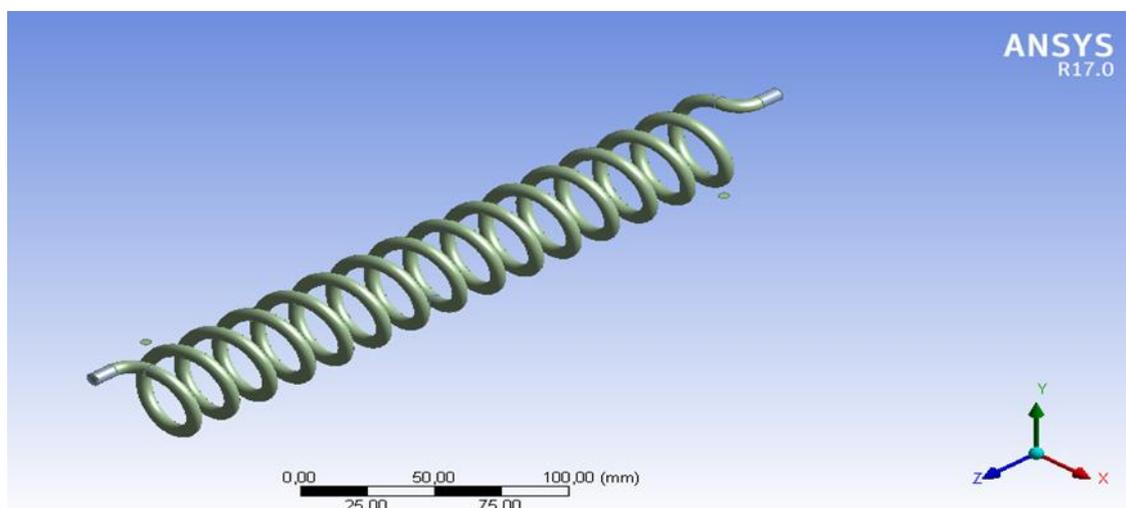
#### ➤ Les cas étudiés

Nous avons traité trois cas différent durant cette phase de simulation numérique :

a. **Le premier cas** : remplacement de l'ensemble des tubes rectilignes existant dans l'échangeur à faisceau par un seul tube spiralé en gardant la même surface d'échange et le même volume de la coque.

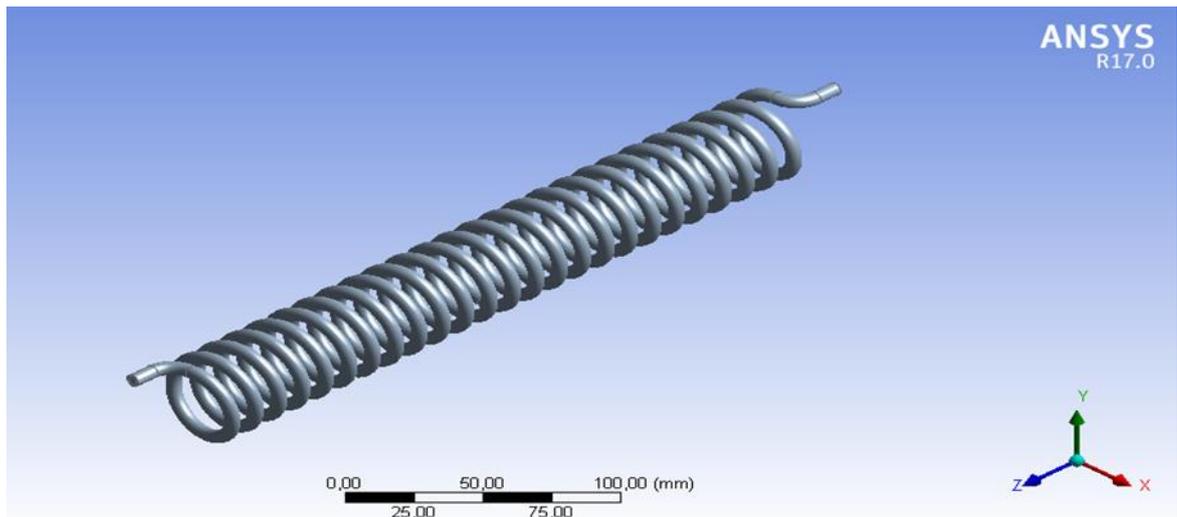
La distance entre les spires d'un tube spiralé est souvent appelée "**pas de spirale**". Cela désigne la distance axiale entre deux points successifs sur la spirale.

b. **Le deuxième cas** : considéré un **pas de spirale** égale à 20mm pour une longueur total égal à ( $L=320\text{mm}$ ), cela nous a permis d'obtenir 15 spires à l'intérieur de tube spiralé (**Figure III.7**).



**Figure III.7** : Echangeur de chaleur à tube spiralé de 15 tours.

c. **Le troisième cas** : considéré un **pas de spirale** égale à 15 mm pour une longueur total égal à ( $L=320\text{mm}$ ), cela nous a permis d'obtenir 25 spires à l'intérieur de tube spiralé. (**Figure III.8**).



**Figure III.8 :** Echangeur de chaleur à tube spiralé de 25 tours.

### III.13. Conditions aux limites

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite la considération des conditions aux limites pour chaque variable dépendante. Dans le cas des échangeurs de chaleur, et dans notre cas :

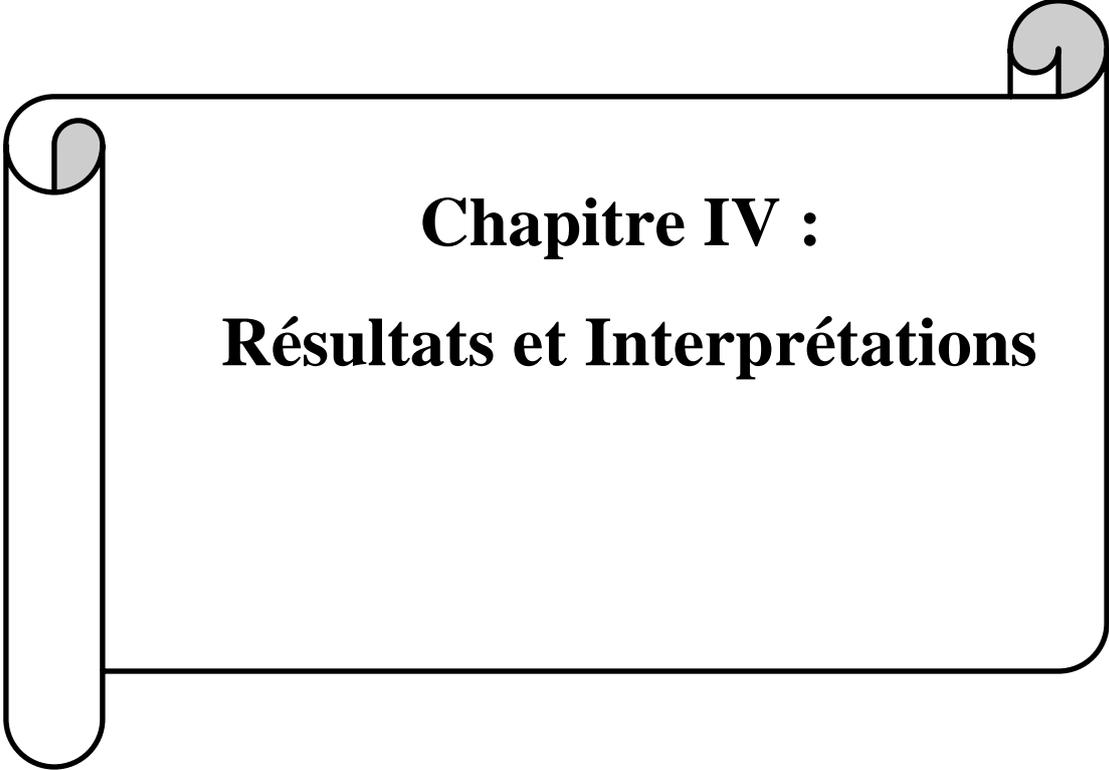
- Le tube est mise en aluminium et ayant une épaisseur de 6 mm.
- La vitesse et la température de l'eau à l'entrée côté tube sont uniformes et constante.
- La pression atmosphérique est appliquée à la sortie de tube spiralé.
- Toutes les limites extérieures restantes sont isolées thermiquement (adiabatique).

### III.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique régissant l'écoulement à l'intérieur d'un échangeur de chaleur, la méthode numérique utilisée ainsi qu'une description détaillée du banc d'essai et de l'expérimentation ont été également présenté.

### Bibliographie

1. Techniqued de froid technique général CfmnLog YSH04054. [En ligne] 30 juin 1998.
2. **J, Leconte.** Echangeur de chaleur dimensionnement, techniques de l'ingénieur, traité mécanique et chaleur [B2342]. [En ligne]
3. **Jannot, Yves.** transferts thermiques p7/ p161. [En ligne] 2012.
4. **CESIRE.** transfer de chaleur, université de Josephh Fourier, Grenoble. [En ligne]
5. **Gross, M. S. Mon and U.** Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 47, pp. [En ligne] 1953-1964.
6. Collection Microsoft encarta. [En ligne] 2003.
7. **jean Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean Rodolphe Puiggali.** introduction aux transferts thermiques p7, Centre. [En ligne] 2010.
8. **M.S, Boulahlib.** contribution à l'étude des échangeurs de chaleur à ailettes intégrales thèse de magister, Université de Constantine. [En ligne] 1998.
9. **S, Boulahlib. M.** intallation thermique industrielle, cours TEC628. [En ligne]
10. **A. Bontemps, A Gareigue, et al.** Dimensionnement Thermique, technique de l'ingénieur[ B 2342]. [En ligne]
11. **Dominique Marchio, Paul Reboux.** introduction aux transferts thermiques p 7, Centre. [En ligne]
12. **Redhouane, BAHLOUL.** Etude d'un écoulement turbulent entre deux cylindres coaxiaux en rotation, Master université Abderrahmane mira Bejaia énergétique. [En ligne] 2018.



**Chapitre IV :**  
**Résultats et Interprétations**

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, une étude expérimentale et numérique d'un écoulement turbulent incompressible tridimensionnel de l'eau traversant un échangeur de chaleur de type différent est présentée.

Les résultats obtenus par le TD360c de l'échangeur à faisceau de tube et calandre «type 1 » seraient discutés et comparés avec ceux traités numériquement dans un échangeur de chaleur à tube spiralé. Les simulations numériques ont été menées par ANSYS FLUENT traitant deux cas « échangeur à tube spiralé à 15 tours «type 2 » et à 25 tours «type 3 ». Les équations gouvernantes ces systèmes sont résolus par la méthode des volumes finis à l'aide d'un code de calcul Fluent.

La configuration à circulation contre-courant a été choisie et utilisée pour toutes les études car elle présente toujours les meilleures performances comparé à celle de la configuration Co-courant.

Les essais expérimentaux et les simulations numériques menés au cours de ce travail ont été effectués pour traiter les cas suivant :

✚ Effet de variation de la température d'entrée de l'eau chaude pour un débit constant de l'eau froide et chaude

✚ Effet de variation de débit de l'eau chaude en gardant la température d'entrée de l'eau chaude et le débit de l'eau froide fixe.

✚ Effet de variation de débit de l'eau froide en gardant la température d'entrée de l'eau chaude et froide fixe ainsi que le débit de l'eau chaude fixe sur :

1. La température de la sortie de l'eau chaude
2. La température de la sortie de l'eau froide et
3. Le rendement coté chaud et froid.

### IV.2.Présentation et discussion des résultats

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

### IV.2.1. Effet de variations de température

Le tableau IV.1 (a et b) montrent les températures d'entrée et sortie coté chaud et froid, la différence de températures « entré-sortie » coté chaud et froid ainsi que le rendement obtenus pour les différents types d'échangeur de chaleur « à faisceau et calandre, à tube spiralé de 15 tours et à spiralé de 25 tours ».

Il est à noter que les indices c, f, 1, 2 indiquent respectivement chaud, froid, entré et sorti.

<b>Echangeur à faisceau et calandre (expérimental)</b>								
$Q_{vc}$ (L/min)	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$ (L/min)	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	50	45.5	4.5	1.5	21.3	24.6	3.3	15
<b>Echangeur spiralé à 15 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	50	43.03	6.97	1.5	21.3	28.84	7.54	26
<b>Echangeur spiralé à 25 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	50	40.8	9.2	1.5	21.3	32.5	11.2	39

(a)

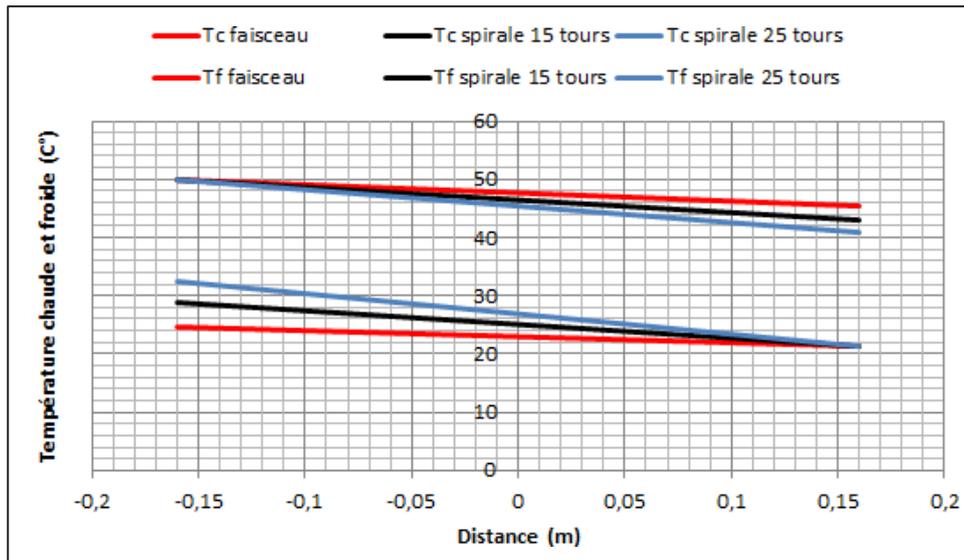
<b>Echangeur à faisceau et calandre (expérimental)</b>								
$Q_{vc}$ (L/min)	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$ (L/min)	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	60	53.6	6.2	1.5	21.3	26.3	4.5	16
<b>Echangeur spiralé à 15 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	60	50.6	9.4	1.5	21.3	31.6	10.3	27

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

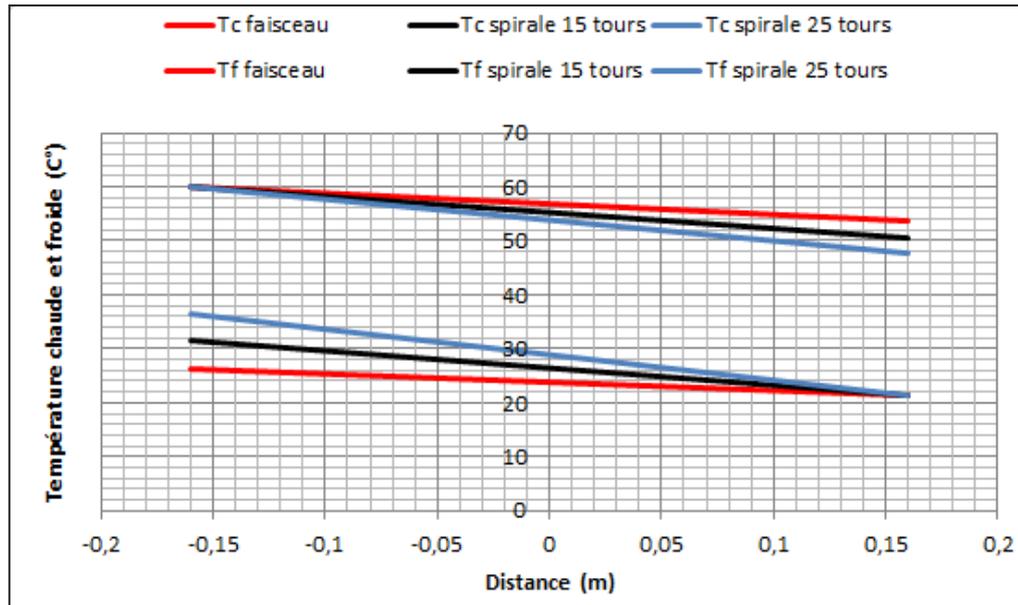
Echangeur spirale à 25 tours (Numérique)								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	60	47.63	12.37	1.5	21.3	36.5	15.2	40

(b)

**Tableau IV.1:** Récapitulatif des données d'entrées et de sorties pour les trois types d'échangeurs et pour une température d'entrée de (a) : 50°C et (b) : 60°C



(a)



(b)

**Figure IV.1** : Variation de température d'entrée et de sortie coté chaud et froid en fonction de distance pour les trois types d'échangeurs pour une température d'entrée de

(a) : 50°C et (b) : 60°C

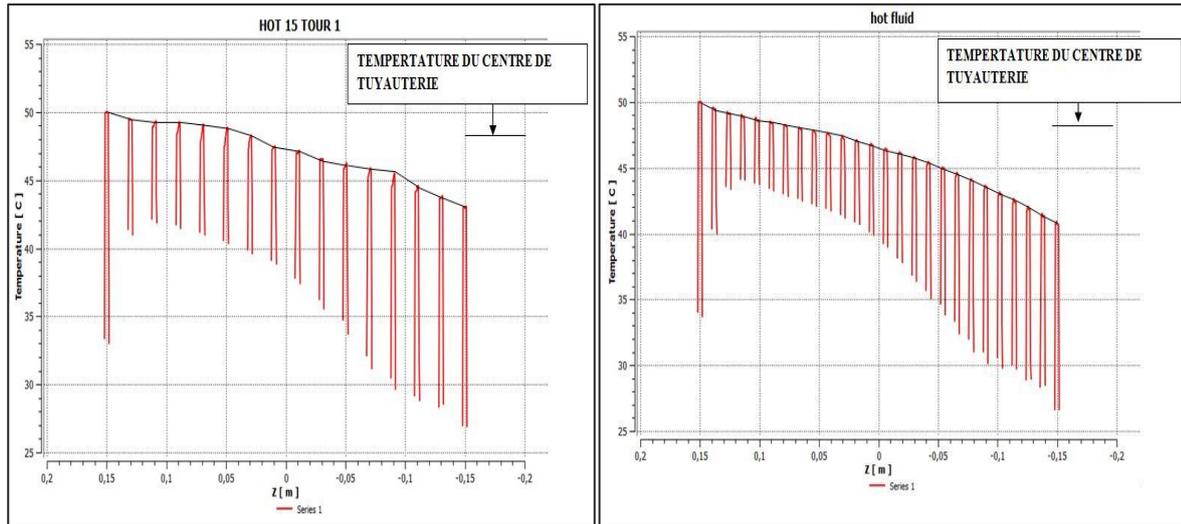
Après l'étude faite dans le cadre de la variation de température d'entrée de l'eau chaude pour des valeurs de 50°C et 60°C appliquées expérimentalement sur un échangeur de chaleur à faisceau et calandre et numériquement sur un échangeur de chaleur à tube spiralé de 15 tours et de 25 tours et dans les mêmes conditions, l'écart de température d'entrée et de sortie de l'eau coté chaud et froid en fonction de la distance en configuration, contre-courant est montrée sur la Figure IV.1 (a et b), on remarque que la température de l'eau froide augmente avec l'augmentation de la distance dans les trois types d'échangeurs, par contre la température de l'eau chaude diminue quand la distance augmente. Cela indique qu'il y a une proportionnalité directe entre la température d'entrée et de sortie de l'eau froide et la distance, relation inverse entre la température d'entrée et de sortie de l'eau chaude et la distance. La différence entre les températures chaudes et froides indique qu'il y a un échange de chaleur entre l'eau chaude et l'eau froide.

On remarque aussi que le refroidissement de l'eau chaude dans le cas d'un échangeur de chaleur à tube spiralé de 25 tours est meilleur comparant à celui de l'échangeur de

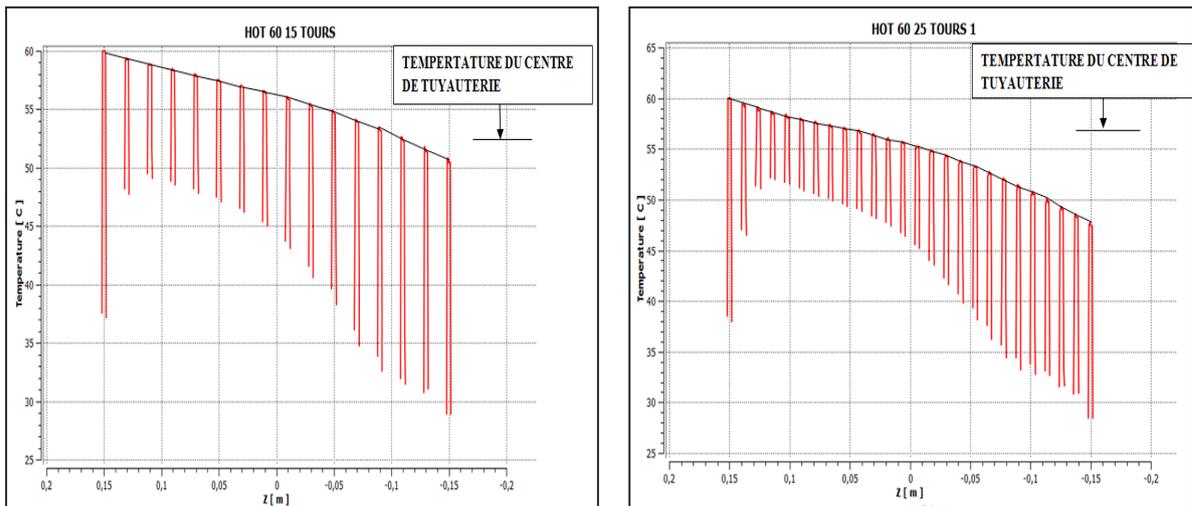
## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

chaleur à faisceau et calandre et à tube spiralé de 15 tours.

En plus, l'échangeur à faisceau et calandre pourrait avoir des limitations en termes de surface d'échange en raison de sa conception ce qui le place en dernière position en terme d'efficacité thermique par rapport les autres types d'échangeur qui possèdent des mêmes conditions et les mêmes matériaux.



(a)



(b)

**Figure IV.2 :** Ecart de température du centre de tuyauterie chaude en fonction de la distance (température dans chaque spire) pour une température d'entrée de (a) : 50°C et (b) : 60°C

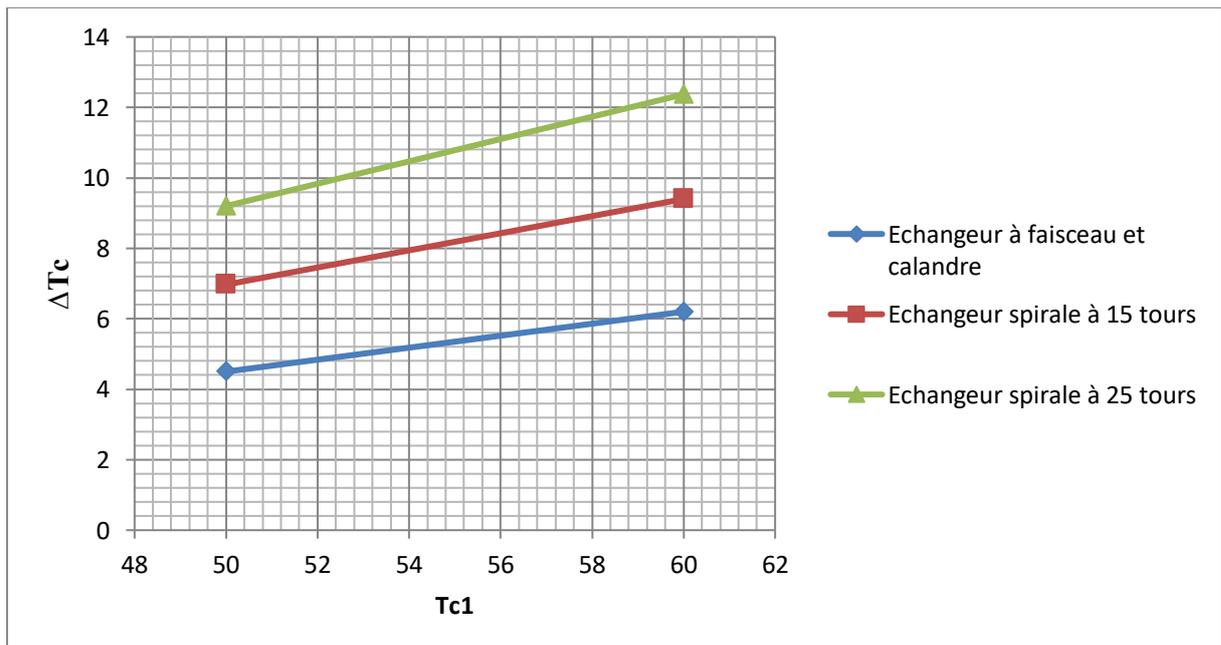
## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Après l'étude numérique faite dans le cas de changement de température d'entrée de l'eau chaude de l'échangeur de chaleur à tube spiralé de 15 tours et 25 tours, l'écart de température du centre de tuyauterie chaude (température dans chaque spire) en fonction de la distance pour une température d'entrée de 50°C et 60°C est montrée sur la **Figure IV.2 (a et b)**. On remarque que la température de l'eau chaude diminue avec l'augmentation de la distance, et on note également que la température de l'eau chaude la plus élevée existe dans le centre de tuyauterie dans chaque spire. Cette température commence à diminuer, Costa logique à cause de l'échange conductif à travers la paroi et convectif entre la paroi et le fluide soit coté chaud ou froid.

Il est à noter aussi que le refroidissement de l'eau chaude dans l'échangeur de chaleur à tube spiralé de 25 tours est toujours supérieur à celui de l'échangeur de chaleur à tube spiralé de 15 tours. Costa logique puisque.

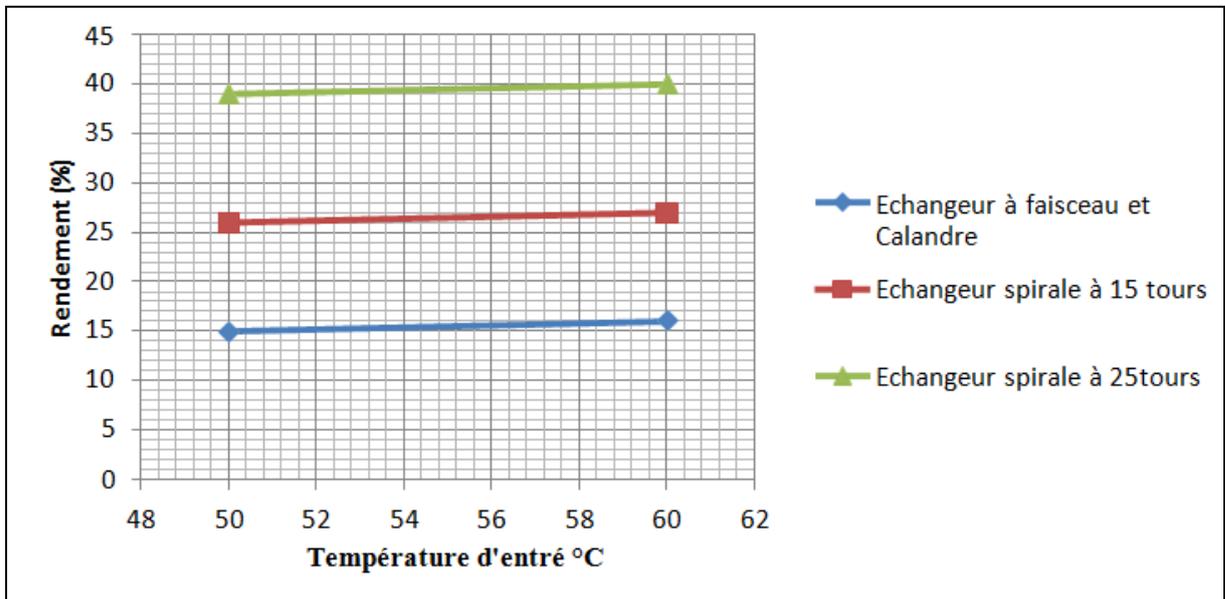
L'augmentation du nombre de spire se traduit directement par une augmentation de la surface d'échange et par conséquent un meilleur transfert thermique.

Donc, on conclut qu'avec les mêmes dimensions extérieures notamment le volume de la coque, l'échangeur avec plus de tours aura une configuration plus dense. Cela peut augmenter la surface d'échange interne et améliorant l'efficacité du transfert de chaleur.



## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

**Figure IV.3 :** Ecart de température coté chaud ( $\Delta T_c$ ) pour les trois types d'échangeurs en fonction de température d'entrée.



**Figure IV.4:** Rendement en fonction de température d'entrée de l'eau chaude pour les trois types d'échangeurs

La Figure(IV.3) montre les différences de température 'entrée – sortie' de l'eau chaude obtenues pour des températures d'entrée chaude différentes et pour les trois types d'échangeurs testés. Il est évident que l'écart  $\Delta T_c$  augmente avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau chaude, en plus, les trois types d'échangeur présentent les mêmes linéarités et les mêmes allures.

La différence de températures dans l'échangeur de chaleur à spirale de 25 tours est plus grande par rapport les autres échangeurs, elle est de l'ordre de 150 Pourcent par rapport à celui de 15 tours et 200 Pourcent par rapport à celui à faisceau et calandre. Cela indique que les performances de transfert de chaleur peuvent être maximisées au double pour la même calandre et les mêmes conditions en utilisant un échangeur à spire.

La Figure ( IV.4) montre le rendement en fonction de la température d'entrée de l'eau chaude dans la circulation de contre-courant pour les trois cas d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre, à tube spiralé de 15 tours et à tube spiralé de 25 tours. Ici on

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau chaude.

On remarque également que le rendement de l'échangeur de chaleur à tube spiralé de 25 tours est meilleur que l'échangeur à faisceau et calandre et à spiralé de 15 tours.

### IV.1.2. Effet de variation de débit chaud

Les **tableaux IV.2** (a et b) montrent, pour des débits variés, les températures d'entrées et sorties coté chaud et froid, la différence entre les deux ( $\Delta T_c$  et  $\Delta T_f$ ) tirée par l'expérience dans l'échangeur à faisceau et calandre et par l'étude numérique dans l'échangeur à tube spiralé de 15 tours et 25 tours, aussi le rendement après l'avoir calculé.

<b>Echangeur à faisceau et calandre (expérimental)</b>								
$Q_{vc}$ (L/min)	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$ (L/min)	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
2	50	46.5	3.5	1.5	20.9	25.9	5	17
<b>Echangeur spirale 15 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
2	50	46.35	3.65	1.5	20.9	29.009	8.10	27
<b>Echangeur spirale 25 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
2	50	45.04	4.96	1.5	20.9	33.83	12.93	44

(a)

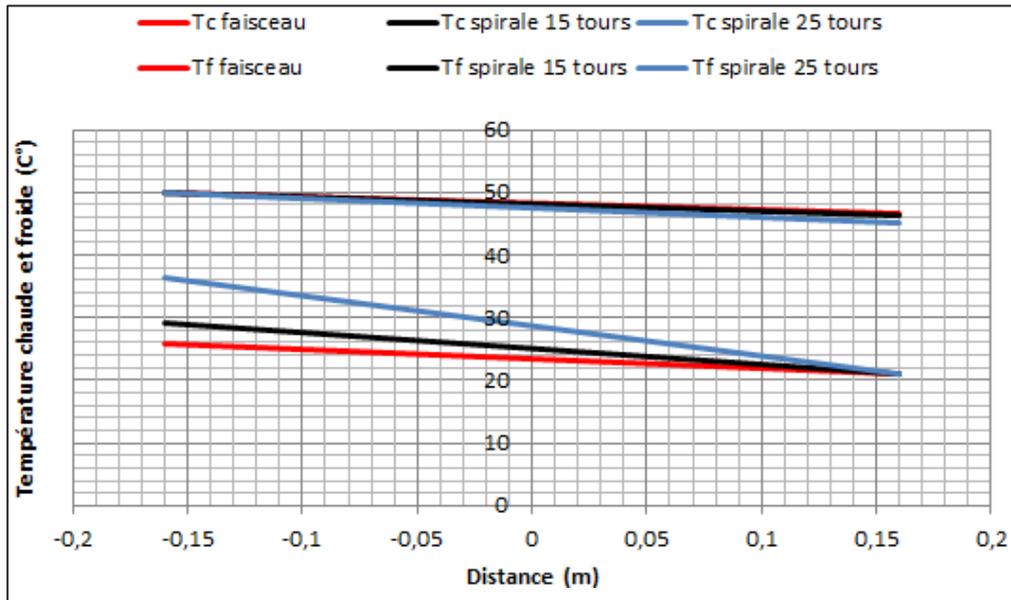
<b>Echangeur à faisceau et calandre (expérimental)</b>								
$Q_{vc}$ (L/min)	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$ (L/min)	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
2	60	55.6	4.4	1.5	22.6	28.9	6.3	16
<b>Echangeur spirale 15 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
2	60	55.32	4.68	1.5	22.6	33.8	11.20	30
<b>Echangeur spirale 25 tours (Numérique)</b>								

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

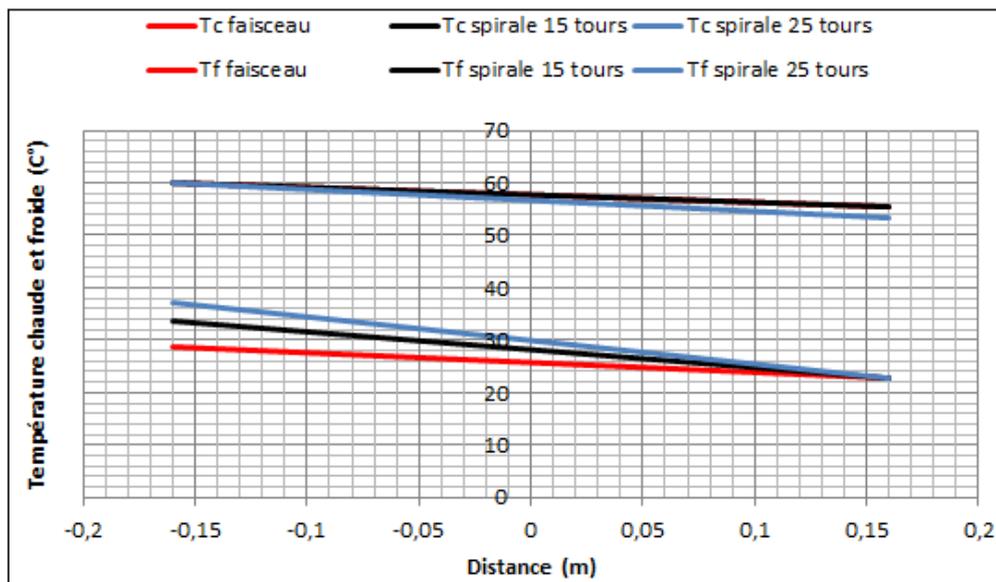
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
2	60	53.5	6.5	1.5	22.6	37.18	14.58	39

(b)

**Tableau IV.2 :** Récapitulatif des données d'entrées et de sorties pour les trois types d'échangeurs et pour un débit d'entré coté chaud de (a) : 2 et 50°C et (b) : 2et 60°C



(a)

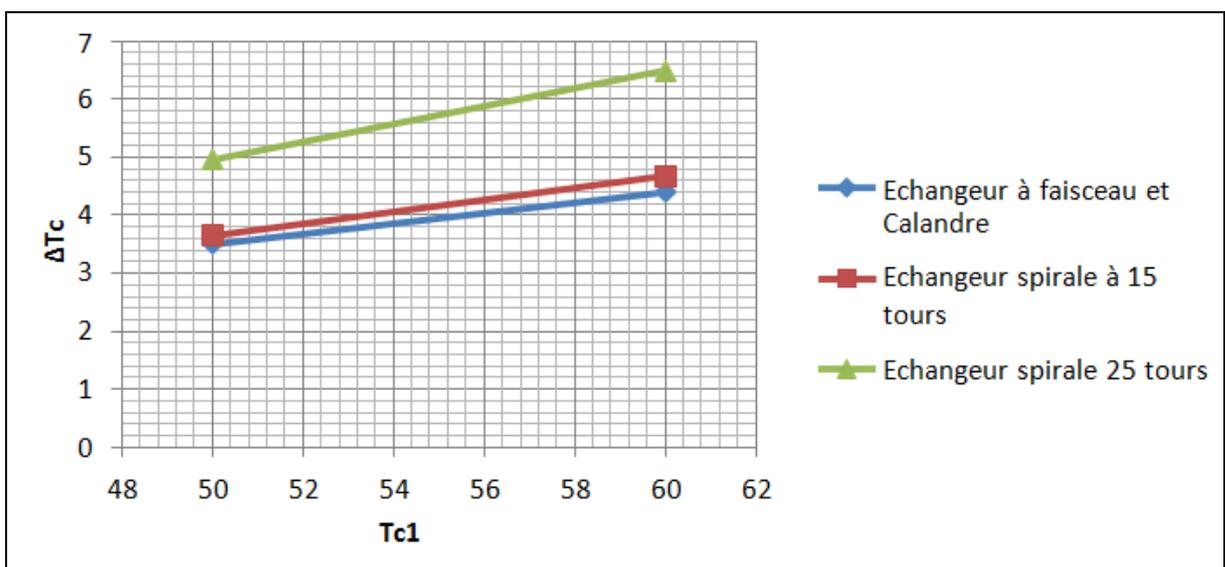


(b)

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

**Figure IV.5** : Variation de température d'entrée et de sortie coté chaud et froid en fonction de distance pour les trois échangeurs pour un débit (a) : 2 et 50°C et (b) : 2 et 60°C

Sur la **Figure (IV.5)**, la variation de température de l'entrée et de sortie chaude et froide en fonction de la distance, dans le cas de changement de débit de l'eau chaude pour un écoulement à contre-courant et pour les trois échangeurs de chaleur à faisceau, à spiralé 15 tours et à spiralé de 25 tours. On remarque que la température de sortie de l'eau chaude est inférieure à celle de son entrée avec l'augmentation de la distance, car il y a eu refroidissement de la température chaude, la température de l'eau froide augmente avec l'augmentation de la distance. Cette diminution et augmentation est due à la modification et à l'augmentation du débit d'eau chaude. On note également que ce débit contribue à la réduction de l'écart de température entre l'entrée et la sortie du l'eau chaude et inversement pour l'eau froide, car il aura moins de temps pour échanger de la chaleur avec l'échangeur.

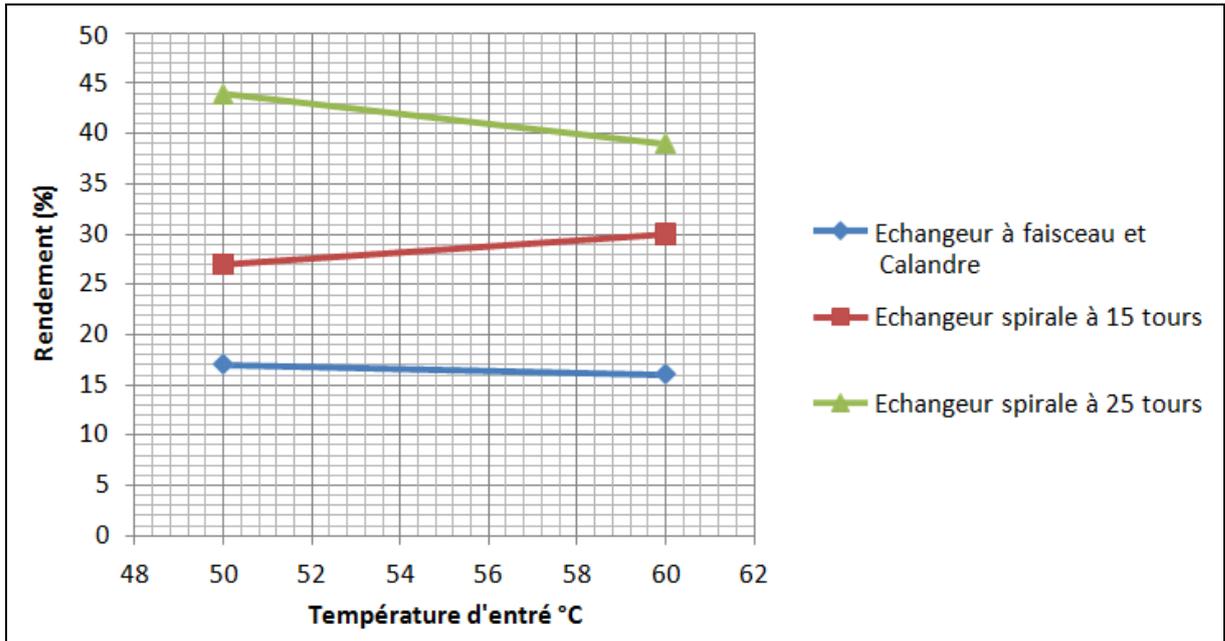


**Figure IV.6** : Ecart de température coté chaud ( $\Delta T_c$ ) pour les trois types d'échangeurs en fonction de température d'entrée.

Après l'étude faite dans le cas de variation de débit de l'eau chaude, la Figure (IV.6) présente l'écart de la température « entré - sorti » coté chaud à travers de trois types

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

d'échangeurs en fonction de la température d'entrée de l'eau chaude. On remarque que  $\Delta T_c$  augmente avec l'augmentation de la température d'entrée chaude, alors il y a une relation directe entre eux. Cela indique que le transfert de chaleur s'effectue de la meilleure façon possible. Il est noté également dans l'échangeur de chaleur à spirale de 25 tours le  $\Delta T_c$  est grand, ce qui prouve qu'il transfère mieux la chaleur.



**Figure IV.7** : Rendement en fonction de température d'entrée de l'eau chaude.

La **Figure (IV.7)** montre le rendement en fonction de température d'entrée de l'eau chaude pour les trois cas d'un échangeur de chaleur à faisceau et à tube spiralé de 15 tours et à tube spiralé de 25 tours. Ici on remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau chaude dans les trois types de l'échangeur. Il est à noter que le rendement de l'échangeur de chaleur à tube spiralé de 25 tours est meilleur que le rendement dans les autres échangeurs.

### IV.1.3.Effet de variation de débit froid

Les **tableaux IV. 3** (a et b) montrent, pour des débits variés, les températures d'entrées et sorties coté chaud et froid, la différence entre les deux ( $\Delta T_c$  et  $\Delta T_f$ ) tirée par l'expérience dans l'échangeur à faisceau et calandre et par l'étude numérique dans l'échangeur à tube spiralé de 15 tours et 25 tours, aussi le rendement après l'avoir calculé.

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

<b>Echangeur à faisceau et calandre (expérimental)</b>								
$Q_{vc}$ (L/min)	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$ (L/min)	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	50	44.7	5.3	2	20.3	24.1	3.8	18
<b>Echangeur spirale 15 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	50	42	8	2	20.3	27.33	7.03	26
<b>Echangeur spirale 25 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	50	39.43	10.57	2	20.3	30.6	10.3	35

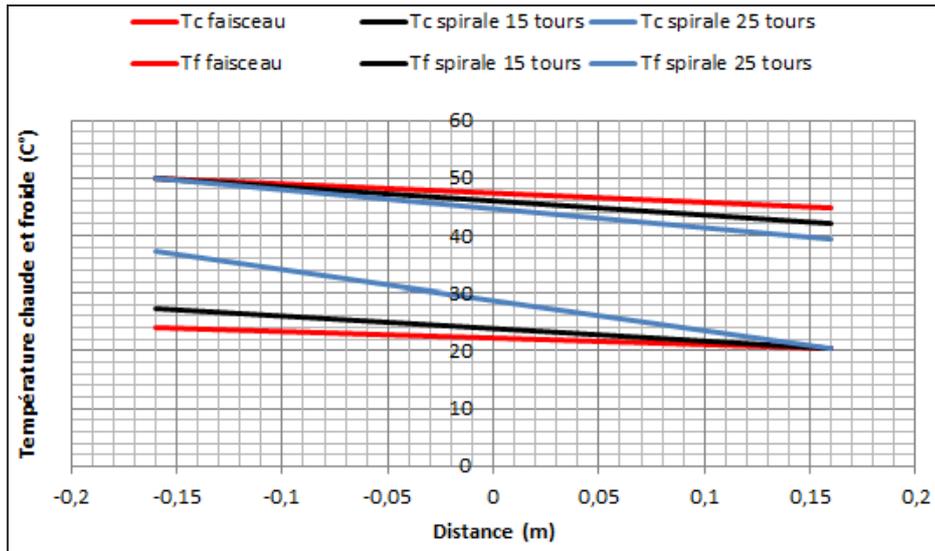
(a)

<b>Echangeur à faisceau et calandre (expérimental)</b>								
$Q_{vc}$ (L/min)	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$ (L/min)	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	60	52.7	7.3	2	21.2	25.5	4.3	25
<b>Echangeur spirale 15 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	60	49.62	10.38	2	21.2	30.39	9.19	27
<b>Echangeur spirale 25 tours (Numérique)</b>								
$Q_{vc}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$\Delta T_c$	$Q_{vf}$	$T_{f1}$	$T_{f2}$	$\Delta T_f$	$\eta$ (%)
1	60	46.14	13.86	2	21.2	34.75	13.55	36

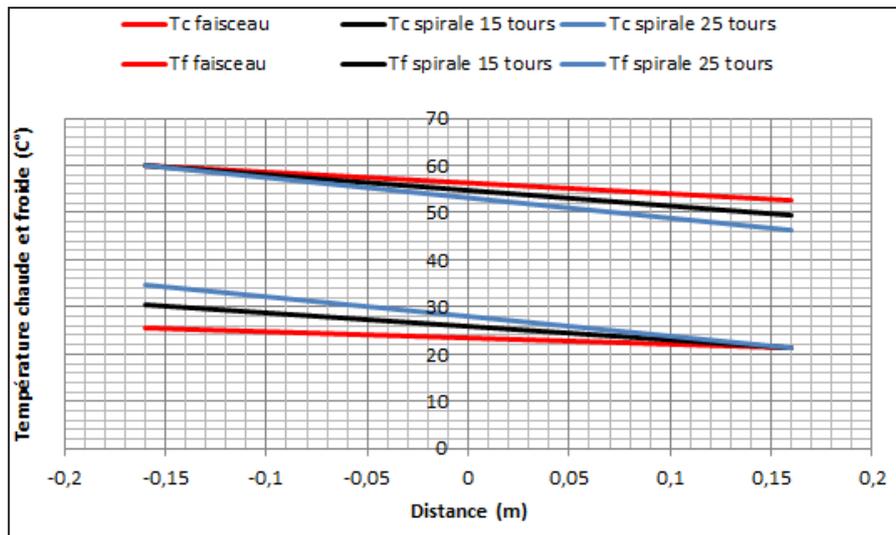
(b)

**Tableau IV.3 :** Récapitulatif des données d'entrées et de sorties pour les trois types d'échangeurs et pour un débit d'entrée coté froid de (a) : 2 et 50°C et (b) : 2 et 60°C

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations



(a)



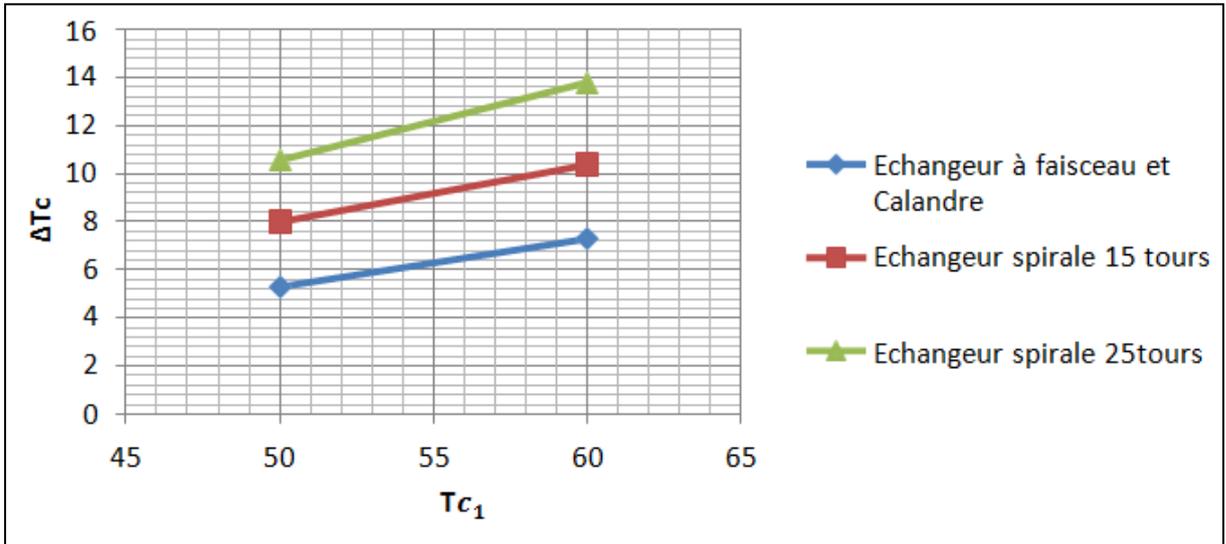
(b)

**Figure IV.8** : Variation de température d'entrée et de sortie coté chaud et froid en fonction de distance pour les trois échangeurs pour un débit de l'eau froide de (a) : 2 et 50°C et (b) : 2 et 60°C

Sur la **Figure (IV.8)**, la variation de température de l'entrée et de sortie chaude et froide en fonction de la distance, dans le cas de changement de débit de l'eau froide pour un écoulement à contre-courant et pour les trois échangeurs de chaleur à faisceau, à spiralé 15 tours et à spiralé de 25 tours. On remarque la température de l'eau froide augmente avec l'augmentation de la distance. Cette augmentation est due à la modification et à

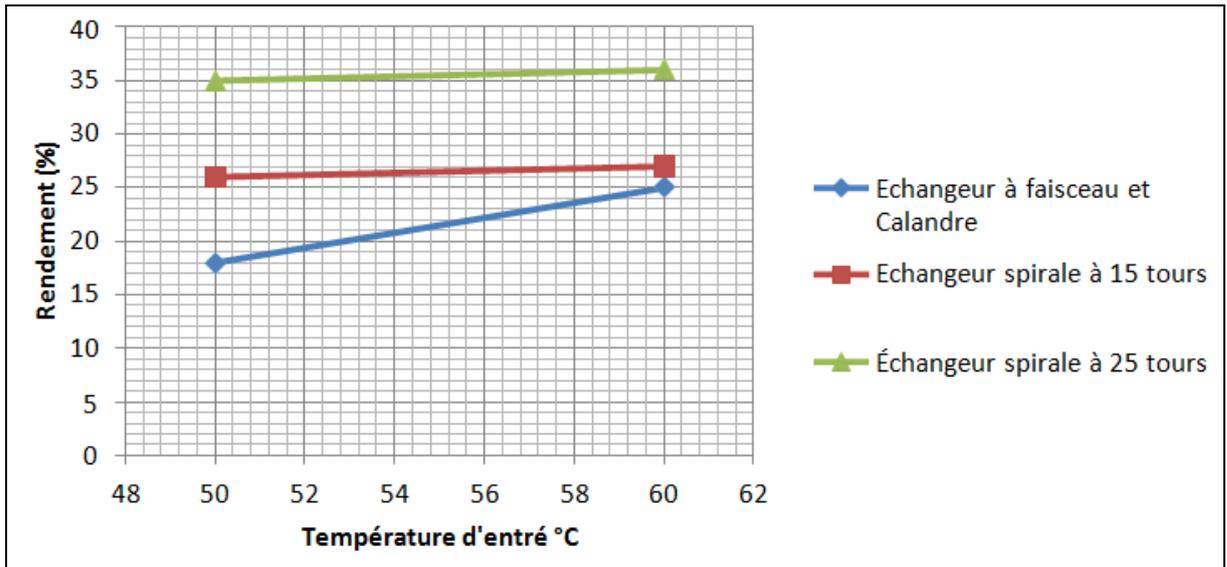
## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

l'augmentation du débit d'eau froid. On note également que ce débit contribue à augmenter la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'eau froide, car il aura moins de temps pour échanger de la chaleur avec l'échangeur.



**Figure IV.9** : Ecart de température coté chaud ( $\Delta T_c$ ) pour les trois types d'échangeurs en fonction de température d'entrée.

La Figure(IV.9) représente l'écart de la variation de la différence de la température chaude  $\Delta T_c$  à travers de trois échangeurs de chaleur en fonction de la température d'entrée chaude (cas 3). On remarque que la différence de la température d'eau chaude croissante avec l'augmentation de la température de l'entrée d'eau chaude, Cela suggère que le transfert de chaleur se déroule de la manière la plus optimale. Dans l'échangeur de chaleur à tube de 25 tours le  $\Delta T_c$  est grand par rapport les autres, donc en conclu que cet échangeur est meilleur.



**Figure IV.10** : Rendement en fonction de température d'entrée de l'eau chaude.

La variation de rendement en fonction de la température d'entrée de l'eau chaude (cas 3) représente dans la **Figure(IV.10)** dans le cas de variation de débit de l'eau froide de trois modes d'échangeur à faisceau et calandre, à spiralé de 15 tours et à spiralé de 25 tours. On observe, que le rendement de trois échangeurs de chaleur augmente avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau chaude. Ici on remarque que le rendement de l'échangeur de chaleur à tube spiralé de 25 tours est meilleur que le rendement de l'échangeur de chaleur à faisceau et calandre et l'échangeur de chaleur à tube spiralé de 15 tours.

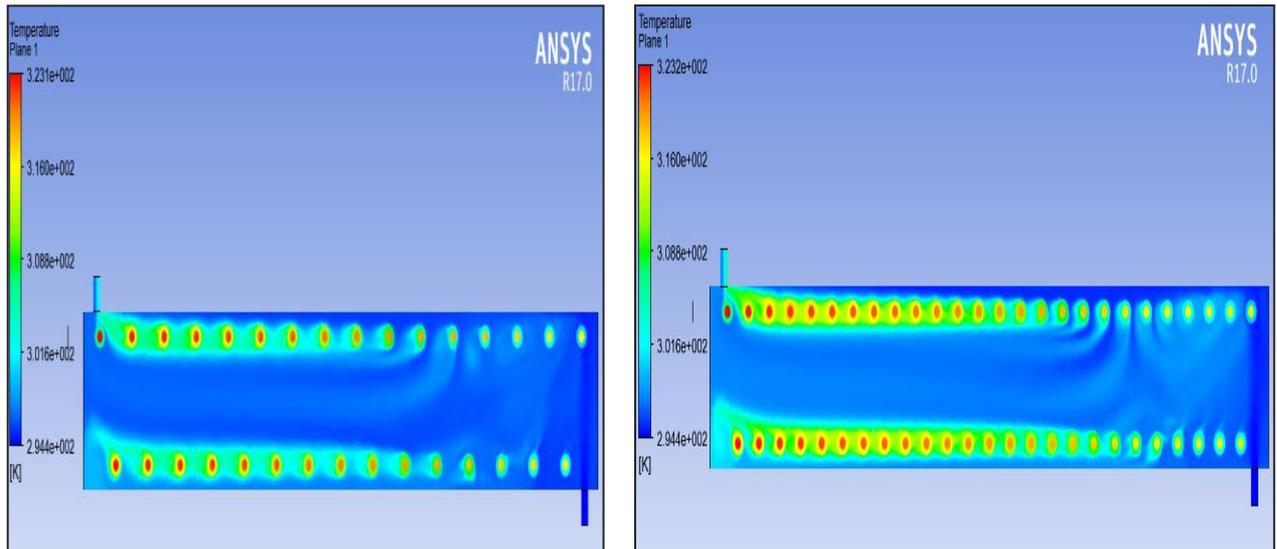
### IV.2.Contour de température

#### a) Cas de variation de température d'entrée de l'eau chaude « 50 °C et 60 °C »

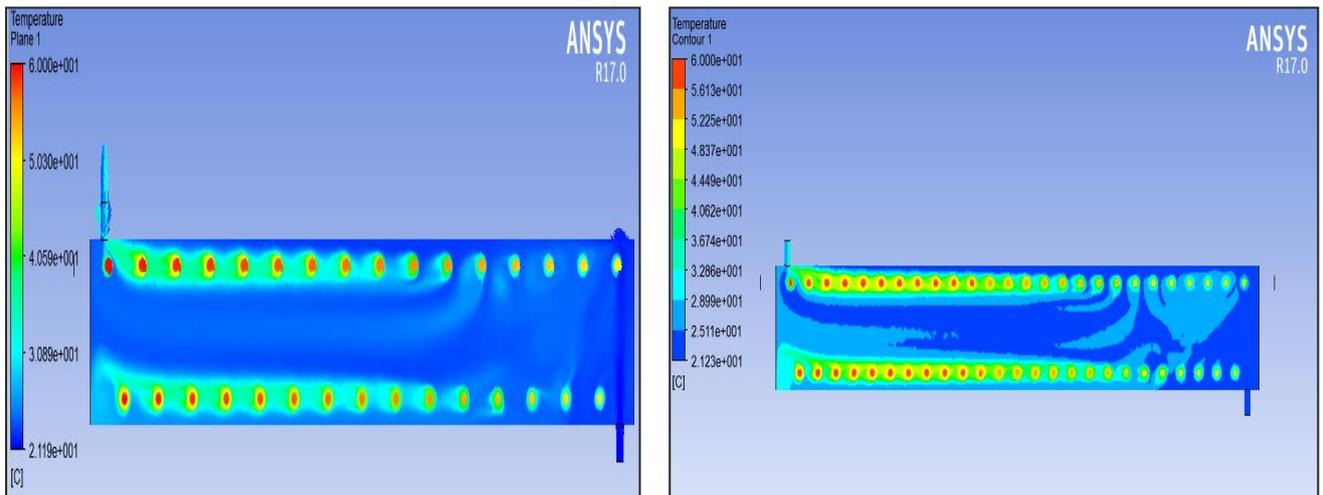
✚ **Cas 1** :  $T_{c1} = 50$  °C,  $T_{f1} = 21,3$  °C,  $Q_c = 1$  L/min,  $Q_f = 1,5$  L/min

✚ **Cas 2** :  $T_{c1} = 60$  °C,  $T_{f1} = 21,3$  °C,  $Q_c = 1$  L/min,  $Q_f = 1,5$  L/min

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations



(a)



(b)

**Figure IV.11** : Contour de température à droite à gauche (a) : cas 1 et (b) : cas 2

**La Figure IV.11 (a et b)** représente la répartition de la chaleur de l'eau froide dans le tube spiralé pour les deux types « à 25 et à 15 spires » respectivement pour les deux températures d'entrées de l'eau chaude 50 °C et 60 °C. On remarque que le fluide chaud commence à se refroidir progressivement dans chaque spire, en revanche, l'eau froide reçoit de la chaleur dégagée par le tube par la convection entre la paroi extérieure de tube

## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

spiralé et le fluide. Une augmentation de la température de « 21.3°C à 28.84°C » et de « 21.3°C à 31.6°C » dans le tube spiralé de 15 tours et de « 21.3°C à 32.5°C » et de « 21.3°C à 36.5°C » dans le tube de 25 tours est également assurée respectivement pour les deux températures d'entrées de l'eau chaude 50 °C et 60 °C.

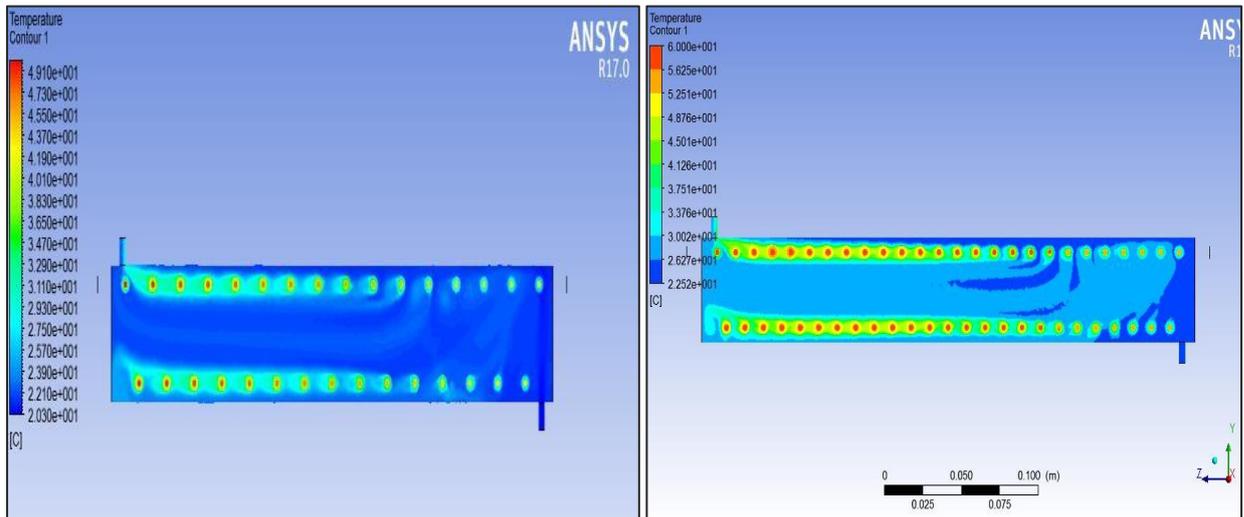
Cette figure montre également l'échange thermique de l'eau chaude en traversant le tube spiralé, l'eau chaude cède de la chaleur et sa température diminue à la sortie de tube, sa diminution varie « 50°C à 43.03°C » et de « 60°C à 50.6c° » pour l'échangeur de 15 tours et de « 50°C à 40.8C° » et de « 60°C à 47.63°C » pour l'échangeur de 25 tours, à cause de transfert de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur de tube spiralé.

Finalement avec plus de nombre de spires, le fluide prend plus de temps dans l'échangeur, ce qui permet plus d'évacuation de la chaleur.

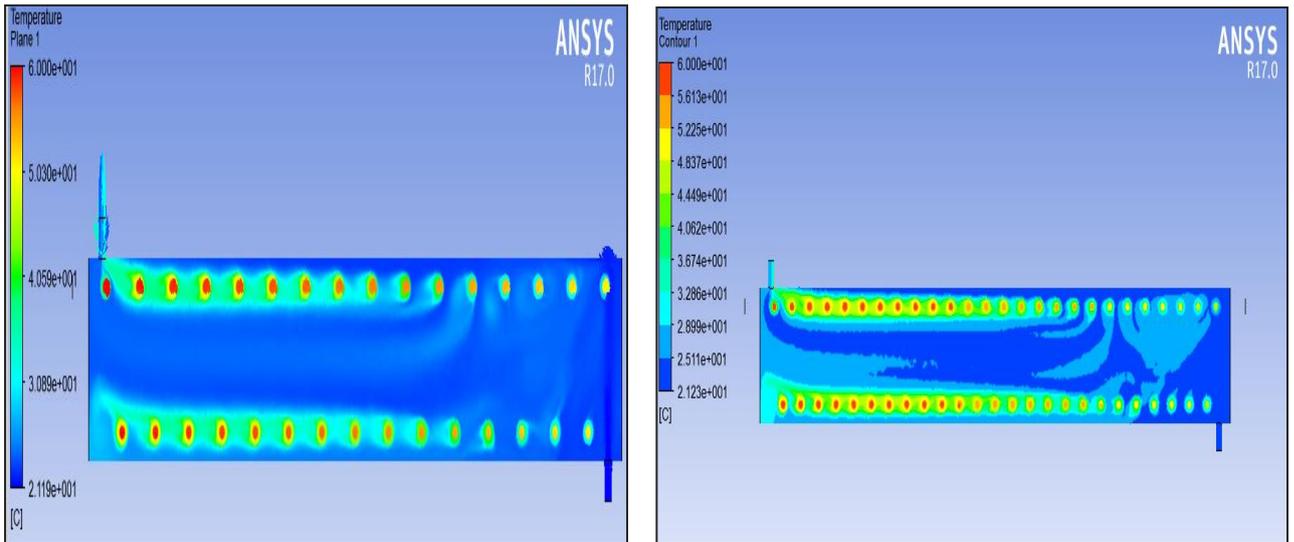
### b) Cas de variation de débit chaude

✚ **Cas 1 :**  $T_{c1} = 50\text{ °C}$ ,  $T_{f1} = 21,3\text{ °C}$ ,  $Q_c = 2\text{ L/min}$ ,  $Q_f = 1,5\text{ L/min}$

✚ **Cas 2 :**  $T_{c1} = 60\text{ °C}$ ,  $T_{f1} = 21,3\text{ °C}$ ,  $Q_c = 2\text{ L/min}$ ,  $Q_{f1} = 1,5\text{ L/min}$



(a)



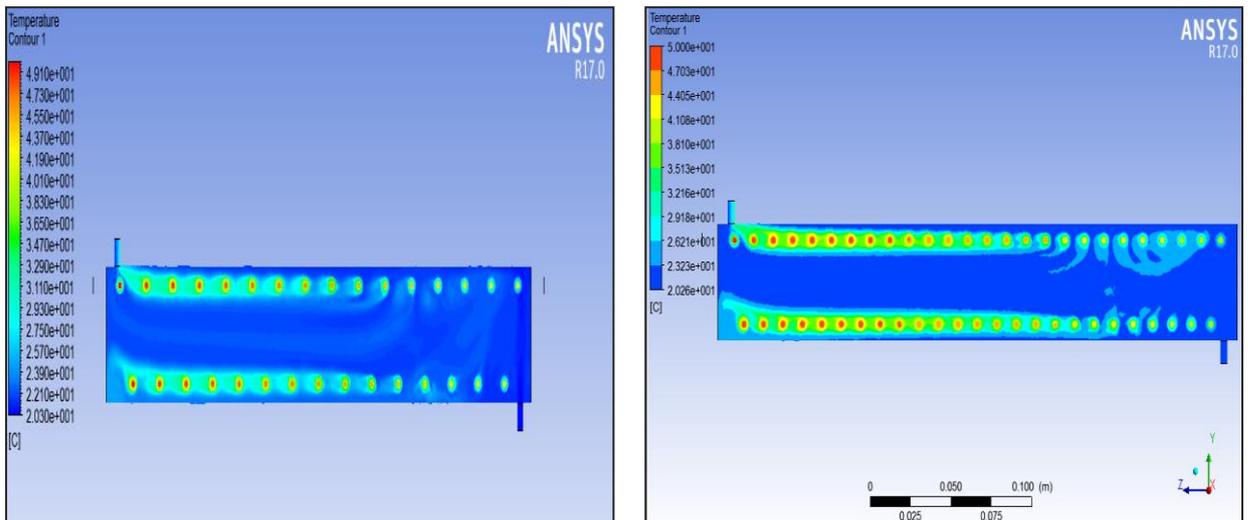
(b)

Figure IV.12 : Contour à droite, 25 tours et à gauche, 15 tours, (a) : cas 1 et (b) : cas 2

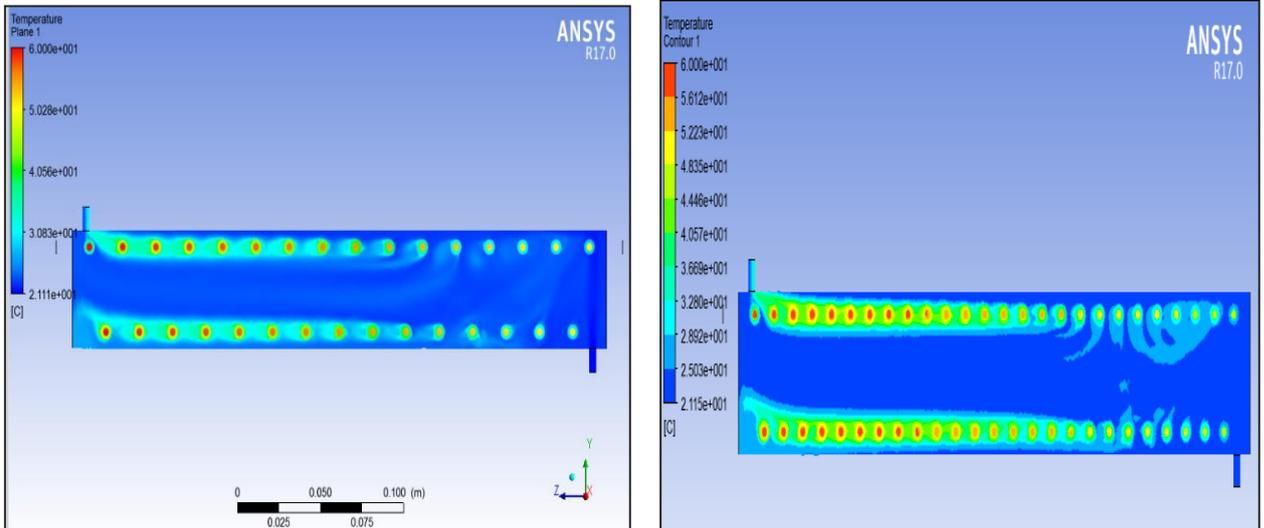
c) Cas de variation de débit de l'eau froide

✚ Cas 1 :  $T_{c1} = 50\text{ °C}$ ,  $T_{f1} = 21,3\text{ °C}$ ,  $Q_c = 1\text{ L/min}$ ,  $Q_f = 2\text{ L/min}$

✚ Cas 2 :  $T_{c1} = 60\text{ °C}$ ,  $T_{f1} = 21,3\text{ °C}$ ,  $Q_c = 1\text{ L/min}$ ,  $Q_{f1} = 2\text{ L/min}$



(a)



(b)

**Figure IV.13 :** Contours de températures des fluides le long de l'échangeur, à droite, 25 tours et à gauche, 15 tours, (a) :cas 1 et (b) :cas 2 .

La Figure (IV.13) montre l'échange thermique dans l'échangeur spirale de 15 et 25 tours, on remarque que l'eau froide reçoit de la chaleur dégagé par le tube intérieure ,le transfert de chaleur par convection entre la paroi extérieure de tube et le fluide assure, respectivement pour le cas 1 et 2 , une augmentation de température de l'eau froide de « 20.9°C à 29°C» et de « 22.6°C à 33.8°C» et une diminution de température de l'eau chaude de « 50°C à 46.35°C» et de « 60°C à 55.32c°» pour l'échangeur de 15 tours, et une augmentation de température de l'eau froide de « 20.9°C à 33.83°C» et de « 22.6°C à 37.18°C» et une diminution de température de l'eau chaude de « 50 °C à 45.04°C» et de « 60° C à 53.5°C» pour l'échangeur de 25 tours, ce qui montre que lorsque le débit de l'eau chaude augmente sa température de sortie augmente aussi et cela pour les deux échangeurs.

On remarque que lorsque le débit coté chaud augmente, la différence de température coté froid augmente aussi.

En résumé, quoique la variation de débit coté chaud ou froid, Les champs de température présentés sur les figures 12 et 13 sont que des reflets des structures convectives et dynamiques de l'écoulement. En effet, il est clair que de faibles gradients de températures

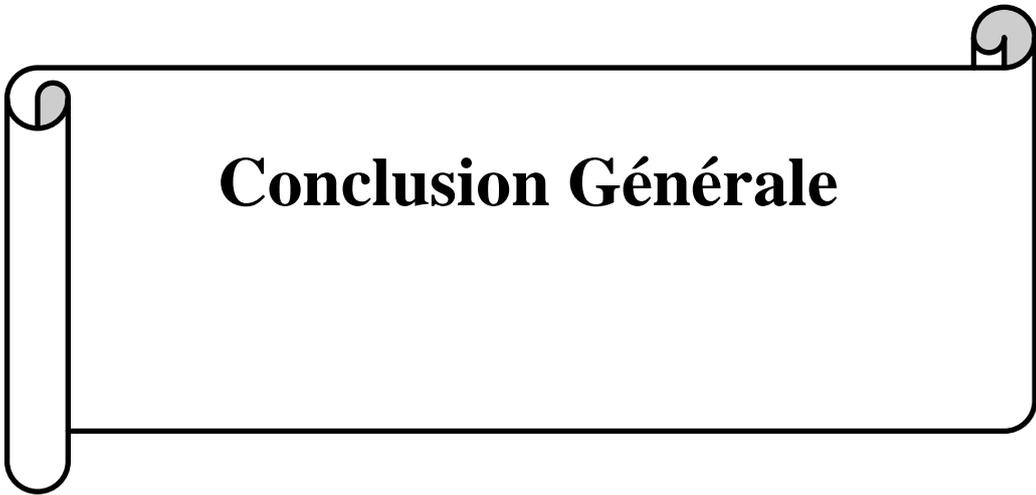
## Chapitre IV : Résultats et Interprétations

---

sont générés près de l'entrée de la calandre, car l'eau est toujours froide. Cependant, la température a commencé à augmenter de plus en plus à partir du milieu approchant de la sortie. Ceci est dû à l'échange de chaleur entre l'eau et la face externe des spires. L'augmentation du nombre de spires, provoque une perturbation sur le plan dynamique de l'écoulement, ce qui améliore, en revanche, l'effet de mélangeage et l'échange, cela est bien présenté sur la structure thermo convectif de l'écoulement.

### IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre une étude numérique et expérimentale de l'écoulement tridimensionnel de l'eau dans un échangeur de chaleur à calandre et de configuration interne variable a été présentée. Les résultats numériques et expérimentaux, obtenus respectivement par la méthode des volumes finis utilisant le code fluent et par le banc d'essai TD360, sont présentés pour analyser le comportement thermique d'un écoulement turbulent. Trois types d'échangeur de chaleur «**à faisceau et calandre, à tube spiralé de 15 tours et à spiralé de 25 tours**» ont été analysés et comparés pour différentes valeurs de débit d'entrée de fluide coté chaud et froid et pour différente température d'entrée de l'eau chaude.

A decorative scroll-like frame with a black outline and rounded corners. The frame is oriented horizontally and contains the text "Conclusion Générale" in a bold, black, serif font. The frame has a small circular detail at the top right corner and a vertical bar on the left side, suggesting it is a scroll or a banner.

**Conclusion Générale**

# Conclusion Générale

---

## Conclusion Générale

Le présent travail de mémoire de fin d'études est une étude comparative portant sur trois types d'échangeurs de chaleur : les échangeurs à faisceau et calandre (étude expérimentale), les échangeurs spirale de 15 spires (étude numérique) et les échangeurs spirale de 25 tours (étude numérique). Tous ces échangeurs ont été étudiés dans les mêmes conditions, avec les mêmes dimensions et les mêmes conditions aux limites.

Cette étude expérimentale a été menée au laboratoire de mécanique de l'Université Belhadj Bouchaib Ain T'émouchent, suivie par une étude numérique effectuée à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT. Une comparaison entre les résultats expérimentaux de l'échangeur à faisceau et calandre et les résultats numériques des échangeurs à spirale de 15 et 25 tours a été réalisée.

L'étude a également porté sur l'influence de la variation de la température d'entrée de fluide chaud ainsi que la variation des débits de fluides chaud et froid pour les trois types d'échangeurs. Une analyse comparative des résultats a été effectuée.

À la lumière des résultats obtenus, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- L'échange de chaleur entre les deux fluides augmente avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide chaud
- L'augmentation du débit chaud entraîne une diminution de l'écart de température
- Même si les dimensions extérieures des trois échangeurs sont les mêmes, la surface d'échange peut varier
- l'échangeur avec un plus grand nombre de tours aura une configuration plus dense. ce qui peut augmenter la surface d'échange interne et améliorer l'efficacité du transfert de chaleur.
- L'échangeur à faisceau et calandre pourrait présenter des limitations en termes de surface d'échange et d'efficacité thermique en raison de sa conception
- L'augmentation de la surface d'échange conduit à une augmentation de l'écart de température entre l'entrée et la sortie du système
- L'échangeur spiralé à 25 tours est nettement plus performant que l'échangeur spiralé à 15 tours

L'échangeur spiralé à 15 tours est supérieur à l'échangeur à faisceau et calandre