

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 Bouchaïb  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département Génie Mécanique



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

**Etude Expérimentale et numérique Sur Deux  
Échangeur de chaleur a tube concentrique et a faisceau et calandre**

Présenté Par :

1) *M. DJIDJ Houari Mourtadha*

2) *M. BEKKAR Abdallah*

Devant le jury composé de :

<b>Pr. BENSAAD</b> Bourassia ; Prof	Président
<b>Mr. GUENDOOUZ</b> Bouhelal ; MAA	Examineur
<b>Dr. BENZENINE</b> Hamidou ; MCA	Encadrant

*Année Universitaire 2022/2023*

# REMERCIEMENT

*La synthèse de notre étude sur le calcul de bilan énergétique d'un échangeur de chaleur à tubes et à faisceaux de tubes et calandre se fait traduire de prime abord par le grand*

*Remerciement du dieu tout puissant qui nous a offert son gracieux concours à l'élaboration de ce noble ouvrage*

*Aussi nous ferons connaître les sentiments qu'on nourrit à l'égard de notre*

*Encadreur : Dr. BENZENINE Hamidou.*

*Également nous signalons la grande estime que l'on témoigne aux membres des jurys*

*Qui nous ont prêtés toutes les attentions et leurs précieux concours aux différentes phases*

*Descriptives à notre mémoire*

*Enfin, nous remercions l'ensemble des membres de notre département, qui ont mis à notre disposition leurs propre secours.*

## ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد خصائص المبادل الحراري الذي يحتوي على جهاز لنقل الطاقة الحرارية من مائع إلى آخر دون خلطها. أجريت دراسة السلوك الحراري للتدفق في نوعين مختلفين من المبادلات الحرارية ، مع أنبوب متحد المركز ومع حزمة وقشرة. تم التأكد من مقارنة النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها لهذين النوعين من المبادلات لدراسة تأثير تغيير درجة الحرارة وتغيير معدل التدفق في تيارات نقل مختلفة ، التيار المشترك والتيار المعاكس على كفاءة المبادلات الحرارية. المستخدمة والسلوك الديناميكي للسوائل الساخنة والباردة. كما تم إجراء دراسة عددية بواسطة برنامج ANSYS FLUENT من أجل فهم أفضل للبنية الحرارية الحرارية للتدفق في المبادل الحراري للفديفة والأنبوب.

## Résumé

L'objectif de cette étude est de déterminer les caractéristiques d'un échangeur de chaleur qui présente un dispositif permettant de transférer l'énergie thermique d'un fluide vers un autre sans les mélanger. L'étude du comportement thermique d'un écoulement dans deux types différents d'échangeur de chaleur, à tube concentrique et à faisceau et calandre a été effectuée. Une comparaison des résultats expérimentaux obtenus pour ces deux types d'échangeurs a été assurée pour étudier l'influence de la variation de température et la variation de débit en deux courants de transfert différents, le Co-courant et le contre-courant sur l'efficacité des échangeurs de chaleur utilisés et le comportement dynamique des fluides chaud et froid. Une étude numérique a été également effectuée par le logiciel ANSYS FLUENT afin de mieux comprendre la structure thermo convectif de l'écoulement dans un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires et calandre.

## Abstract

The objective of this study is to determine the characteristics of a heat exchanger which has a device for transferring thermal energy from one fluid to another without mixing them. The study of the thermal behavior of a flow in two different types of heat exchanger, with concentric tube and with bundle and shell was carried out. A comparison of the experimental results obtained for these two types of exchangers was ensured to study the influence of the temperature variation and the flow rate variation in two different transfer currents, the Co-current and the counter-current on the efficiency of the heat exchangers used and the dynamic behavior of hot and cold fluids. A numerical study was also carried out by the ANSYS FLUENT software in order to better understand the thermo convective structure of the flow in a shell and tube bundle heat exchanger.

# Sommaire

---

REMERCIEMENT .....	2
ملخص .....	3
Introduction.....	14
CHAPITRE I :Généralités .....	17
I.1 Problématique Générale .....	18
I.2 Notions fondamentales .....	18
Applications .....	18
I.3 Classification des échangeurs .....	19
_2/ Classement suivant le mode de transfert de chaleur .....	19
_ 3/ Classement suivant la disposition des écoulements .....	20
_ 4/ Classement suivant l'état des fluides .....	21
_5 / Classement suivant la compacité de l'échangeur .....	21
_6 / Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange .....	21
I.4 Echange thermiques .....	22
I_4 /_1 conduction .....	22
I_4/_ 2 convections .....	23
I_4/_3 Le rayonnement .....	24
I.5 les différents types d'échangeurs .....	24
I_5/_1- Echangeur à spirales .....	24
I_5/_2 Echangeur à bloc .....	25
I_5/_3 Colonne de bouhy .....	27
I_5/_4Echangeur à ailette .....	27
I_5/_5 Echangeur à faisceau tubulaire horizontal .....	29

# Sommaire

---

I_5/_6- Les échangeurs à faisceau et calandre .....	30
I.6 conclusion .....	31
CHAPITRE II : recherche bibliographique .....	32
II.1 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE .....	33
II.2 Conclusion .....	44
Chapitre III : Matériels et Méthodes .....	45
Partie 01 : Etude expérimentale par le TD360a et TD360c .....	46
III.1.1 Introduction .....	46
III.1.2 Transfert de chaleur .....	46
III.1.3 Description et Caractéristiques techniques .....	47
III.1.3.1 présentation du système .....	47
III.1.3.2 Les procédures de l'installation du système .....	47
III.1.3.3 Les composants du système TD 360 .....	48
III.1.3.4 Description des échangeurs TD360c et TD360a .....	50
III.1.3.5 Système VDAS (VERSATILEDATA ACQUISITION SYSTEM) .....	52
III.1.4 les Avantages et les Inconvénients .....	54
III.1.4.1 échangeur de chaleur à tube concentrique .....	54
III.1.4.2 échangeur de chaleur à faisceau et calandre .....	54
III.1.5 Expériences Réalisées .....	55
III.1.5.1 Effet de variations de température puis le rendement .....	55
III.1.5.2 Effet de variations de débit .....	57
Partie 02 : Etude numérique d'un échangeur de chaleur à tube et calandre par ANSYS FLUENT .....	58
III.2.1 Introduction .....	58
III.2.2 Présentation du logiciel .....	58
III.2.3 Présentation du problème .....	59

# Sommaire

---

III.2.4 Hypothèses simplificatrices .....	61
III.2.5 Équations gouvernantes .....	61
III.2.6 Méthode des volumes finis (MVF) .....	62
III.2.6.1 Principe .....	63
III.2.7 Etapes de la méthode des volumes finis .....	64
III.2.9 Conditions aux limites .....	64
CHAPITRE IV: Résultats et interprétations .....	66
Partie 01: Résultats expérimentaux obtenus par TD360a et TD360c .....	67
IV 1.1 Introduction : .....	67
IV 1.2. présentation et discussion des résultats expérimentaux: .....	67
IV 1.2.1 Effet de variations de Température: .....	67
IV 1.2.2 Effet de variations de débit : .....	74
partie 02: simulation numérique d'un échangeur de chaleur à faisceau .....	78
IV 2.1 Introduction : .....	78
IV 2.2 présentation et discussion des résultats numérique: .....	78
IV 2.2.1 Interprétation des résultats dans le cas de l'effet de variations de Température: .....	78
IV 2.2.2 Interprétation des résultats dans le cas de variations de pression: .....	80
IV 2.2.3 Interprétation des résultats dans le cas de variations de vitesse: .....	81
Conclusion Générale .....	82

# Liste des Tables

---

## CHAPITRE I :

**Tableau I-1** Les avantages et les inconvénients et l'utilisation de l'échangeur à tube Spirale.....13

**Tableau I-2** Les avantages et les inconvénients et l'utilisation de l'échangeur à bloc.....14

**Tableau I-3** Les avantages et les inconvénients et l'utilisation de l'échangeur à Ailette.....15

## CHAPITRE IV :

**Tableau III-1** Evolution des températures de l'eau à l'entrée et à la sortie d'un tube concentrique.....21

**Tableau III-2** Evolution des températures de l'eau à l'entrée et à la sortie d'un faisceau et calandre.....21

**Tableau III-3** Evolution des températures de l'eau à l'entrée et à la sortie d'un tube concentrique & à faisceau et calandre.....25



# Liste des Figures

---

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	circulation à contre-courant	9
<b>Figure I.2</b>	circulation à Co-courant	10
<b>Figure I.3</b>	circulation à courant croisé	10
<b>Figure I.4</b>	types de transfert de chaleur thermiques	13
<b>Figure I.5</b>	échangeur de chaleur spirale	14
<b>Figure I.6</b>	schéma d'un échangeur à bloc	14
<b>Figure I.7</b>	échangeur de chaleur colonne de bouhy	15
<b>Figure I.8</b>	Echangeur thermique formé d'ailettes	16
<b>Figure I.9</b>	échangeur à tête flottante	16
<b>Figure I.10</b>	échangeur à tubes en U	17
<b>Figure I.11</b>	échangeur à plaque tubulaire fixes	17
<b>Figure I.12</b>	schéma typique d'un échangeur à tubes et calandre	18

## Chapitres II

<b>Figure II.1</b>	condenseur a tubes et calandre	21
<b>Figure II.2</b>	le banc d'essai expérimental td360 lie avec le système vidas	22
<b>Figure II.3</b>	échangeur de chaleur a faisceaux tubulaire et calandre	22
<b>Figure II.4</b>	vue en coupe de l'échangeur de chaleur étudié	23
<b>Figure II.5</b>	tranche du tube de l'échangeur tubulaire eau /sol place dans le sol	24
<b>Figure II.6</b>	schéma du dispositif expérimental	24
<b>Figure II.7</b>	divers constituant d'un échangeur de chaleur a faisceau et calandre	Tema 25

## Liste des Figures

---

<b>figure II.8</b>	schéma du système de chauffage	25
<b>figure II.9</b>	coupe de l'échangeur de chaleur	25
<b>figure II.10</b>	dimension caractéristique	26
<b>figure II.11</b>	Cas géométrie simple	26
<b>figure II.12</b>	cas de géométrie avec chicanes	27
<b>figure II.13</b>	cas de géométrie ondulée	27
<b>figure II.14</b>	Echangeur de chaleur a faisceaux tubulaire	28
<b>Chapitres III :</b>		
<b>Figure III.1</b>	banc d'essai td 360	29
<b>Figure III.2</b>	les composants du banc TD360	30
<b>Figure III.3</b>	échangeurtubulaireconcentriqueTD360a	31
<b>Figure III.4</b>	Échangeur de chaleur à faisceau de tubes et calandre TD360c	33
<b>Figure III.5</b>	Matériel VDAS	34
<b>Figure III.6</b>	logiciel VDAS	41
<b>Figure III.7</b>	schéma d'un échangeur de chaleur a tube concentrique	43
<b>Figure III.8</b>	schéma d'un échangeur de chaleur a faisceau et calandre	44
<b>Figure III.9</b>	l'interface de logiciel ANSYS Workbench	44
<b>Figure III.10</b>	La géomètre de l'échangeur de chaleur étudié dans ce travail	45
<b>Figure III.11</b>	Volume de contrôle typique bidimensionnel	46
<b>Figure III.12</b>	Volume de contrôle décalé pour u et v dans un maillage entrelacé	47
<b>Figure III.13</b>	Etapes de méthodes des volumes finis	47

## Liste des Figures

---

### CHAPITRE IV :

<b>Figure IV.01</b>	Température de sortie de l'eau chaude en fonction de température d'entrée de l'eau chaude (Co courant & contre-courant) pour les deux échangeurs	48
<b>Figure .IV02</b>	Température de sortie de l'eau Froide en fonction de température d'entrée de l'eau chaude (Co courant & Contre-courant) pour les deux échangeurs	48
<b>Figure IV.03</b>	rendement de température du circuit chaud (Co courant et contre-courant) en fonction de température d'entrée de l'eau chaude pour les deux échangeurs	49
<b>Figure IV.04</b>	température de sortie de l'eau chaude en fonction de débit (Contre-courant à tube & Contre-courant à faisceau)	49
<b>Figure IV. 05</b>	température de sortie de l'eau froide en fonction de débit (Contre-courant à tube & Contre-courant à faisceau)	50
<b>Figure IV.06</b>	rendement de température du circuit chaude (Contre-courant à tube et contre-courant à faisceau) en fonction de débit	51
<b>Figure IV.07</b>	La distribution de la température des fluides cotés tube et calandre	51
<b>Figure IV.08</b>	Variation de la pression cotés tube et calandre	52
<b>Figure IV.09</b>	Variation de la vitesse cotés tube et calandre	

## Liste des acronymes et abréviation :

---

$C_d$	Coefficient de traînée	[-]
$C_f$	Coefficient de frottement	[-]
$D_h$	Diamètre hydraulique	[m]
$D_K$	Terme de diffusivité turbulente	
$E$	Epaisseur de la chicane	[m]
$G_k, G_\omega$	Termes de production	
$H$	Hauteur du canal	[m]
$K_{in}$	Condition d'entrée pour l'énergie cinétique turbulente	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$L$	Longueur du canal	[m]
$L_1$	Distance entre l'entrée du canal et la première chicane	[m]
$L_2$	Distance entre la deuxième chicane et la sortie du canal	[m]
$Nu$	Nombre de Nusselt	[-]
$P$	Pression	[Pa]
$P_1$	Distance entre les chicanes	[m]
$Pr$	Nombre de Prandtl	[-]
$Re$	Nombre de Reynolds	[-]

## Liste des acronymes et abréviation :

---

$S_k, S_\omega$	Termes sources	
T	Température	[°C]
$T_b$	Température moyenne du fluide	[°C]
$T_w$	Température des parois inférieure et supérieure	[°C]
U	Vitesse du fluide suivant l'axe X	[m/s]
$U_{in}$	Vitesse d'admission	[m/s]
V	Vitesse du fluide suivant l'axe Y	[m/s]
$w_{in}$	Condition d'entrée pour la dissipation turbulente	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$Y_k, Y_\omega$	Termes de dissipation	
$\Gamma_k, \Gamma_\omega$	Coefficient de diffusion	[-]



**Introduction Générale**

# Introduction Générale

---

## Introduction

L'échangeur de chaleur est un appareil thermique de grande importance dans les installations thermiques et énergétique de telle sorte qu'on rencontre au moins un échangeur de chaleur dans une installation thermique. L'échangeur consiste essentiellement à transmettre la chaleur d'une source chaude à une autre source de plus faible température. Il est caractérisé par une grande diversité géométrique.

La transmission de chaleur dans ses appareils est réalisée par :

L'échange de chaleur entre le fluide primaire (le plus chaud) et la paroi séparatrice par convection de chaleur, l'échange de chaleur par conduction thermique dans la paroi et l'échange de chaleur entre la paroi séparatrice et le fluide secondaire par convection de chaleur à la différence des autres appareils thermiques, l'échangeur de chaleur ne contient aucune pièce mécanique mobile.

Dans un échangeur, la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Le même fluide peut conserver son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases (cas des condenseurs et des évaporateurs).

L'étude de ce dispositif est complexe, on doit connaître exactement, sa géométrie (surface d'échange et section de passage des fluides). Ses caractéristiques thermo physiques, les vitesses d'écoulement des fluides, les températures d'entrées des fluides, etc...

Dans le premier chapitre nous exposerons différents types des échangeurs

Le deuxième chapitre est de faire une étude bibliographique sur les échangeurs de chaleur et les modes de transfert de chaleur

Dans le troisième chapitre-nous présentons une étude expérimentale et numérique par AnsysWorkbench d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre & échangeur de chaleur à tube concentrique

Le quatrième chapitre nous présentons les résultats expérimentaux et numérique par AnsysWorkbench d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre & échangeur de chaleur à tube concentrique

## Introduction

---

Les résultats obtenus ont été présentés par des courbes analysées et commentées. L'exploitation de ces résultats et leurs discussions nous mènent à proposer quelques perspectives et finaliser ce travail par une conclusion.





**CHAPITRE I : Généralités**

## I.1 Problématique Générale

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie et donc, par voie de conséquence, de protection de l'environnement. Une grande part de l'énergie thermique (90%) 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 ils sont utilisés principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production de l'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel (chauffage, climatisation, etc.). [1]

Ils constituent donc un des dispositifs clés du thermicien, et sont un composant quasi instable dans la maîtrise de l'énergie [1]. Compte tenu de leurs multiples utilisations, les difficultés rencontrées par les concepteurs d'échangeurs de chaleur sont diverses et variées. Toutefois, un des principaux problèmes de conception auxquels ils se heurtent à trait au coût total (coût de fonctionnement et coût d'investissement). En effet, le coût total reste encore, et toujours, l'un des préoccupations des chercheurs.

## I.2 Notions fondamentales

L'échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans contact direct entre les deux fluides. Le même fluide peut conserver son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases : c'est le cas des condenseurs, évaporateurs, bouilleurs, ou des tours de refroidissement. En principe, pour les échangeurs les plus courants dans l'industrie, les deux fluides écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison à faible inertie thermique au travers de laquelle les échanges se font par conduction. En effet, la chaleur que l'un des fluides cède à la paroi par convection le long de la surface de contact est transférée par conduction et, est cédée l'autre fluide par convection le long de l'autre face. Le rayonnement n'intervient de manière significative que s'il existe des différences de température très importantes entre un fluide et la paroi.

## Applications

Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans de nombreux domaines et d'applications, telles que :

\_ Les chaudières dont les échangeurs permettent de produire de l'eau de chauffe en récupérant l'énergie des produits de combustion

\_ Les radiateur d'appartements permettent, à l'aide d'eau de chauffe, de chauffer l'air des locaux ou ils sont installés pour notre confort

\_ l'eau chaude sanitaire peut être produite en réchauffant de l'eau du robinet à l'aide d'un circuit fermé de chauffage, *a priori* impropre à la consommation humaine, sans dénaturer l'eau traitée ;

\_ Les machines frigorifiques, qu'il s'agisse d'un réfrigérateur, d'un climatiseur ou d'une pompe à chaleur, où ils sont indispensables ;

\_ Le refroidissement de fluides chauds, pour éviter des dommages dus à une température trop élevée ; c'est le cas typique du radiateur automobile ;

Comme interface entre un circuit primaire et un circuit secondaire, pour assurer le confinement d'une zone sensible, typiquement dans une centrale nucléaire ;

\_ le recyclage de la chaleur de récupération avant son rejet dans le milieu extérieur, comme le fait un récupérateur sur air vicié dans une installation de ventilation à double flux . [2] [13]

### **I.3 Classification des échangeurs**

**I\_3\_1. Critère de classement :** Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs énumérons les principaux sont cités ci-dessous :

#### **-1 / Classement de technologique**

Les principaux types d'échangeur rencontrés sont les suivants :

\_ À tubes : monotube, coaxiaux ou multitubulaire ;

\_ à plaque : à surface primaire ou à surface secondaire ;

\_ Autre type ; par exemple à contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé, à un seul fluide...

#### **\_2/ Classement suivant le mode de transfert de chaleur**

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) ; il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec le transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient.

### \_ 3/ Classement suivant la disposition des écoulements

a) **Circulation à contre-courant** : Dans ce cas, les deux fluides circulent dans un

Sens opposé, de chaque côté de la paroi comme la figure en dessous :(figure.1)

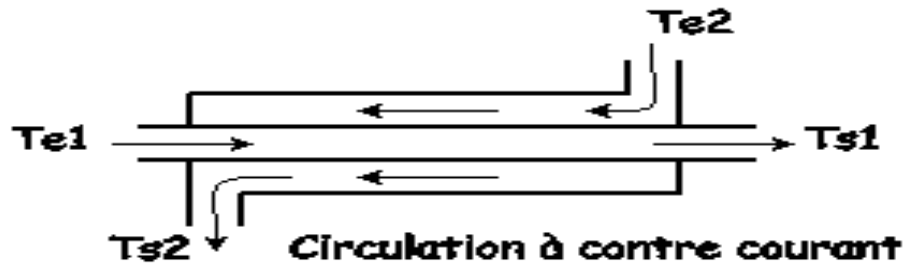


Figure I.1 circulation à contre-courant

b) **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.2)

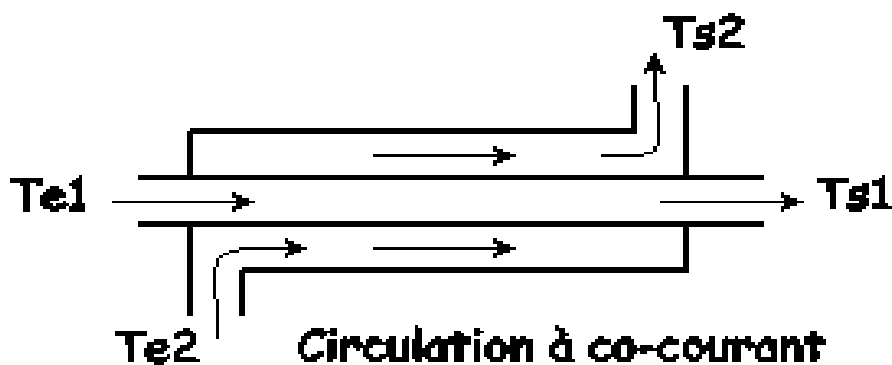
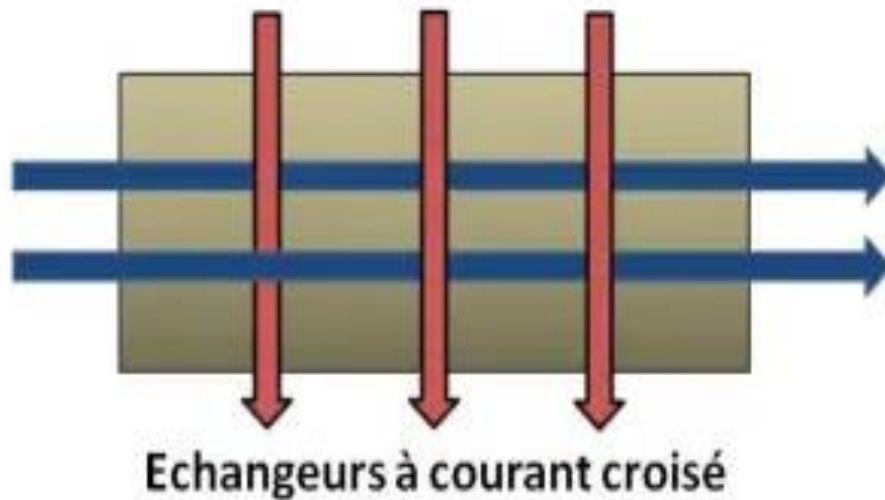


Figure. I.2 : circulation à Co courant

C) **Circulation à courants croisés** : L'écoulement des deux fluides se fait dans deux directions perpendiculaires (Figure. I.3)



**Figure. I.3** : circulation à courant croisé

#### **\_ 4/ 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 évapocondenseurs

#### **\_5 / Classement suivant la compacité de l'échangeur**

La compacité est définie par le rapport de l'Aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. Un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à  $700 \text{ m}^2 / \text{m}^3$

Cette valeur est susceptible de varier de  $500$  à  $800 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ .

#### **\_6 / Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange**

On retiendra deux types de paroi :

1 : Les échangeurs métallique en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux ; superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;

2 : les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, verre, etc..[3]

### **I.4 : Echange thermiques**

Avant d'introduire la notion de transfert thermique, il est primordial de définir la chaleur car elle entretient souvent des ambiguïtés et des confusions notamment avec la température.

Cependant cette dernière représente un paramètre d'état thermodynamique intensif d'un système traduisant à la l'échelle macroscopique l'état énergétique de la matière à l'échelle microscopique qui montre si un système est en équilibre thermique avec un autre système. Tant dit que la chaleur est aussi appelée transfert thermique est l'un des modes d'échanges d'énergie thermique entre deux systèmes, c'est une notion fondamentale de la thermodynamique qui est définie comme état un transfert d'énergie microscopique désordonnés. Cela correspond en réalité à un transfert d'agitation thermique entre particules au gré des chocs aléatoire qui se produisent à l'échelle microscopique.

Dans un échangeur de chaleur, cette chaleur est transférée par conduction et ou convection au sien de chaque fluide et par conduction au sien matériau qui les sépare. Il peut également y avoir transfert par rayonnement si le niveau de la température dépasse les 100°C. Les échangeurs sont représentés comme suit :

#### **I\_4 / \_1 conduction**

C'est un échange d'Energie qui se produit au sein d'un même système sana déplacement de matière ce qui veut dire que la conduction à lieu dans un corps ou bien entre deux corps qui sontencontact.il apparait sous l'influence d'un gradient de température. C'est un mode qui est spécifique pour les solides et une faible transmission dans les gaz.

Au niveau moléculaire c'est l'énergie cinétique des molécules qui est responsable du transfert par conduction.

Ce sont les collisions aléatoires entre ses molécules qui font que l'énergie cinétique se transforme en chaleur. Cette dernière se propage à l'intérieur du ceps par deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou les molécules et une transmission par les électrons libres. Considérons l'exemple suivant : imaginons une barre en métal chauffée à une desextrémisés laquelle était initialement à température ambiante. La chaleur reçu éparcette extrémité de la barre se

propagera tout le long de celle-ci. Ceci induira une augmentation de température sur toute la longueur de la barre.

### **I\_4/\_ 2 convections**

La convection est une autre forme d'échange thermique qui s'effectue essentiellement dans les fluides (gaz et liquide). C'est l'échange d'énergie sous forme de chaleur entre un fluide en mouvement et la surface d'un corps solide avec des températures différentes.

Les particules en contact avec la surface chaude sont chauffées par conduction. Le fluide chaud est composé de molécules qui ont une énergie cinétique plus importante donc, par conséquent il est moins dense (sa masse volumique diminue) que les particules qui sont en contact avec la surface froide lesquelles ont une énergie cinétique moins importante (leur masse volumique augmente). Comme la masse volumique des particules chaudes va diminuer, elles auront tendance à s'élever, contrairement aux particules froides sont poussées par les particules chaudes vers le bas en créant un mouvement de convection.

C'est la variation de la masse volumique qui en gendre la circulation des particules, il existe deux types de convection :

#### **La convection forcée**

Le processus de cette convection est le même que celui de la convection naturelle. La différence est que le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante du gradient de température (pompe, ventilateur, etc).

#### **La convection naturelle**

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant de la différence de température aux frontières. La distribution de température en gendre son propre mouvement en créant des forces d'Archimède rotationnelles, et un champ de force extérieur (l'apesanteur). Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement (turbulent ou laminaire).

La quantité de chaleur  $\delta\varphi$  qui traverse une surface pendant un intervalle de temps  $dt$ , peut s'écrire :  $\delta\varphi = h(T_p - T_\infty) dS dt$ , quelque soit le type de convection et le régime d'écoulement du fluide, Cette relation est dite relation de Newton. Dans tout cas de résolution d'un problème de convection le coefficient convectif ( $h$ ) reste à déterminer, il dépend de nombreux paramètres : caractéristiques du fluide, nature de l'écoulement, la température et la forme de la surface d'échange. [4] [5]

### I\_4/\_3 Le rayonnement

Les molécules sont composées de particules d'électron et de protons permettent l'accélération de ces molécules que l'on appelle rayonnement électromagnétique ayant l'origine l'agitation atomique à la surface du corps

Le mécanisme de rayonnement est créé par l'émission et l'absorption des ondes électromagnétiques porteuses d'énergie rayonnante et par la transmission de celle-ci en chaleur avec le changement d'état énergétique (énergie interne) des corps qui y parviennent.

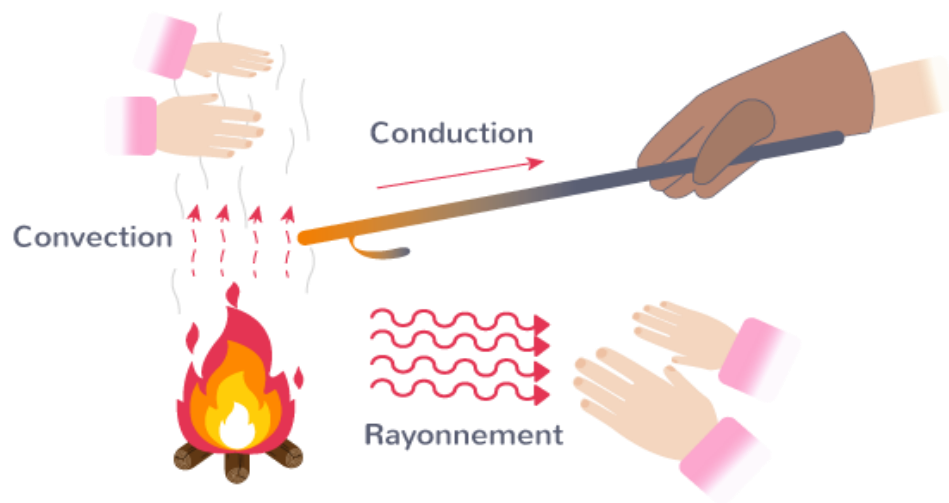


Figure. I.4 : les types de transfert de chaleur thermiques

### I.5 les différents types d'échangeurs

Il existe différents types d'échangeurs de chaleur adaptés aux objectifs recherchés, dont les plus importants sont :

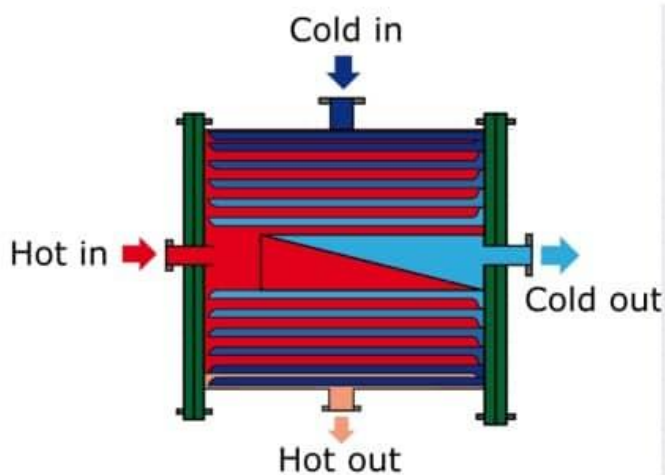
#### I\_5/\_1- Echangeur à spirales

Un échangeur à spirale (figure 1 ,1) consiste en 2 plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale pour former une paire de canaux en spirale. Le diamètre de l'échangeur est relativement grand, avec une surface d'échange maximale d'environ  $450m^2$  pour un diamètre de  $3 m^2$ , ce qui le place dans la catégorie des échangeurs non compacts.

Un échangeur spirale nécessite 20% de moins de surface d'échange qu'un échangeur à faisceau tubulaire. Il est utilisable pour les liquides visqueux ou pour les mélanges liquide-solide et possède une capacité autonettoyante un encrassement réduit par rapport à l'échangeur à faisceau tubulaire. Il ne peut travailler qu'avec des différences de température et de pression limitées.



<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Utilisation</i>
<b>Grande surface de contact</b> <b>Large passage</b> <b>Encombrement réduit</b> <b>Excellent condenseur</b> <b>Autonettoyant</b>	Non démontable Ecart de T limités	Eau/eau Vapeur/eau Eau surchauffée/eau



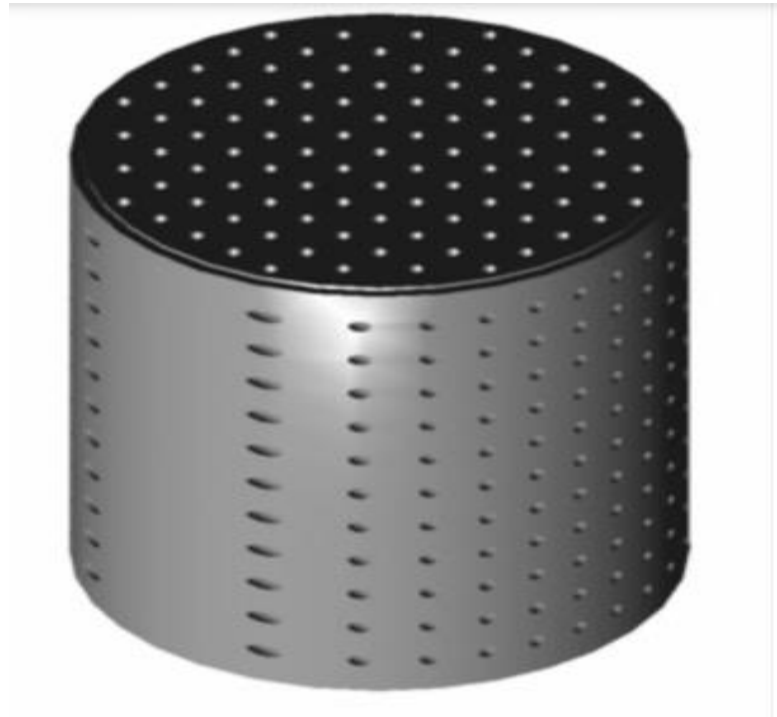
**Figure. I.5 :**Échangeur de chaleur spirale.

### **I\_5/\_2 Echangeur à bloc**

L'échangeur à bloc (figure 1,2) 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 2 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 distribue les liquides dans les canaux.

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 fait que le rapport volume libre pour passage des fluides / volume du bloc est très petit crée une grande inertie dans les cas de changement de température : le bloc agit comme un réservoir et peut lisser la différence de température.

Les blocs sont cependant fragiles tant aux chocs qu'aux grands écarts de température (problème de dilatation non-uniforme pouvant conduire à des fissurations du bloc). Le prix est relativement élevé par rapport aux autres types d'échangeur et le transfert de chaleur et en général moyen : l'épaisseur de la paroi d'échangeur est plus grande que pour une surface d'échange en métal pour cause de fragilité, ce qui augmente la résistance au transfert.



**Figure I.6 :** Schéma d'un échangeur à bloc simple

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

### I\_5/\_3 Colonne de bouhy

Excellente alternative aux échangeurs à plaques dans les sècheurs d'air comprimé, la colonne de bouhy (fig. 7) est un échangeur à tête dépointe 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, la seconde 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 en charge.

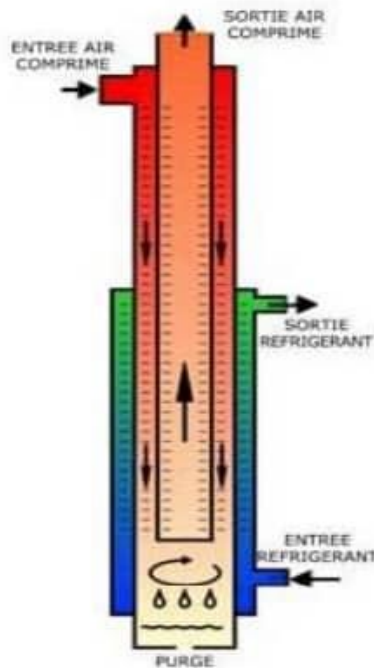


Figure. I.7: Echangeur de chaleur colonne de bouhy .

### I\_5/\_4Echangeur à ailette

Un échangeur à ailettes (fig. I.8) 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. Dans ce dernier cas, la chaleur due aux frottements et à l'induction magnétique (cas d'un moteur électrique) est directement transférée à la protection extérieure du moteur qui possède des ailettes fixées à sa surface.

Le transfert thermique est limité notamment du côté du fluide de refroidissement par manque d'un système de circulation : l'air circule principalement par convection naturelle autour de l'échangeur. Cette limitation peut toutefois être supprimée par ajout d'un système de ventilation. Cet échangeur est très simple et peut prendre des formes particulières, ce qui le rend intéressant dans l'électronique

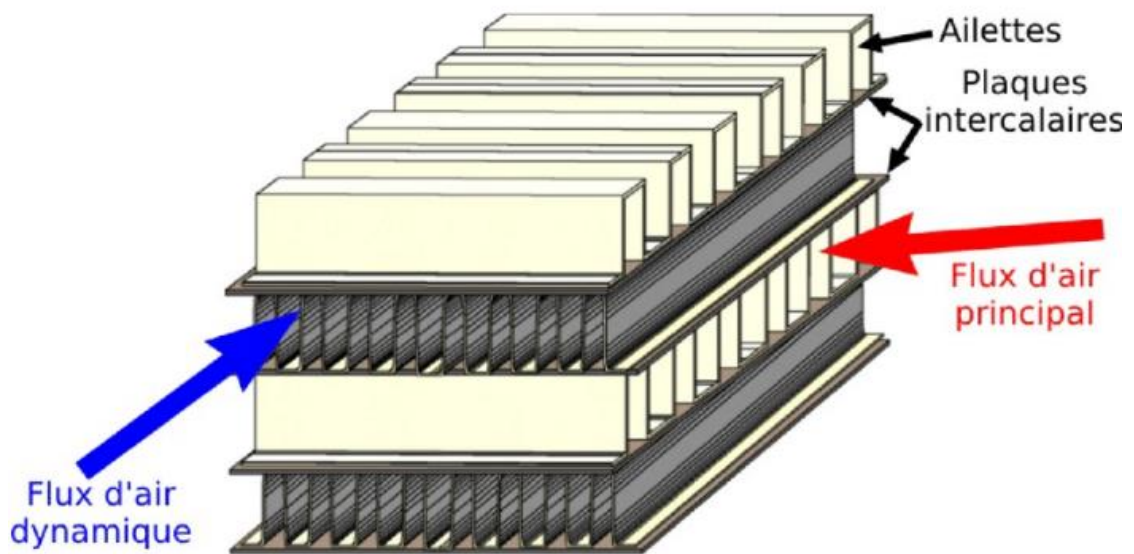


Figure. I.8: Echangeur thermique formé d'ailettes

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Utilisation</i>
<p><b>Bon rendement</b></p> <p><b>Peut prendre des formes précises</b></p>	<p>Craint les chocs</p>	<p>eau/air</p> <p>huile/air</p> <p>solide/air</p>

### I\_5/\_5 Echangeur 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 (serpentin), soit deux tubes coaxiaux (échangeurs bitubes), soit un faisceau de tubes enfermé dans une enveloppe appelée calandre.

1).Les échangeurs à tête flottante : L'une des plaques tubulaires est fixe (fig. I.9)

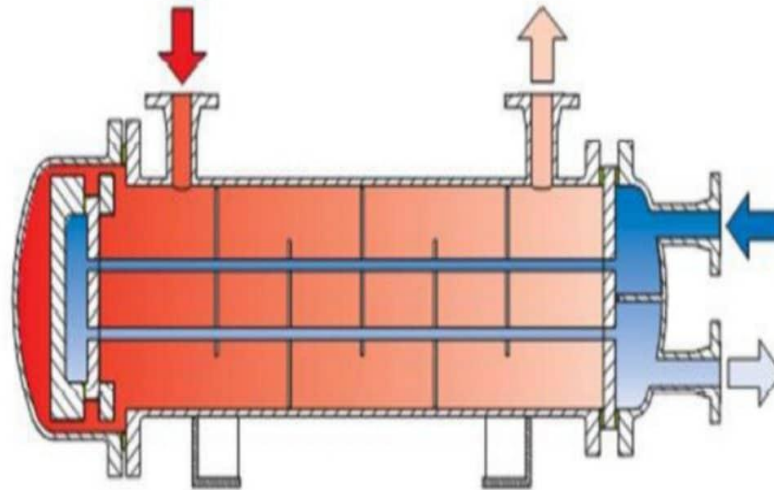


Figure. I.9: Echangeur à tête flottante

Les échangeurs à tubes en U : l'utilisation de tubes coudés supprime une tubulaire (Fig. .i.10)

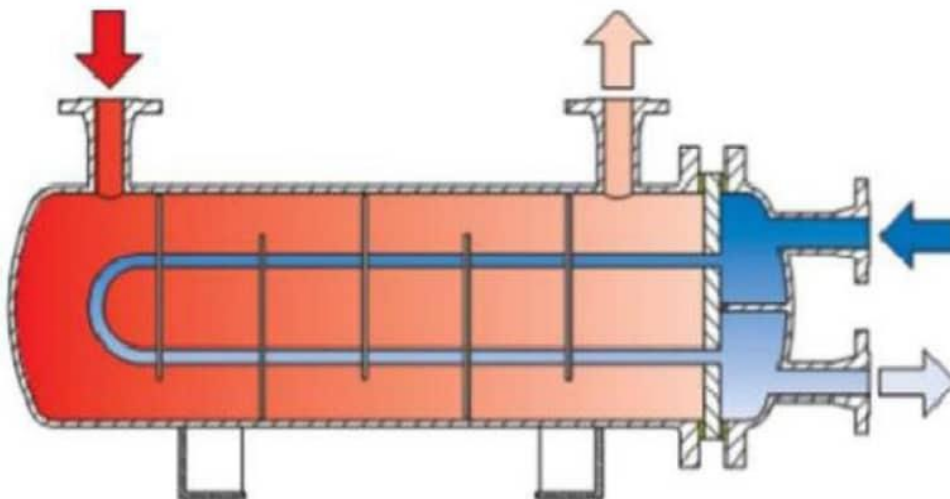


Figure. I.10 : échangeurs à tubes en U

1) Les échangeurs à plaque tubulaire fixes : soudées sur la calandre (fig. I.11) [7]

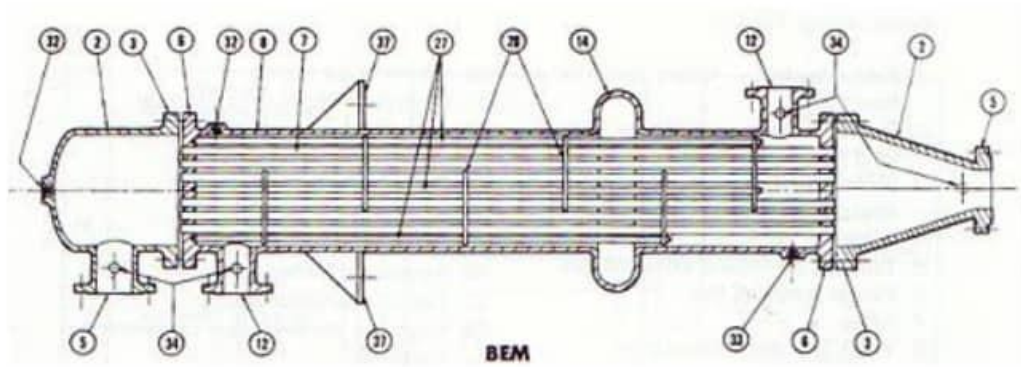
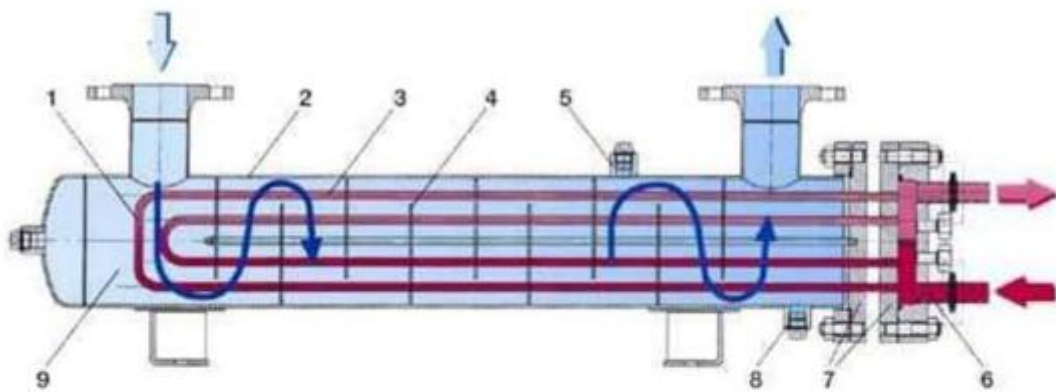


Figure. I.11 :Echangeur à plaque tubulaire fixes

**I\_5/\_6- Les échangeurs à faisceau et calandre :**

Ce type d'échangeur est de loin le plus répandu dans les unités de transformation des industries chimiques et pétrochimique. Un faisceau de tubes est situé à l'intérieur d'une calandre (Figure. I.12) dans laquelle circule le deuxième fluide. Cette conception se retrouve également dans les condenseurs, les rebouilleurs et les fours multitubulaires. [6]



1 ; faisceau tubulaire

6 ; Intérieure boîte à eau

2 ; enveloppe (calandre)

7 ; plaque tubulaire

3 ; intérieure tube

8 ; raccord vidange

4 ; Chicane

9 ; intérieure enveloppe

5 ; Raccord évent

**Figure. I.12:** Schéma typique d'un échangeur tubes calandre**I.6 Conclusion :**

Les échangeurs de chaleur sont utilisés 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 utilisée permet un gain de rendement et d'énergie des procédés. [8]



## **CHAPITRE II : recherche bibliographique**



### II.1 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE

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 [31].

**Le domaine des échangeurs de chaleur a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques vu son importance dans le domaine de l'industrie, parmi les chercheurs qui ont été intéressés par cet axe de recherche, Belhadj-nourredine et al.** Qui ont étudié l'un des problèmes existant dans l'échangeur de chaleur à faisceau tubulaire et calandre en utilisant deux fluides différents (eau de mer/ammoniac). Cet article a mené une présentation de différents éléments qui constituent cette appareil, de mieux comprendre son fonctionnement et son rôle important dans l'installation.

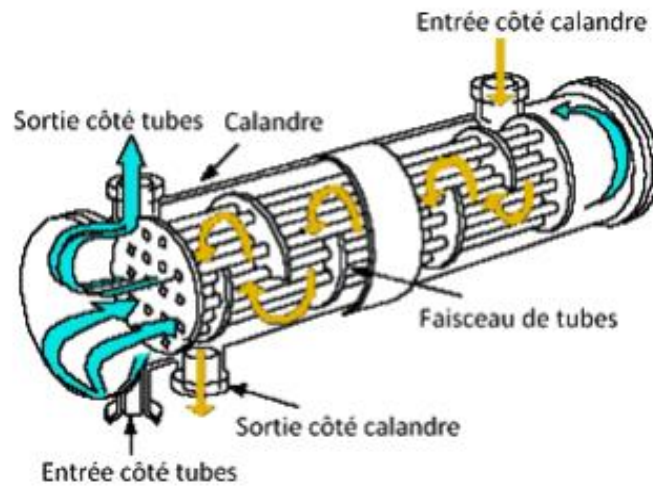
Le phénomène d'encrassement a été également étudié en se basant sur la mesure de la variation de l'efficacité de transfert de chaleur, Ce phénomène qui provoque une augmentation des pertes énergétique et des frais de nettoyage élevé.

L'évaluation de la surface, le coefficient de transfert global d'échange thermique, ainsi que les pertes de charge ont été également analysés dans cet article. [32].

**S.SALAOUATCHI et al.** Ce travail a pour but l'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.

Et après avoir travaillé avec ce programme développé, le résultat obtenu a été validés avec ceux disponibles dans la littérature. En perspective, le programme peut être adapté facilement à la disposition horizontale du condenseur à condition d'implémenter une corrélation pour le coefficient d'échange de chaleur en condensation à l'extérieur des tubes. [33]



**Figure. II ,1:**Condenseur à tubes et calandre.

**H.BECHKR** et **AL.** [34]. Dans ce cas, ils ont fait une étude de l'échangeur de chaleur à faisceau de tube et calandre sur le banc d'essai TD360, Ce travail est divisé en deux parties :

La première partie présente les résultats expérimentaux obtenus Par TD360c. Ces résultats présentant les différents paramètres Intrinsèques de l'échangeur de chaleur de type Co-courant et contre-courant .Parmi ces Résultats son efficacité et le coefficient global d'échange de chaleur.

Et dans la deuxième partie on trouve une présentation et interprétation des résultats numériques obtenus par le logiciel Comsol, précisément la variation de température, les contours des pressions et des vitesses et la visualisation des lignes de courants, et à cause de ces résultats numérique obtenus ils ont conclut que : La pression dépend de la température et la vitesse de circulation des fluides et de leurs caractéristiques physiques : densité et viscosité, ainsi que la géométrie de l'appareil, et que La vitesse des fluides dépende de la géométrie de l'échangeur de chaleur et le chemin suivi par le fluide L'évolution des températures dépend du mode de transfert de chaleur par convention entre le fluide et la paroi extérieur .

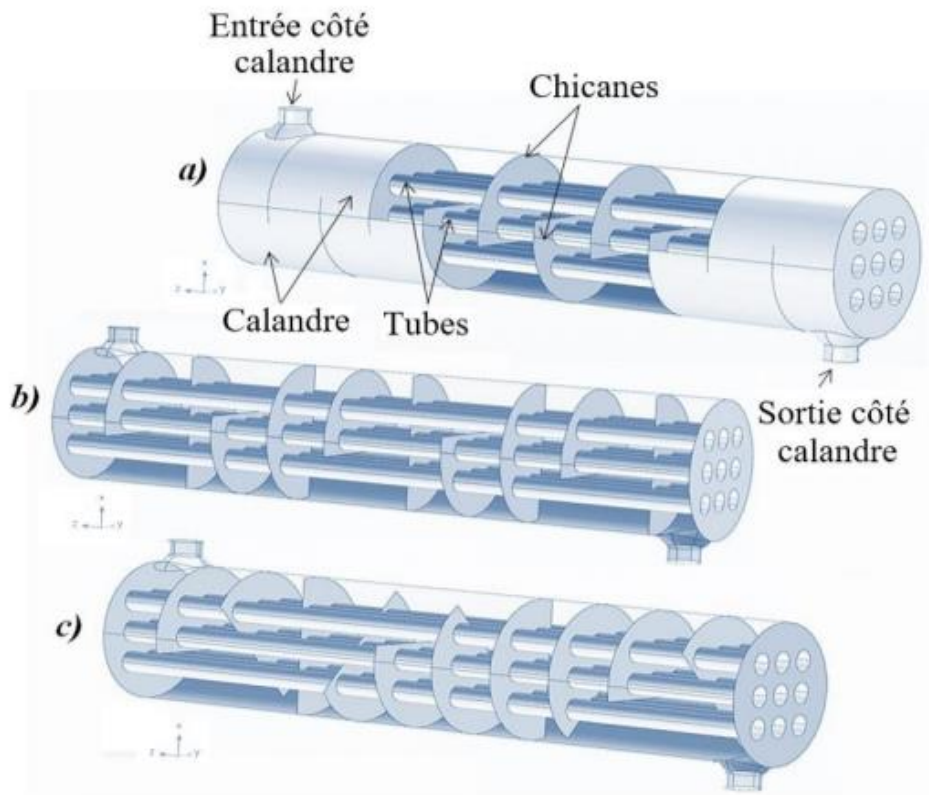


**Figure. II ,2 :**Banc d'essai expérimental TD360 lié avec le système vidas.

**MELLAL Mustapha** et al[35].cet travail consacré à l'étude de performance thermo-hydraulique d'un échangeur de chaleur a faisceaux tubulaire et calandre (STHE).et essayer d'améliorer les performances et l'efficacité de cet échangeur et pour réduire considérablement la consommation d'énergie qui se traduira par une réduction des émissions et, par conséquent, un impact moindre sur l'environnement.

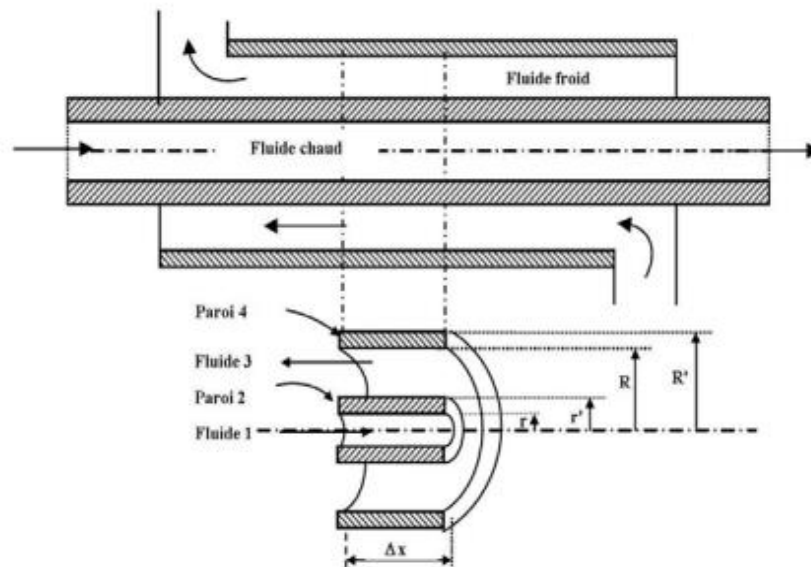
Alors des simulations numériques tridimensionnelles ont été effectuées pour analyser l'écoulement de fluide turbulent et le transfert thermique côté calandre. Ils ont suivis et examinés deux paramètres principaux : l'espacement entre les chicane (106.6, 80 et 64 millimètres) et l'angle d'orientation (45°, 60°, 90° 120°, 150° et 180°). Les investigations sont effectuées avec le logiciel de CFD COMSOL Multiphysics 5.1 en utilisant la méthode d'éléments finis, pour un nombre de Reynolds s'étendant de 3000 à 10000.et grâce aux résultats numériques obtenus ,il a été prouvé que le cas de l'angle d'orientation de 180 degrés a un espacement de 64 mm est la meilleure conception qui peut assurer un bon mélange de fluide, donnant de ce fait une valeur la plus élevée du coefficient de performance thermique de 3.55 comparativement à un échangeur de chaleur a faisceaux tubulaire et calandre sans chicane. Cette étude a permis de déterminer l'importance des paramètres étudiés dans l'amélioration de la performance thermo hydraulique côté calandre d'un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires, et le paramètre d'angle d'orientation des chicane segmentaire a un grand impact sur le mode d'écoulement qui est très similaire à celui d'un échangeur de chaleur configuré avec

des chicanes hélicoïdales, ce paramètre assure à la fois un grand transfert thermique avec moins de perte de charge sans oublier la facilité de sa conception.



**Figure. II ,3 :**Echangeur de chaleur a faisceaux tubulaire et calandre (STHE)

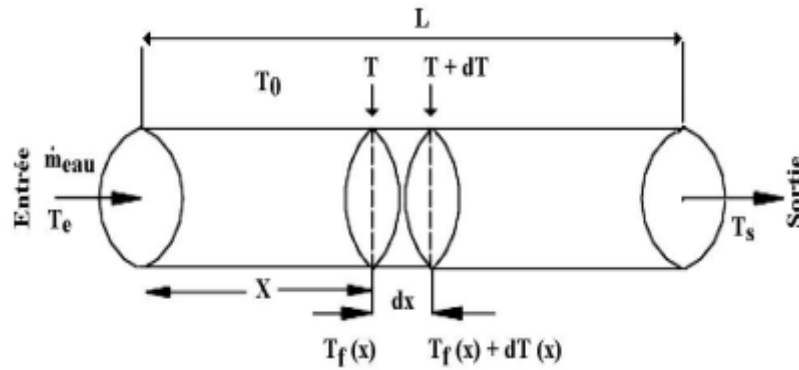
L'étude de N. BOULTIF et ALL...[36] Consiste sur l'étude de l'évolution et la distribution de la température dans un échangeur à deux tubes coaxiaux en régime permanent (état stationnaire). Un schéma unidimensionnel de différences finies a été utilisé pour analyser la distribution de température et de pression dans cet échangeur de chaleur. Les propriétés thermo physiques des fluides utilisées varient avec la température le long de l'échangeur. La conduction thermique axiale dans les parois et le transfert convectif à travers les interfaces sont pris en compte. Les fluides transitant dans l'échangeur sont monophasiques. Le programme développé analyse la circulation des fluides en deux mode : à Co-courant (anti-méthodique) et à contre-courant (méthodique).



**Figure. II,4:** Vue en coupe de l'échangeur de chaleur étudié

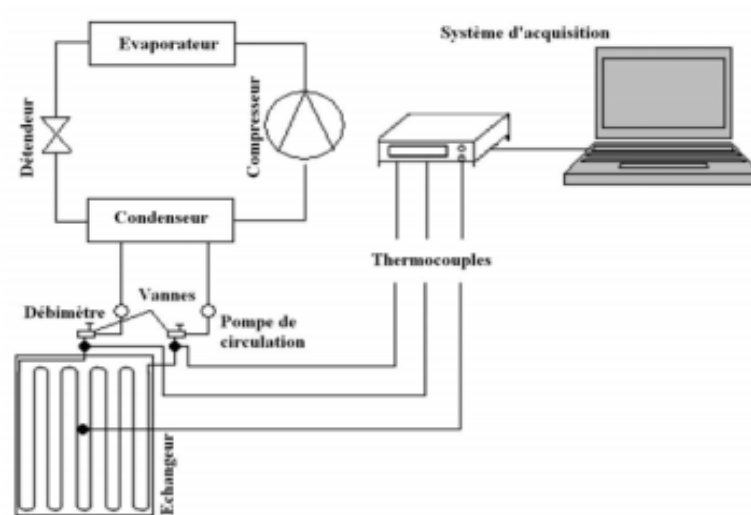
Le coefficient d'échange global  $K$  a une forte variation pendant le premier intervalle du temps en régime transitoire et prends graduellement l'allure de celle du régime permanent après ce temps. Malgré l'utilisation des fluides incompressibles, les pertes de charge varient dans cet intervalle du 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.[36]

**N. Naillet al.** [37] ont proposé d'étudier analytiquement l'opportunité d'exploiter l'inertie thermique du sol pour le chauffage. Cette étude consiste à évaluer les performances thermiques et à optimiser les paramètres de fonctionnement de l'échangeur de chaleur eau/sol utilisé dans la récupération de l'énergie thermique du sol. Les résultats obtenus montrent que les dimensions du système de récupération influent considérablement sur la quantité de chaleur récupérée du sol.



**Figure. II, 5:** Tranche du tube de l'échangeur tubulaire eau/sol placé dans le sol

Une étude expérimentale a été également menée pour déterminer les performances de l'échangeur enterré et pour valider les résultats du modèle analytique.



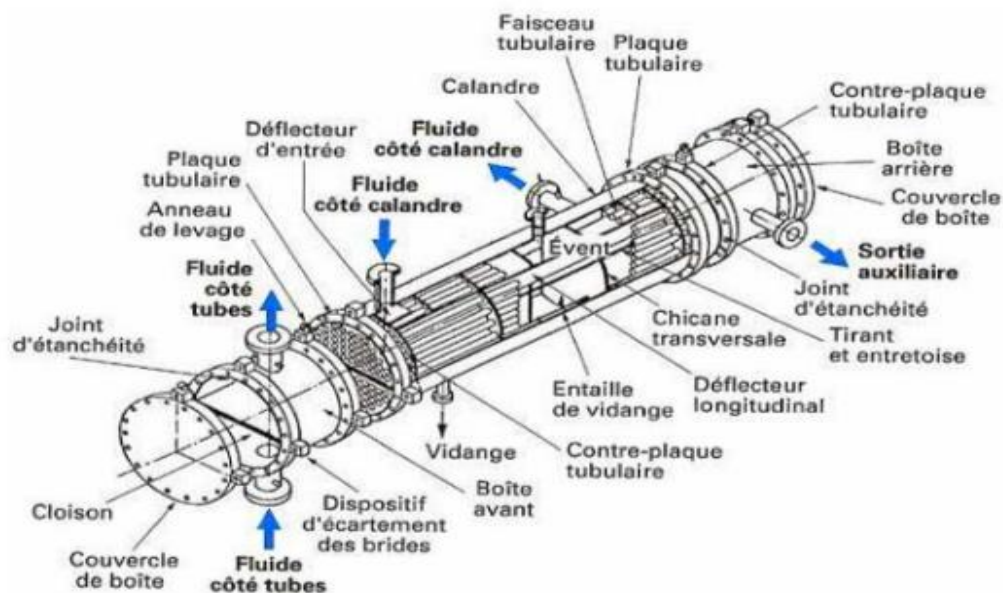
**Figure. II, 6:** Schéma du dispositif expérimental

Les résultats ont montré une bonne concordance, de l'ordre de 7 %, entre les résultats du modèle analytique et les points expérimentaux, Cet écart est probablement dû à la complexité de l'échange thermique au niveau du sol.

L'étude de **REHRAH et al** [38]. Cette étude 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.

Après les calculs qu'ils ont effectués dans ce travail, les résultats ont montré que la surface calculée est proche de celle de l'échangeur et les pertes de charge calculée sont inférieures aux pertes de charge admissibles. Donc cet équipement fonctionne correctement ce qui prouve ou confirme le calcul de l'efficacité qui a atteint les 93%. Par ailleurs, le bouchage de 9,6 % de tubes a causé une perte de chaleur correspondante à une diminution de l'efficacité de cet échangeur avec un pourcentage de 6%. Une compensation par augmentation du débit de fluide froid va y remédier à ce problème, le calcul donne une augmentation de 1,58 kg/s.

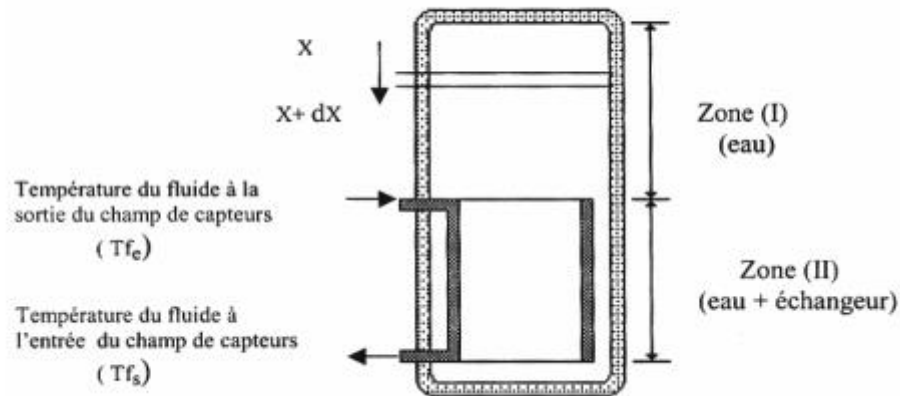


**Figure II ,7** : Divers constituant d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre

TEMA

L'étude de **D.LAFRI** et **ALL...**[39] traite le stockage d'énergie sous forme de chaleur sensible et le comportement thermique d'une cuve de stockage dans une installation de chauffage d'eau solaire collective. Cela consiste à chauffer l'eau contenue dans une cuve par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur à serpentin immergé à l'intérieur. Cette étude a utilisé

un modèle numérique qui décrit tous les modes de transferts thermiques impliqués pour déterminer l'évolution des champs de températures dans la cuve de stockage. Les résultats théoriques obtenus du modèle sont comparés aux résultats expérimentaux. Cette confrontation a montré les limites du modèle théorique proposé.

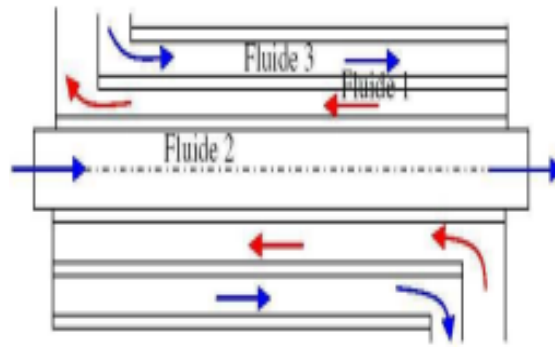


**Figure. II ,8:** Schéma du système de chauffage

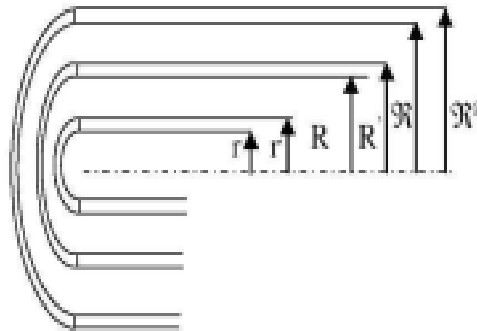
Les résultats expérimentaux ont montré que le gradient de températures suivant l'horizontale à l'intérieur de la cuve pour chaque zone est négligeable. Le débit du circuit primaire influe sur la répartition de la température dans la cuve de stockage pour les valeurs comprise entre 60 - 240 l/h. Au-delà de la valeur supérieure, les températures de chaque tranche restent inchangées.

**K. Baadacheet al.** [40] ont également travaillé sur un échangeur de chaleur à triple tube concentrique en arrangement contre-courant et Co-courant en utilisant un modèle numérique pour développer une analyse unidimensionnelle en régime permanent. Les champs de température pour les trois fluides et les trois parois, ainsi que les pertes de charge sont déterminés. Les propriétés physiques des fluides varient avec la température. Les équations gouvernantes sont obtenues à partir d'un bilan énergétique sur un volume de contrôle. Le code de calcul développé est un outil d'optimisation des échangeurs à triple tube concentriques





**Figure. II ,9:** Coupe de l'échangeur de chaleur



**Figure. II ,10 :** Dimensions caractéristiques

Dans cet ouvrage étudié par **M.AMZAL** et **AL.**[41] .une comparaison de trois modèles d'échangeurs de chaleur à plaques(échangeur à plaques simple, à plaques munies de chicanes et à plaques ondulées) a été faite 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.

Trois configurations ont été simulées afin de comparer l'efficacité et de choisir ainsi la plus profitable.

Les résultats obtenus montrent que l'échangeur à plaque ondulées à contre-courant présente un meilleur échange de chaleur.



Figure II ,11 : Cas de géométrie simple.



Figure II ,12 : Cas de géométrie avec chicanes.

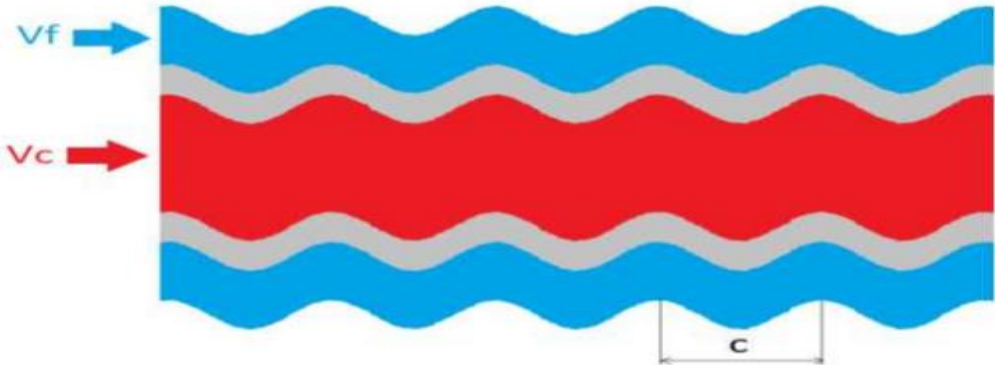


Figure II ,13 : Cas de géométrie ondulée.

L'article de **Miçaet al.** [42]. En conduisant une recherche expérimentale, il est possible de tester le flux de fluide et le transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur avec des fentes tubulaires en utilisant deux fentes froides et une fente chaude.

Les auteurs ont démontré que le nombre de chicanes, leur taille, l'espacement entre eux, et les emplacements des premiers et de dernières chicanes, sur les côtés d'entrée et de sortie des fluides sont tous des facteurs importants qui affectent les performances d'échange d'un STHE. En outre, l'utilisation de simulations de CFD peut nous permettre de tester rapidement et à moindre coût une variété de paramètres sur une réplique virtuelle du système étudié.

Une étude numérique examine une gamme de variations de propriétés physiques dans un échangeur de chaleur afin d'analyser les paramètres de transfert de chaleur et d'évaporation des liquides.



**Figure II ,14** : Echangeur de chaleur a faisceaux tubulaire. [43]

**S. Resatet al.** [43], L'effet de plusieurs paramètres, y compris les diamètres intérieurs et extérieurs de la calandre, le nombre de passages et d'arrangements des tuyaux, la distance entre les chicanes et la coupe de la chicane, sur les performances thermo-hydrauliques d'un échangeur de chaleur avec des faisceaux tubulaires et du calandre a été testé en utilisant un algorithme génétique. Cette étude soutient la signification des paramètres étudiés et démontre la validité de l'utilisation de l'algorithme génétique pour la conception et l'optimisation des échangeurs de chaleur.

**II.2 Conclusion :**

Toutes ces expériences et travaux cités montrent que des échanges de chaleur se produisent dans plusieurs secteurs d'activité humaine, la chaleur est transférée dans la plupart de ces activités sans altération des milieux intervenant dans le transfert thermique , Le souci technologique majeur des échangeurs de chaleur est l'amélioration de l'échange thermique entre les deux fluides tout en générant le moins de pertes de charges ou de leur réduire à leur plus bas niveau possible c'est pour ça la plupart des recherches concentrent sur le côté calandre par étudier l'effet de plusieurs paramètres, les plus important « l'arrangement des tubes, l'espacement entre les chicanes, la coupe des chicanes ...etc. ».est qui trouvent que : La forme et l'emplacement des chicanes restent toujours la plus importante technique qui conduit à l'amélioration des performances thermiques coté calandre de ce type d'échangeur, elles intensifient la turbulence d'écoulement du fluide travers les tubes pour assurer un coefficient de transfert thermique élevés et fourni une résistance mécanique au faisceau.



**Chapitre III : Matériels et Méthodes »**

## *Partie 01 : Etude expérimentale par le TD360a et TD360c*

### **III.1.1 Introduction**

La première partie de ce chapitre résume l'étude et l'exploitation de deux échangeurs de chaleur **«à faisceau de tube et calandre et à tube concentrique »**, disponibles au niveau du laboratoire thermique du département de génie mécanique, et cela afin de comprendre leurs fonctionnements et de réaliser tous les tests possibles.

Les échangeurs de chaleur étudiés sont assistés par ordinateur et fonctionnent avec le système VDAS (Versatile Data Acquisition System) de TecQuipment et cela dans le but d'enregistrer automatiquement les résultats des expériences et gagner du temps.

Cette première partie du présent chapitre comprend aussi un rappel sur le transfert de la chaleur, puis les éléments regroupant notre installation du banc d'essai, et la définition de nos deux échangeurs puis leurs fonctionnements puis conclure par son dimensionnement qui est basé sur deux méthode de calcul afin d'estimer l'efficacité de nos deux échangeurs et une explication de nos expériences.

### **III.1.2 Transfert de chaleur :**

Lorsque un corps plus chaude se trouve en présence d'un corps plus froid l'expérience nous montre qu'il y a une transmission de chaleur, c'est-à-dire qu'une augmentation de température qui se produit dans le corps le plus froid et une diminution de température se produit dans le corps le plus chaud ; la transmission de chaleur demeure jusqu'à ce que les températures des deux points présentent des températures différentes.

D'après ce que nous venons de dire la transmission de chaleur se produit en cas de différence de températures, En effet c'est l'unique condition car, comme nous le verrons par la suite, il n'est pas nécessaire que les corps soient en contact direct pour qu'il y ait transmission de chaleur [9]

### III.1.3 Description et Caractéristiques techniques

#### II.1.3.1 présentation du système

Comme il est indiqué sur cette figure (III \_1), notre installation est constituée essentiellement d'un cadre compact avec deux circuits eau (chaud et froid) et des instruments pour mesurer et afficher le débit et la température de l'eau, permettant d'accueillir plusieurs types d'échangeurs de chaleur. Ce module assure une alimentation stable du débit et de la température d'eau chaude et d'eau froide dans l'échangeur. Il est à noter aussi que les circuits de l'eau froide et de l'eau chaude ont des connecteurs.

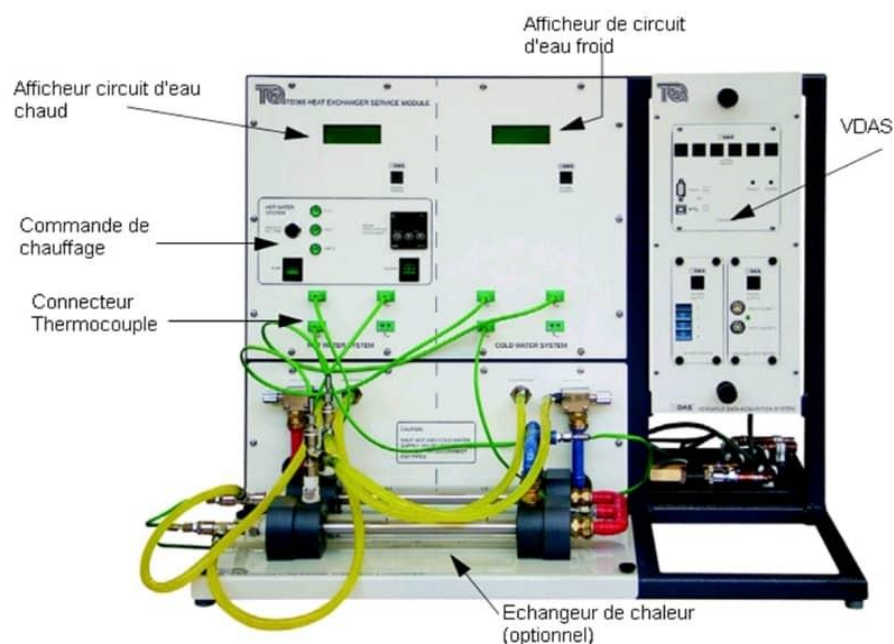


Figure III\_1 : Banc d'essai TD360

#### III.1.3.2 Les procédures de l'installation du système

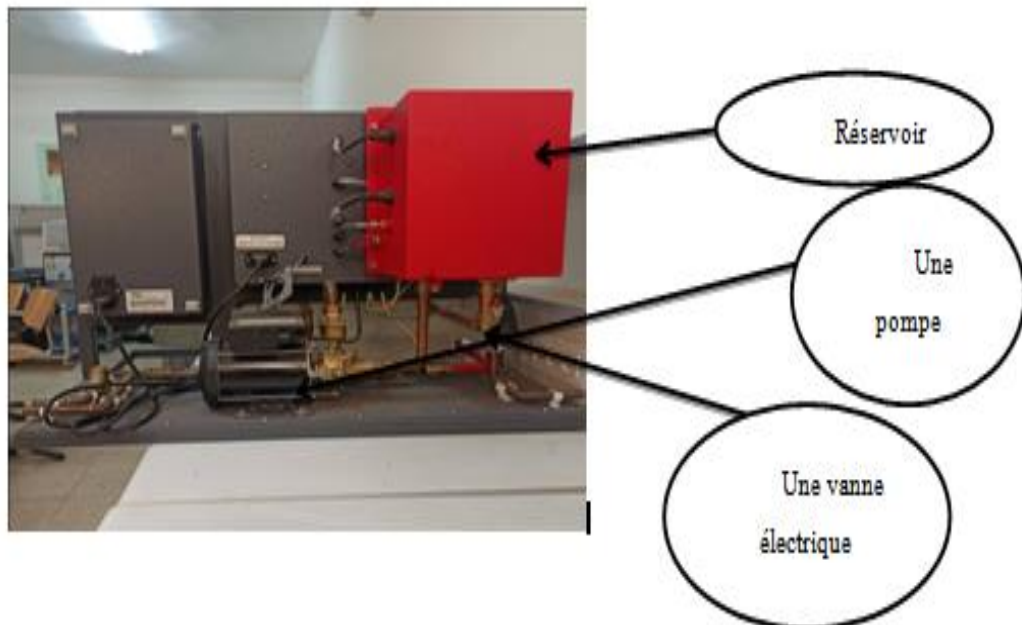
Pour installer ce modèle il faut tout d'abord placer le banc sur la table de travail, puis on branche l'alimentation et l'évacuation d'eau froide pour avoir des bons résultats. L'eau froide doit être entre 5 et 20 °C. Après on branche l'alimentation d'eau froide au chauffage d'eau. Et on peut utiliser l'acquisition de donnée VDAS qui est placée sur sa place au cadre, enfin on branche l'alimentation électrique du banc pour allumer le banc et on ouvre l'alimentation d'eau. Sur le panneau de commande, il faut éteindre la pompe et le chauffage. On clique sur le bouton de remplissage de réservoir jusqu'à l'allumage de bouton vers et quand il indique le

remplissage complet de réservoir. On place notre échangeur de chaleur. Maintenant le banc est prêt à l'utilisation.

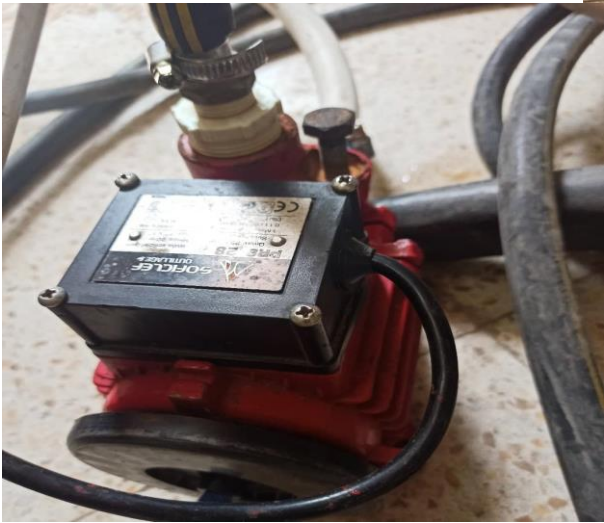
### III.1.3.3 Les composants du système TD 360

Le TD360 se compose d'un réservoir d'eau de capacité 7.5 litres comportant un indicateur de niveau d'eau avec une résistance électrique contrôlée par un régulateur PID, et une pompe avec un débit de 4,5 l/min à 1 bar. Il contient également au dos sur une vanne électrique ouvrira l'alimentation en eau du réservoir. et une lampes témoin de l'état du réservoir : plein, à moitié plein, vide qui se trouve en avant de banc (TD360) comme il contient aussi. Un circuit d'eau froide possèdera un régulateur de débit. Quatre connecteurs pour thermocouple de type K avec un afficheur numérique. Plus des thermocouples au niveau des connecteurs rapides pour le retour ou la sortie de chaque fluide. et sur la face avant, il se compose de deux afficheurs numériques multi lignes afficheront les valeurs des températures et des débits pour chacun des fluides. Il peut également être équipé par un réservoir d'eau froide de capacité 100 litres lié à une pompe pour pomper l'eau froide au système

L'échangeur possède une plaque support pour le fixer sur la base du banc à l'aide de quatre écrous moletés avec schéma synoptique montrant le détail des raccordements à effectuer

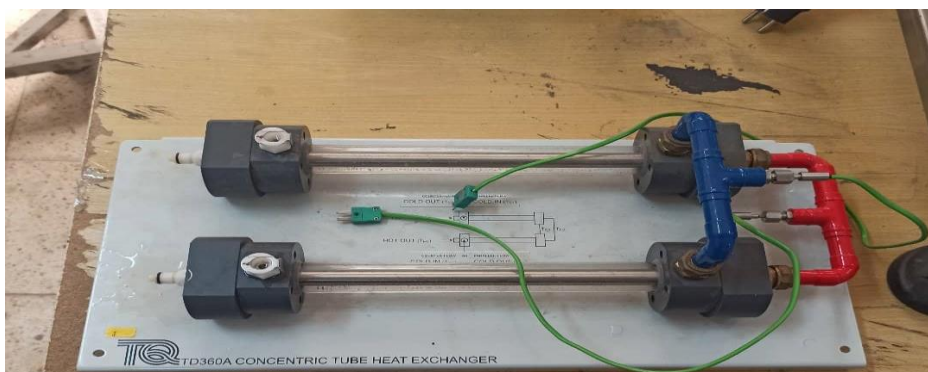






**Figure III.2:** les composants du banc TD360**III.1.3.4 Description des échangeurs TD360c et TD360a**

Dans notre expérience nous avons étudié des paramètres tels que la température et la variation de débit sur les deux échangeurs de chaleur qui sont au niveau de laboratoire de mécanique à l'université d'Ain temouchent (échangeur de chaleur à tubes concentriques TD 360a et l'échangeur de chaleur à faisceau TD360 c )

**A) Échangeur de chaleur à tubes concentriques (TD360a):****Figure III.3 :** échangeur tubulaire concentrique TD360a**A.1) Description et fonctionnement de l'échangeur de chaleur à Tube concentrique**

:

Le TD360a est un échangeur tubulaire concentrique pour un banc pédagogique, c'est un simple échangeur de chaleur contenant deux tubes, l'un dans l'autre.

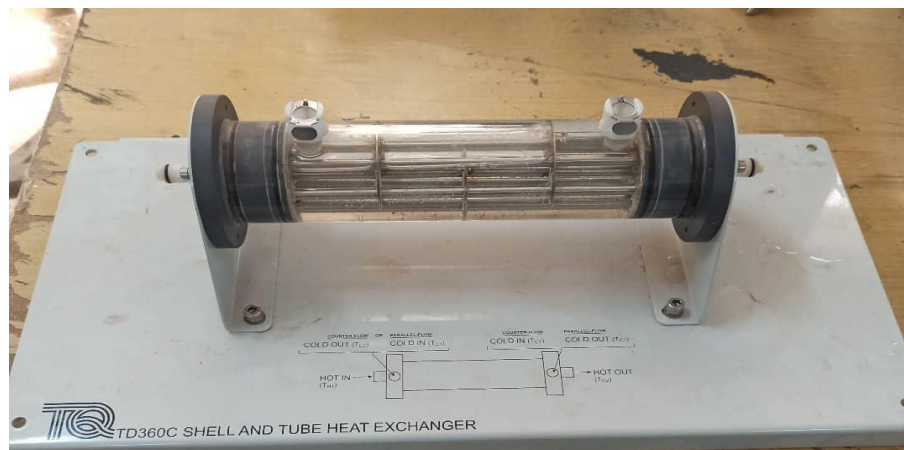
Il permet l'étude du transfert de chaleur entre l'eau chaude circulant dans un tube intérieur et l'eau froide circulant dans la zone annulaire entre le tube intérieur et le tube extérieur. Ce banc nous permet aussi de raccorder les circuits d'eau pour réaliser des expériences en mode contre-courant ou Co- courant.

L'échangeur TD360 fait partie de série d'appareils permettant d'effectuer des essais, cet appareil d'essais s'avère parfait pour étudier le fonctionnement et le comportement d'un échangeur de chaleur à tube concentrique. Cet échangeur de chaleur est constitué de deux parties égales avec des thermocouples supplémentaires placés au milieu, cela permet de nous aider à mieux comprendre comment la température change durant la surface d'échange.

### A.2) -Spécifications techniques requises

L'échangeur TD360 contient un tube extérieur transparent de diamètres externe 30 mm et interne 20mm et un tube intérieur en acier inoxydable de diamètres externe 12 mm et de diamètre interne 10 mm (épaisseur de la paroi de 1 mm) et sa surface de transfert moyenne est de 0,02 m comme il contient également deux thermocouples supplémentaires à la moitié de l'échangeur sur les fluides froid et chaud comme on peut le raccorder rapidement pour une connexion au module de basse ces dimensions sont ;  $500 \times 260 \times 160$  mm ces utilisations est fourni manuellement avec les travaux pratiques en français. [11]

### B) Échangeur de chaleur à faisceau de tubes et calandre (TD360c) :



**Figure III.4 :** Échangeur de chaleur à faisceau de tubes et calandre TD360c

#### B.1) description et fonctionnement de l'échangeur de chaleur a faisceau et calandre TD360c

Le fonctionnement de L'échangeur 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. L'échangeur de chaleur est sur une plaque d'assise qui a un schéma de principe montrant les connexions. La plaque d'assise se fixe au module de service avec des vis moletées.

**B.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 diamètres 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<sup>2</sup>. Son raccordement est aussi rapide pour une connexion au module de base ces dimensions sont : 500 x 260 x 150 mm.

**III.1.3.5 Système VDAS (VERSATILEDATA ACQUISITION SYSTEM)**

Pour enregistrer automatiquement les résultats des expériences, gagner du temps et réduire les erreurs de mesures, le module de service fonctionne avec le système VDAS (Versatile Data Acquisition System) de ses équipements, il est constitué de deux parties (matériel et logiciel).

1. Matériel VDAS (Module d'interface ordinateur)
2. Logiciel VDAS

Le matériel VDAS se connecte aux capteurs et instruments compatibles VDAS du produit équipement et convertit leur résultat de sortie électroniques en signaux numériques pour le logiciel VDAS.



Figure III.5 : Matériel VDAS

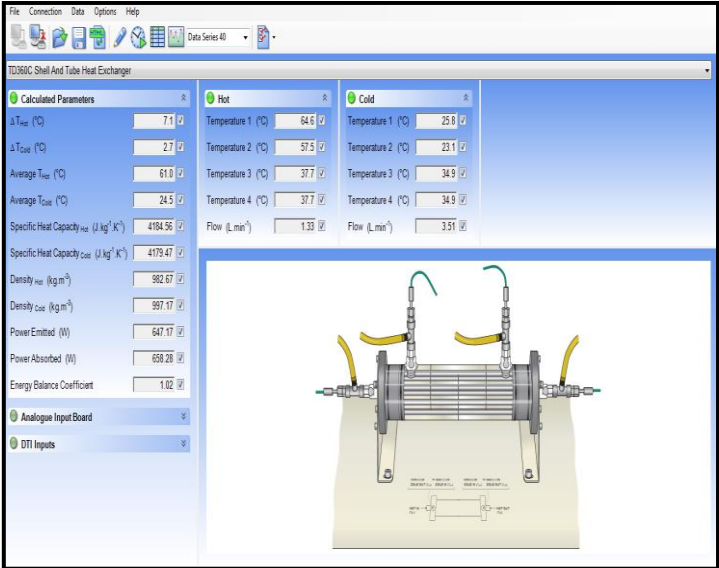


Figure III.6 : logiciel VDAS

### III.1.4 les Avantages et les Inconvénients

#### III.1.4.1 échangeur de chaleur à tube concentrique

Dans l'échangeur de chaleur à tube concentrique, de nombreux fluides peuvent être utilisés, comme Eau/Eau, Vapeur /Eau et des fluides thermiques et on peut utiliser aussi les fluides frigorigènes, et pour ces avantages il a un très bon coefficient global de transmission thermique comme il est aussi faible et simple et peu de pannes et plus de ça il est moins cher par rapport à les autres échangeurs (prix peu élevés). À-propos ces inconvénients il a une puissance limitée et il peut être en risque de claquement si le diamètre des tuyaux est petit (<50mm) et si la longueur est grande

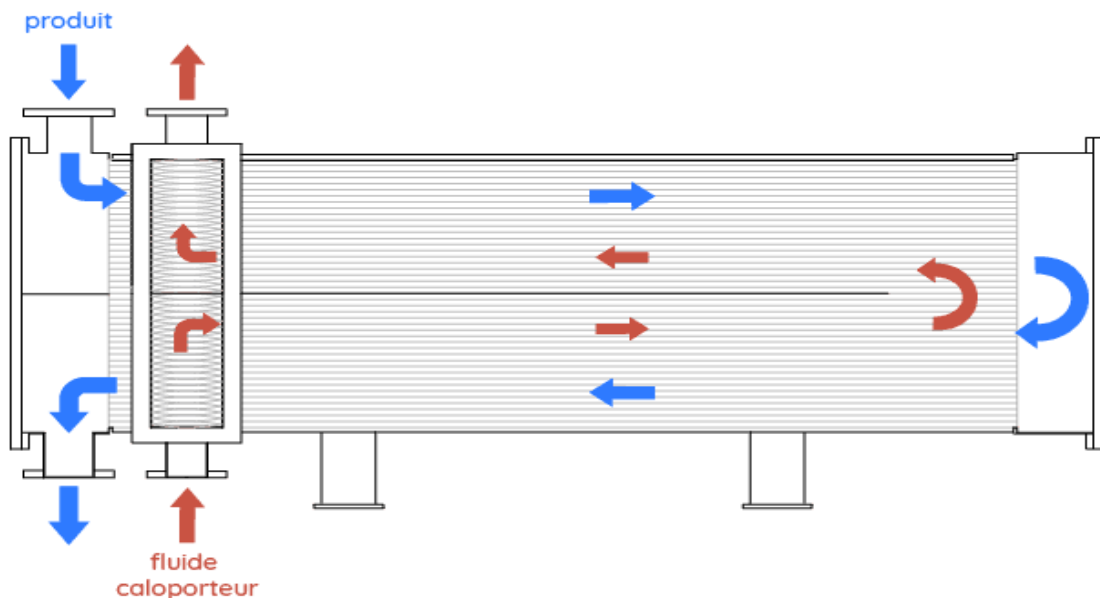


Figure : III.7 : Schéma d'un échangeur de chaleur à tube concentrique

#### III.1.4.2 échangeur de chaleur à faisceau et calandre [12]

L'échangeur de chaleur à faisceau et calandre peut utiliser aussi plusieurs fluides à l'extérieur et à l'intérieur de l'échangeur comme Eau /Eau, vapeur/Eau, huile/Eau, Eau surchauffée/Eau, et comme tous l'échangeur de chaleur, il a des avantages et des inconvénients, pour **ces avantages**, il résiste aux fortes pressions et pour l'ensemble de puissances comme il est aussi économique et il accepte des grands écarts de température et on peut l'utiliser en condensation partielle. À-propos **ces inconvénients**, il présente des risques à des contraintes sur les tubes et c'est difficile pour le nettoyer à cause de ces multitubes et aussi il est sensible aux vibrations.

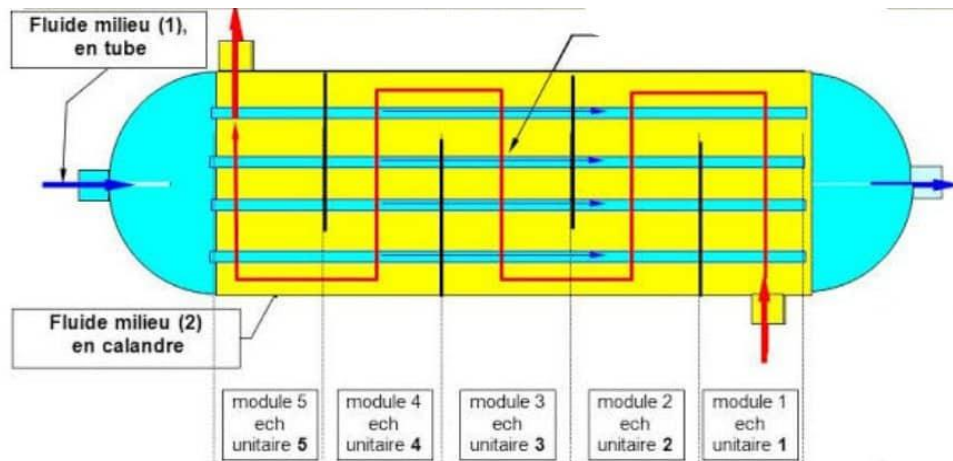


Figure III.8 : Schéma d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre

### III.1.5 Expériences Réalisées

Les expériences réalisées ont été effectuées en étudiant :

- Effet de variation de débit puis le rendement
- Effet de variation de température puis le rendement

#### III.1.5.1 Effet de variations de température puis le rendement

Dans le contexte de transfert de chaleur le fluide le plus chaud cède de l'énergie au fluide le plus froid, l'écart de température entre les deux fluides circulant dans l'échangeur thermique est très important. En effet, le delta de la température ( $dT$ ), ou l'écart, doit être suffisant afin d'assurer l'échange de chaleur. Sans cet écart, le transfert ne pourrait pas avoir un lieu ou deviendrait très difficile, et donc énergivore. Pour chauffer le fluide primaire, le système dans lequel se trouve l'échangeur thermique va alors récupérer l'énergie générée grâce à des résistances électriques .

**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. Cela est vrai aussi pour le chauffage, la climatisation ou pour la production d'eau chaude sanitaire.

1 / Rendement de température du circuit chaud ( $\eta_h$ ) :

$$\eta_h = \frac{TH1-TH2}{TH1-TC1} \times 100$$

Dans ce cas, nous avons eu les trois expériences suivantes :

**A) Expérience1 :** Dans cette expérience, voilà ce que nous avons fait. En plaçant le premier dispositif, qui est l'échangeur de chaleur à tube concentrique TD360 a, et on a commencé cette expérience avec des changements de la température de l'entrée de l'eau chaude de façon de fixer trois températures  $Th_1=30c^\circ, Th_2=40c^\circ, Th_3=50c^\circ$ , et en plus de cela, nous avons ajusté le débit d'eau, d'eau chaude et d'eau froide sur  $Q_{vc}= 3L /min, Q_{vf} = 1,5 L/min$ , et nous avons fait cette expérience en deux étapes. La première étape est dans le cas du contre-courant et la deuxième dans le cas de Co-courant. Entre la première étape et la deuxième étape, nous avons refroidi l'appareil et on a recommencé à zéro et à l'aide de l'afficheur de circuit d'eau froide et l'afficheur de circuit d'eau chaude du banc d'essai Td360 sur lequel nous avons travaillé, nous avons pu anticiper la température de l'entrée et de sortie de l'eau froide ( $T_{c1}-T_{c2}$ ) et la température de sortie et d'entrée de l'eau chaude ( $Th_1-Th_2$ ). Ensuite, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le chapitre suivant.

*Donc on a :*

- ✓ Type de l'échangeur : pour un échangeur à tube concentrique (TD360 a)
- ✓ La configuration du courant de transfert : Co courant puis contre-courant
- ✓ Débit : fixe  $Q_{vc}= 3L /min, Q_{vf} = 1,5 L/min$
- ✓ Une température d'entrée de l'eau chaude variable

**B)Expérience 2 :**Dans cette deuxième expérience, nous avons fait toutes les étapes effectuées précédemment dans la première expérience, mais cette fois ci, nous avons changé l'échangeur, c'est-à-dire nous avons mis l'échangeur de chaleur à faisceau de tube et calandre (TD360 c) à la place de l'échangeur de chaleur à tube concentrique (TD360 a), puis nous avons suivi les températures( $T_{c1}-T_{c2}$  et  $Th_1-Th_2$ ) comme avant à l'aide des afficheurs de circuit de l'eau chaude et froide sur le banc d'essai TD360 .Ensuite, nous avons obtenu les résultats présentés dans le chapitre suivant.

*Donc on a :*



- ✓ Type de l'échangeur : un échangeur à faisceau et calandre (TD360 a)
- ✓ La configuration du courant de transfert : Co courant puis contre-courant
- ✓ Débit : fixe  $Q_{vc} = 3 \text{ L/min}$ ,  $Q_{vf} = 1,5 \text{ L/min}$
- ✓ Une température d'entrée de l'eau chaude variable

**C) Expérience 3 :** dans cette expérience on a calculé le rendement de chaque échangeur de chaleur sur les deux configurations de courants de transfert (Co-courant et contre-courant) puis nous avons fait une comparaison du rendement de la température du circuit chaud en fonction de température d'entrée de l'eau chaude. Comme il est indiqué sur la (figure IV.3)

### III.1.5.2 Effet de variations de débit

**A) Expérience 1:** Durant cette expérience, et après avoir remarqué dans les expériences précédentes que le transfert de chaleur est meilleur dans les deux échangeurs dans le cas où le courant est opposé, et que les performances et le rendement sont aussi meilleures dans le courant opposé dans les deux échangeurs par rapport au transfert Co-courant, donc là nous avons choisis de travailler dans cette expérience sur le courant opposé (contre-courant) avec un changement des paramètres et en comparant les deux échangeur (TD 360 a et TD 360 c). Cette fois nous avons modifié le débit d'eau froide en prenant trois valeurs  $Q_{vf1} = 1 \text{ L/min}$ ,  $Q_{vf2} = 2 \text{ L/min}$ ,  $Q_{vf3} = 3 \text{ L/min}$ . On a également fixé le débit et la température d'entrée de l'eau chaude en prenant une valeur de  $T_H = 50^\circ\text{C}$ , et après, nous avons suivi les autres températures ( $T_{C1} - T_{C2}$  et  $T_{H1} - T_{H2}$ ) sur les afficheurs de banc (TD 360). Au début, nous sommes fait cela sur le premier échangeur (échangeur de chaleur à tube concentrique), puis nous avons refroidi et ramené l'eau à son degré normal, puis nous avons répété la même chose avec le deuxième échangeur (échangeur de chaleur à faisceau).

**Donc on a :**

- ✓ Type de l'échangeur : un échangeur à tube concentrique & à faisceau et calandre (TD360 a)
- ✓ La configuration du courant de transfert : contre-courant
- ✓ Débit : variable  $Q_{v1} = 1 \text{ L/min}$ ,  $Q_{v2} = 2 \text{ L/min}$ ,  $Q_{v3} = 3 \text{ L/min}$
- ✓ Une température d'entrée de l'eau chaude fixée =  $50^\circ$

***Partie02 : Etude numérique d'un échangeur de chaleur à tube et calandre  
par ANSYS FLUENT***

### **III.2.1 Introduction**

Il existe de nombreuses études dans la littérature sur l'optimisation des échangeurs de chaleur.

Dans cette deuxième partie, une étude numérique a été effectuée pour analyser l'écoulement de fluide et le transfert thermique dans un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires et calandre. Les investigations sont effectuées à l'aide de logiciel de *ANSYS FLUENT RI.21* en utilisant la méthode de volumes finis. Une présentation du code de calcul *ANSYS Workbench* et *ANSYS FLUENT*, la configuration géométrique et physique de notre problème et sa formulation mathématique ont été également faite dans cette partie.

### **III.2.2 Présentation du logiciel**

**A) ANSYSWORKBENCH:**[56] 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.

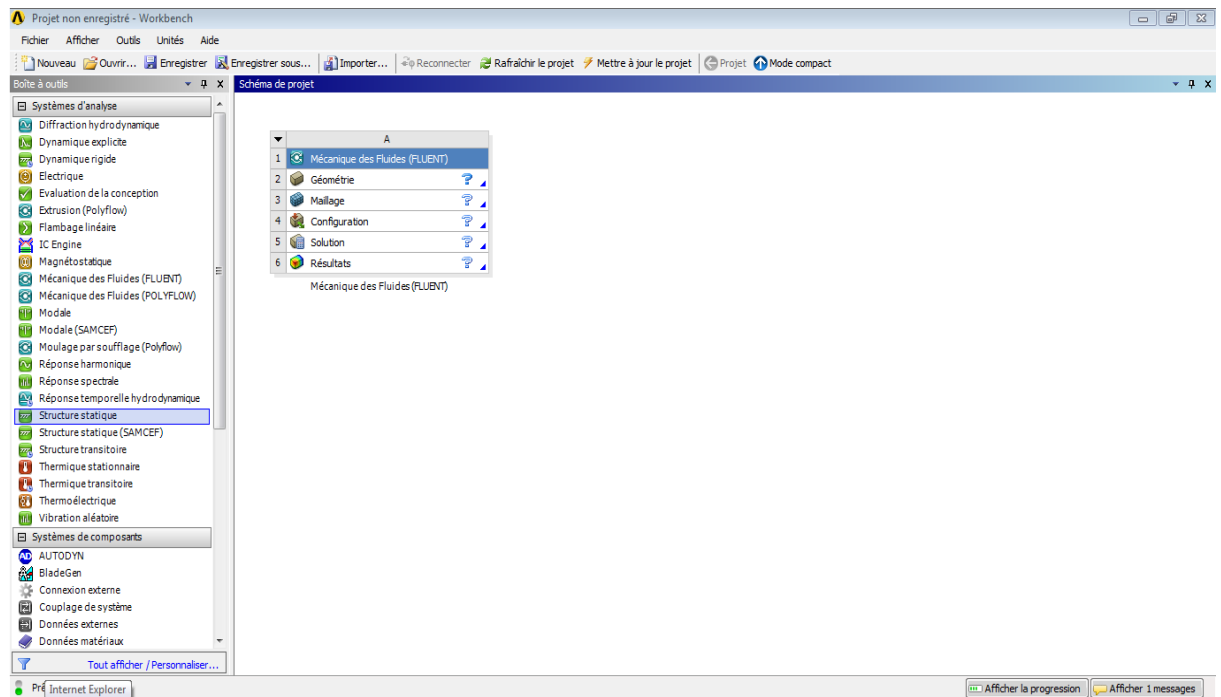


Figure III. 9 :Interface de logiciel ANSYS Workbench.

**B) ANSYSFLUENT :**FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques à l'intérieur ou autour des géométries complexes. Ce logiciel très répandu au sein de l'industrie (aérospatiale, automobile, nucléaire, chimique, biomédicales, environnement, météo, etc...), permet de résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, pour des géométries complexes, avec une relative facilité.

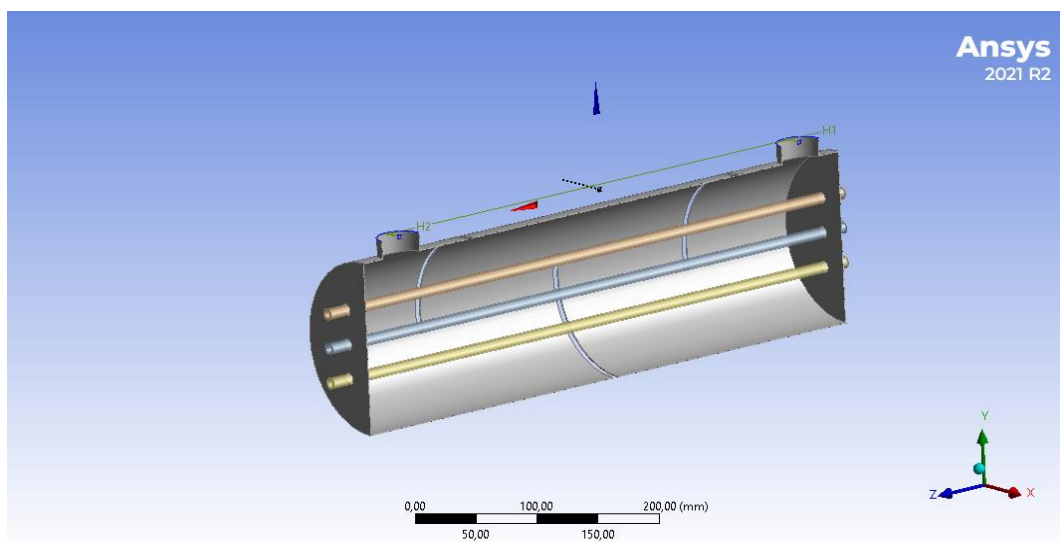
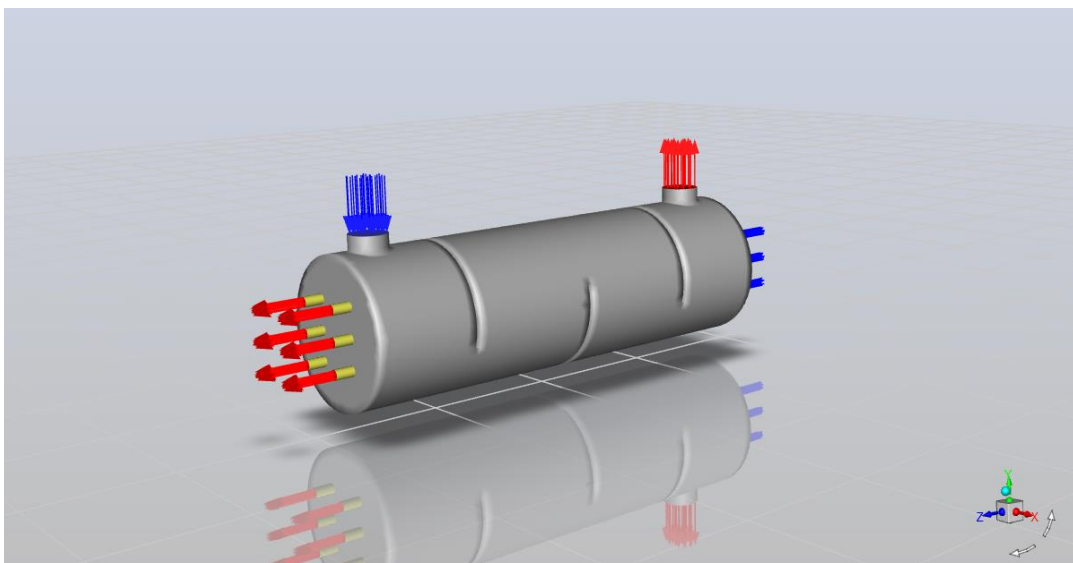
Le logiciel FLUENT est basé sur la méthode de modélisation numérique connue pour sa puissance de calcul et facilité de mise en œuvre : **méthode des volumes finis**.

Le principe de cette méthode est basé sur une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques. Ces dernières sont résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste à l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle.

### III.2.3Présentation du problème

La simulation numérique d'un écoulement de fluide stationnaire dans un échangeur de chaleur a été menée. La configuration géométrique du modèle étudié est montrée dans la(Figure III.10).

L'échangeur de chaleur étudié est de type à faisceaux de tube et calandre et est fabriqué en acier inoxydable. Deux fluides écoulent dans l'échangeur de chaleur, le premier fluide ( l'eau chaude ) s'écoule dans les tubes internes alors que le deuxième fluide ( l'eau froide) circule à l'extérieur du tubes, dans la calandre de l'échangeur de chaleur. Ces deux fluides ont des températures différentes, les chicanes sont aussi mis en place afin d'augmenter la surface d'échange de chaleur, un autre avantage de chicanes est de réduire les vibrations en raison du mouvement de fluide.



**Figure III.10 :** Géométrie de l'échangeur de chaleur étudié numériquement.

### III.2.4 Hypothèses simplificatrices

La formulation du problème étudié est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplifiées, y compris celles liées à la géométrie, au type d'écoulement, aux mécanismes de transfert. Nous avons examiné les hypothèses suivantes pour permettre une solution simple et pratique :

- Le fluide visqueux est newtonien et incompressible.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide ( $C_{pf}$ ,  $\lambda_f$ ,  $\rho_f$ ,  $\mu_f$ ) sont considérées constantes.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

### III.2.5 Équations gouvernantes [56] [57]

Les équations qui gouvernent le problème étudié sont les suivantes :

*Équation de continuité :*

Dans le cas général, la formule est donnée par :

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad \text{III.1}$$

*Equation de conservation de quantité de mouvement*

$$(\nabla \cdot \mathbf{U}) \rho \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\mu} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad \text{III.2}$$

*Equation d'énergie :*

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot (\nabla T) = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q \quad \text{III.3}$$

Nombre de Reynolds :

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\eta}$$

$\rho$  ; Densité

V; Vitesse

D; diameter

$\rho$  ; viscosité

Après les calculs  $Re > 2300$  , donc le régime est turbulent

Le modèle de la turbulence standard k- $\epsilon$  qui est basé sur l'énergie de dissipation ( $\epsilon$ ) (Eq.III.4) et l'énergie cinétique turbulente (k) (Eq.III.5) est employé dans cette étude.

$$V_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \epsilon \quad \text{III.4}$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) \epsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{P\epsilon}{K} - C_2 \frac{\epsilon^2}{K} \quad \text{III.5}$$

Où, le terme de production est :

$$P_k = \mu_T [\nabla \mathbf{u} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \quad \text{III.6}$$

La viscosité turbulente est modelée comme suit :

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{III.7}$$

Les constantes empiriques pour le modèle standard de k- $\epsilon$  sont assignés les valeurs suivantes:

$$C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.3$$

### III.2.6 Méthode des volumes finis (MVF)

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) .

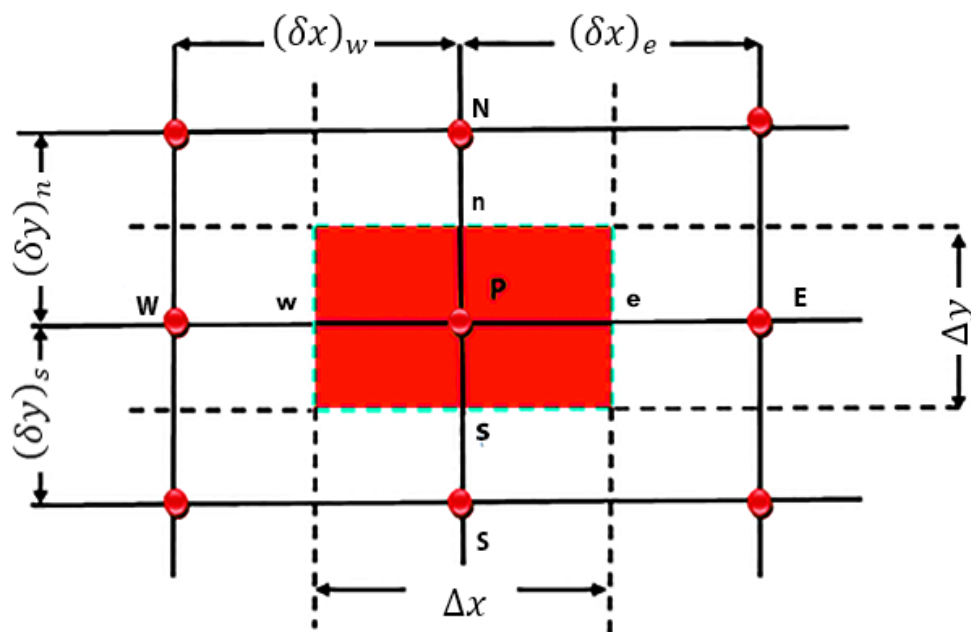
### III.2.6.1 Principe

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. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles (EDP) sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de

Contrôle.

➤ **Volume de contrôle typique** : ce volume de contrôle est utilisé pour l'expression des

Bilans des grandeurs scalaires. Les faces de ce volume sont localisées au pointe, w, n, s. Avec p le centre du volume de contrôle. E, W, N, S, sont les centres des volumes de contrôle adjacents. (Figure. III.11)



**Figure (III.11)** : Volume de contrôle typique bidimensionnel.

Pour un nœud principal P, les points E, W, N et S sont les centres des volumes de contrôle adjacents, situés respectivement à l'Est, à l'Ouest, au Nord et au Sud du point P. Le volume de contrôle P est montré par les lignes discontinues, et ces faces sont localisées aux points e et w dans la direction x, n et s dans la direction Y.

La subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection présente un nœud, où on trouve la variable P et les composantes u et v de la

vectrice vitesse qui se trouve au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents qui se séparent par les incréments de distance ( $\Delta y$ ,  $\Delta x$ ,  $\delta_{yn}$ ,  $\delta_{ys}$ ,  $\delta_{xw}$ ,  $\delta_{xe}$ ) sont définis sur la (Figure.III.1). Les scalaires  $\phi$  sont stockés au nœud central. Les composantes de vitesse  $u$  et  $v$  sont stockées dans des nœuds décalés (Figure.III.2). L'emploi de tels maillages entrelacés permet de calculer les gradients de pression dans les équations de quantité de mouvement, sans interpolation des pressions et le calcul des flux convectifs dans les équations sans interpolations des vitesses, cette technique nous permet d'éviter l'instabilité.

### III.2.7 Etapes de la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis passe par des étapes qui sont :

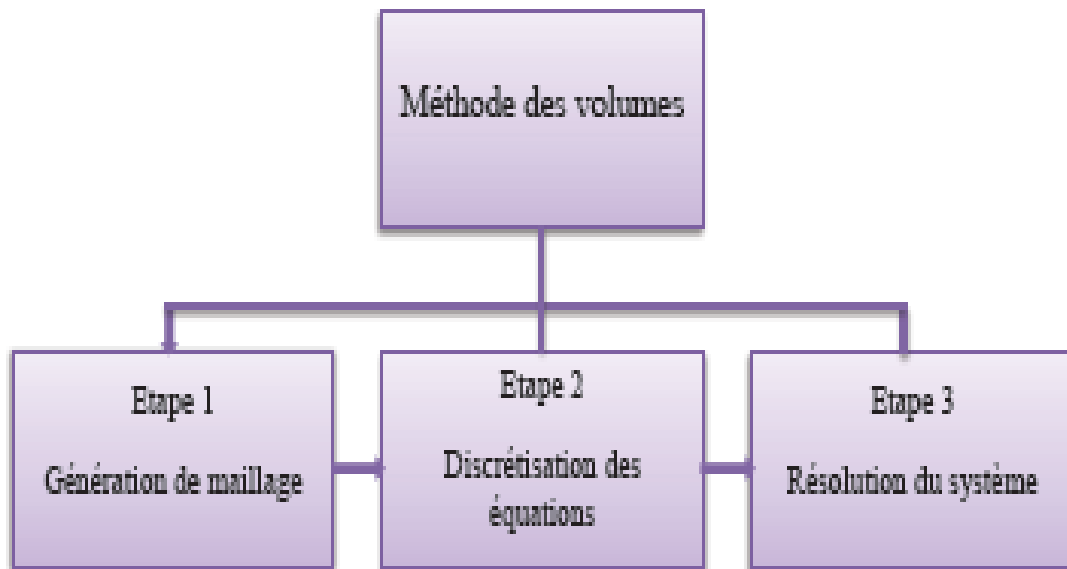


Figure (III.13) : Etapes de la méthode des volumes finis .

### III.2.9 Conditions aux limites

Les conditions aux limites pour les équations d'écoulement et le transfert de chaleur, conformément à la configuration tridimensionnelle, ont été appliquées à toutes les parois de l'échangeur de chaleur y compris les chicanes à savoir :

- La calandre est mise en acier et ayant une épaisseur de 5 mm.
- La vitesse et la température de l'eau à l'entrée côté tube sont uniformes et constantes.



- La vitesse et la température de l'eau à l'entrée côté calandre sont uniformes et constantes.
- Pour l'entrée de l'eau coté tube, le rayon est égal à 10 mm et pour l'entrée d'eau froide, il est de 40 mm à côté du plan de symétrie,
- La pression atmosphérique est appliquée à la sortie de la calandre et des tubes.
- Toutes les limites extérieures restantes sont isolées thermiquement.
- La première partie du processus de modélisation est le prétraitement, cela inclut la définition des paramètres, la préparation de la géométrie et la définition des sélections à étudiés. Définir les paramètres correctement, permet de mettre en place directement une étude paramétrique, En outre, cela fournit un aperçu rapide des conditions de fonctionnement dans les instructions de modélisation, plusieurs sélections sont également créées.



**CHAPITRE IV: Résultats et  
Interprétations**

**Partie01 : Résultats expérimentaux obtenus par TD360a et TD360c****IV 1.1 Introduction**

Les résultats des expériences obtenus par le TD360a de l'échangeur à Tube concentrique et TD360c de l'échangeur à faisceau et calandre seraient discutés dans cette première partie de ce chapitre. Les essais expérimentaux menés au cours de ce travail ont été effectués pour traiter les cas suivant : effet de variation de température d'entrée de l'eau chaude pour un débit fixe des deux fluides (eau froide et chaude) et pour deux configurations (Co et contre-courant) puis l'effet de variation de débit d'eau froide pour une température d'entrée de l'eau chaude fixe et pour deux configurations d'écoulement (Co et contre-courant) sur : la température de sortie de l'eau chaude et la température de sortie de l'eau froide, rendement de température du circuit chaud et rendement de température du circuit froid et l'efficacité de l'échangeur.

**IV1.2. présentation et discussion des résultats expérimentaux****IV 1.2.1 Effet de variations de Température:**

Avant de passer à la présentation des résultats expérimentaux obtenus et à l'interprétation, les tableaux IV.1 et tableau IV.2 montrent les températures d'entrée et sortie côté chaud et froid du fluide ainsi que leur écart et leur moyenne obtenus sur les deux types d'échangeur de chaleur « *Echangeur à tube concentrique*, *Echangeur à faisceau et calandre* » et dans les deux configurations d'écoulements. Les indices h, c, 1, 2, et moy indiquent respectivement chaud, froid, entré, sortie et moyenne.

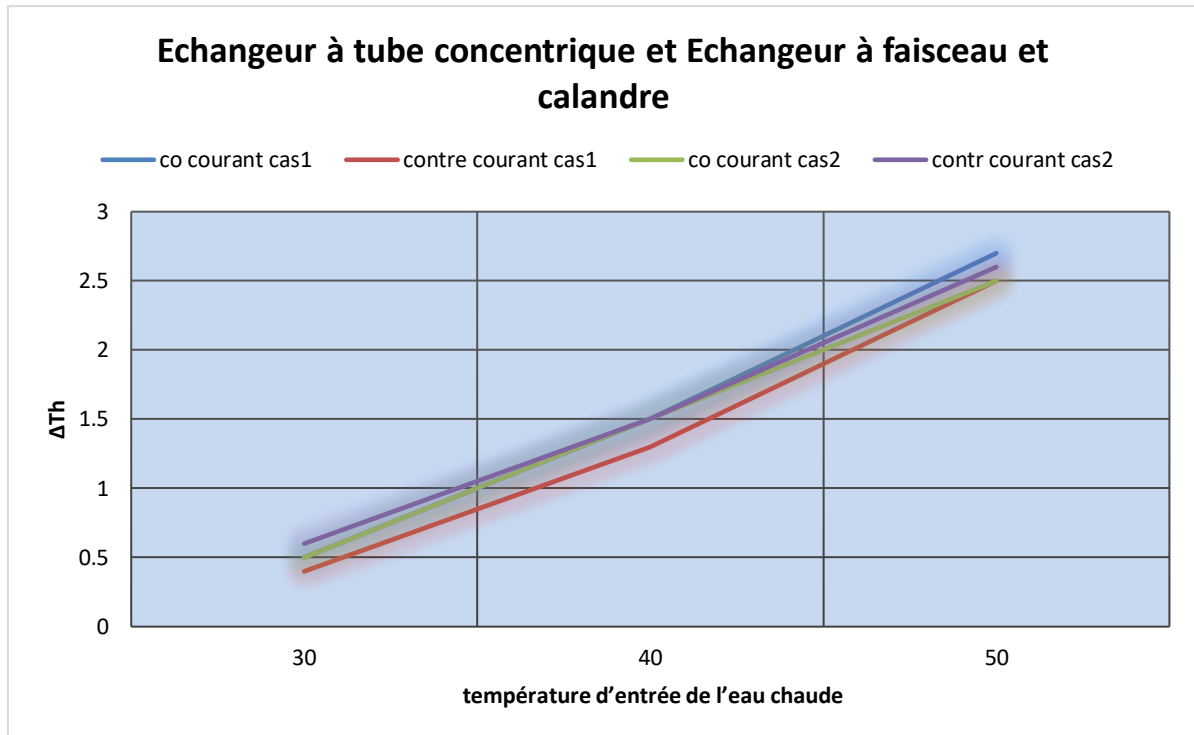
Tableau IV.1 :

<i>Echangeur à tube concentrique (Exp01)</i>											
<b>Co- Courant</b>											
Cas	T <sub>h</sub>	T <sub>h1</sub>	T <sub>h2</sub>	Δ <sub>T<sub>h</sub></sub>	T <sub>h3</sub>	T <sub>h-moy</sub>	T <sub>c1</sub>	T <sub>c2</sub>	Δ <sub>T<sub>c</sub></sub>	T <sub>c3</sub>	T <sub>c-moy</sub>
1	30	31,5	31,0	0,5	31,3	31,25	24,1	25,6	1,5	24,9	24,85
2	40	40,6	39,10	1,5	40,1	39,85	24,3	27,7	3,4	26,1	26
3	50	50,6	47,9	2,7	49,4	49,25	24,3	29,9	5,6	27,4	27,1
<b>Contre –Courant</b>											
Cas	T <sub>h</sub>	T <sub>h1</sub>	T <sub>h2</sub>	Δ <sub>T<sub>h</sub></sub>	T <sub>h3</sub>	T <sub>h-moy</sub>	T <sub>c1</sub>	T <sub>c2</sub>	Δ <sub>T<sub>c</sub></sub>	T <sub>c3</sub>	T <sub>c-moy</sub>
1	30	32,9	32,3	0,4	32,8	32,6	25,4	27,2	1,8	26,2	26,3
2	40	40,9	39,2	1,3	40,3	40,05	24,9	28,1	3,2	26,4	26,5
3	50	51,2	48,3	2,5	50,1	49,75	25,1	30,4	5,3	27,7	27,75

Tableau IV.2:

## Echangeur à faisceau et calandre(Exp02)

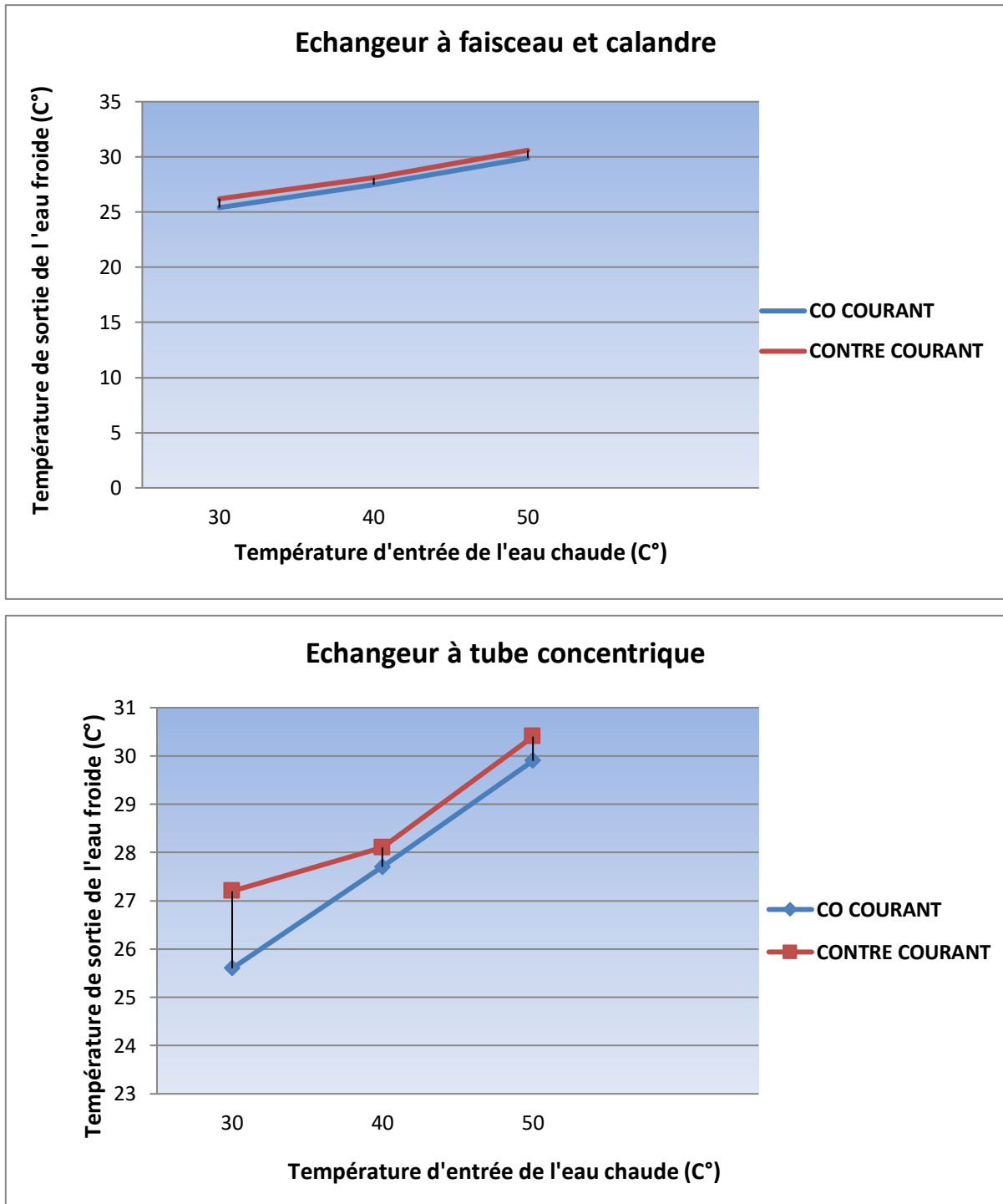
<b>Co- courant</b>											
Cas	Th	T <sub>h1</sub>	T <sub>h2</sub>	$\Delta_{Th}$	T <sub>h3</sub>	T <sub>h-moy</sub>	T <sub>c1</sub>	T <sub>c2</sub>	$\Delta_{Tc}$	T <sub>c3</sub>	T <sub>c-moy</sub>
1	30	31,2	30,7	0,5	25,6	30,95	24	25,4	1,4	25,3	24,7
2	40	40,9	39,4	1,5	26,9	40,15	24,2	27,5	3,3	26,1	25,85
3	50	50,8	48,3	2,5	28,3	49,55	24,5	29,9	5,4	27,1	27,2
<b>Contre –courant</b>											
Cas	Th	T <sub>h1</sub>	T <sub>h2</sub>	$\Delta_{Th}$	T <sub>h3</sub>	T <sub>h-moy</sub>	T <sub>c1</sub>	T <sub>c2</sub>	$\Delta_{Tc}$	T <sub>c3</sub>	T <sub>c-moy</sub>
1	30	31,9	31,3	0,6	30,9	31,6	24,9	26,2	1,3	29,6	25,55
2	40	40,9	39,4	1,5	31,2	40,15	25,1	28,1	3	29,9	26,6
3	50	50,7	48,1	2,6	32,1	49,4	25,3	30,6	5,3	30,3	27,95



**Figure IV, 1** :Ecart de température coté chaud en fonction de température d'entrée de l'eau chaude (Co courant& contre-courant) pour les deux échangeurs.

-Après les expériences faites dans le cas de l'échangeur de chaleur à tube (cas1),et dans le cas de l'échangeur de chaleur à faisceau et calandre (cas2),l'écart de température coté chaud en fonction de température de l'entrée de l'eau chaude en deux configurations , Co courant et Contre-courant est montrée sur la Figure ( IV, 1), on remarque que  $\Delta T_h$  augmente avec l'augmentation de la température de l'entrée de l'eau chaude dans les deux courants de transfert. Cela indique qu'il ya une proportionnalité directe, et la différence entre eux indique qu'il y a transfert de chaleur dans les deux sens du courant, avec une légère supériorité du courant opposé (contre -courant),

la remarque est similaire pour le cas d'un échangeur de chaleur à faisceau, toujours il y a une augmentation de  $\Delta T_h$  plus que la température de l'entrée de l'eau chaude augmente dans les deux courant de transfert.



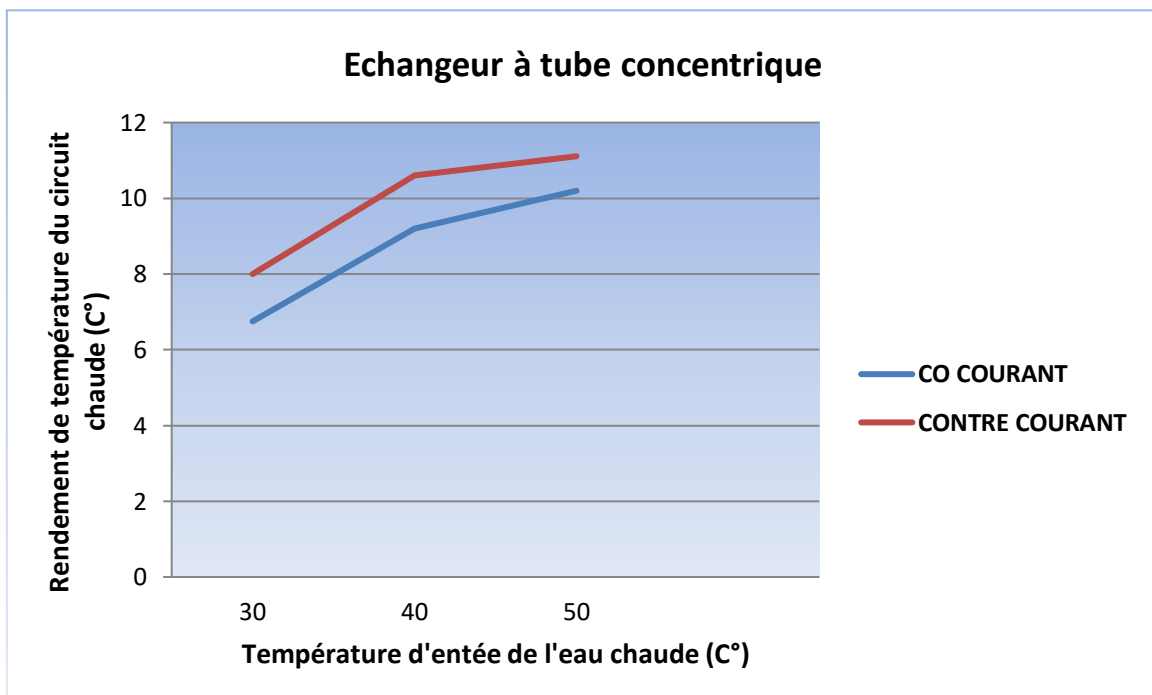
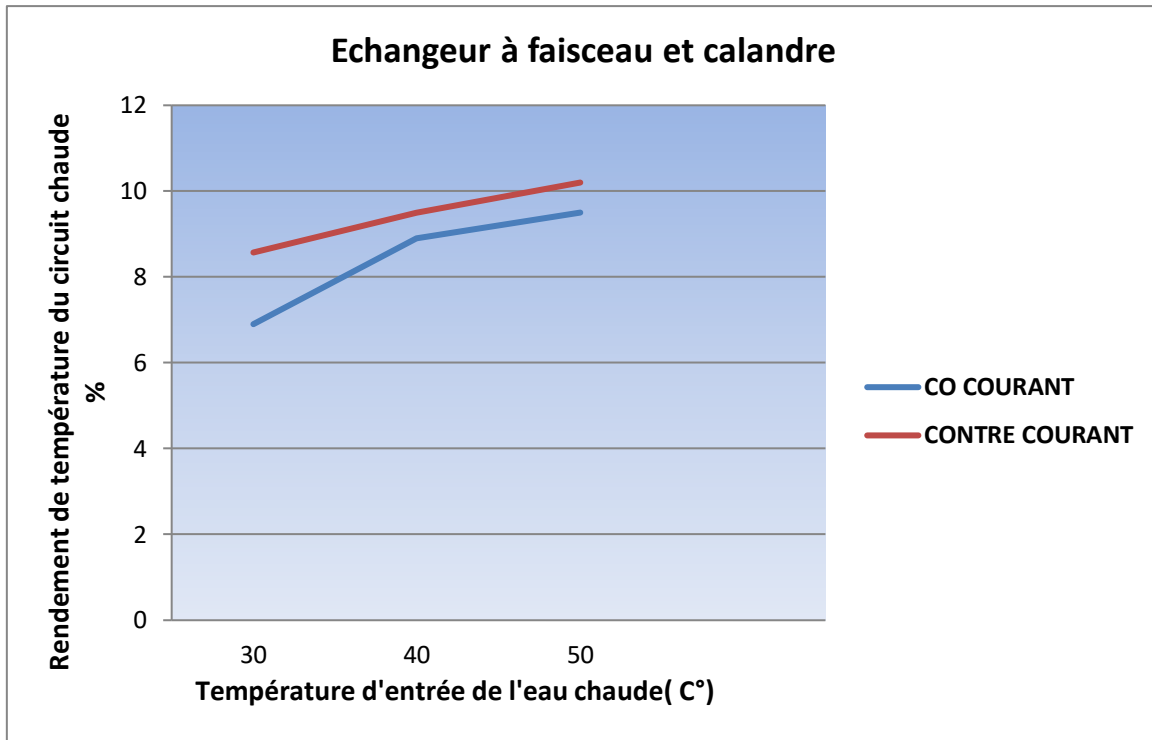
**Figure IV, 2 :** Température de sortie de l'eau froide en fonction de la température d'entrée de l'eau chaude (Co courant & Contre-courant) pour les deux échangeurs

La variation de la température de sortie de l'eau froide en fonction de la température d'entrée de l'eau chaude en deux configurations « Co courant et Contre-courant » est montrée sur les Figure( IV, 2 a et b), Dans ce cas on remarque que la température de sortie de l'eau froide augmente avec

l'augmentation de la température d'entrée de l'eau chaude , et ceci dans tous les courants de transfert (Co-courant et contre-courant),et la croissance de la température de sortie de l'eau froide indique que lorsque la température de l'eau chaude augmente, le transfert de chaleur de l'eau chaude vers l'eau froide augmente dans les deux courants de transfert avec aussi une légère supériorité du courant opposé(contre-courant),

-la figure (IV,2) « **b** »traite pour le cas de la deuxième expérience(échangeur de chaleur à faisceau) et représente la variation de la température de sortie de l'eau froide en fonction de la température de l'entrée de l'eau chaude en deux courant de transfert (Co courant et contre-courant) dans le même dispositif (échangeur de chaleur à faisceau ), dans ce cas on remarque qu'il y a une proportionnalité directe entre les deux allures de température , parce que à chaque fois qu' on augmente la températures de l'entrée de l'eau chaude cela correspond à une augmentation de la température de sortie de l'eau froid et ceci dans les deux courants de transfert (Co courant et contre-courant) .L'augmentation de la température de l'eau froide est générée par un transfert de chaleur entre l'eau chaude et l'eau froide quel que soit le courant de transfert avec aussi une supériorité légère du courant opposé (contre-courant).





**Figure IV 3 :** Rendement de température du circuit chaud (Co courant et contre-courant) en fonction de la température d'entrée de l'eau chaude pour les deux échangeurs

la Figure (IV , 3) montre le rendement de la température du circuit chaud (Co courant et contre-courant ) en fonction de la température d'entrée de l'eau chaude pour le cas d'un échangeur de chaleur à tube. Ici on remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de la température de l'entrée de l'eau chaude dans les deux courants de transfert .Il est à noter également que le rendement de l'échangeur

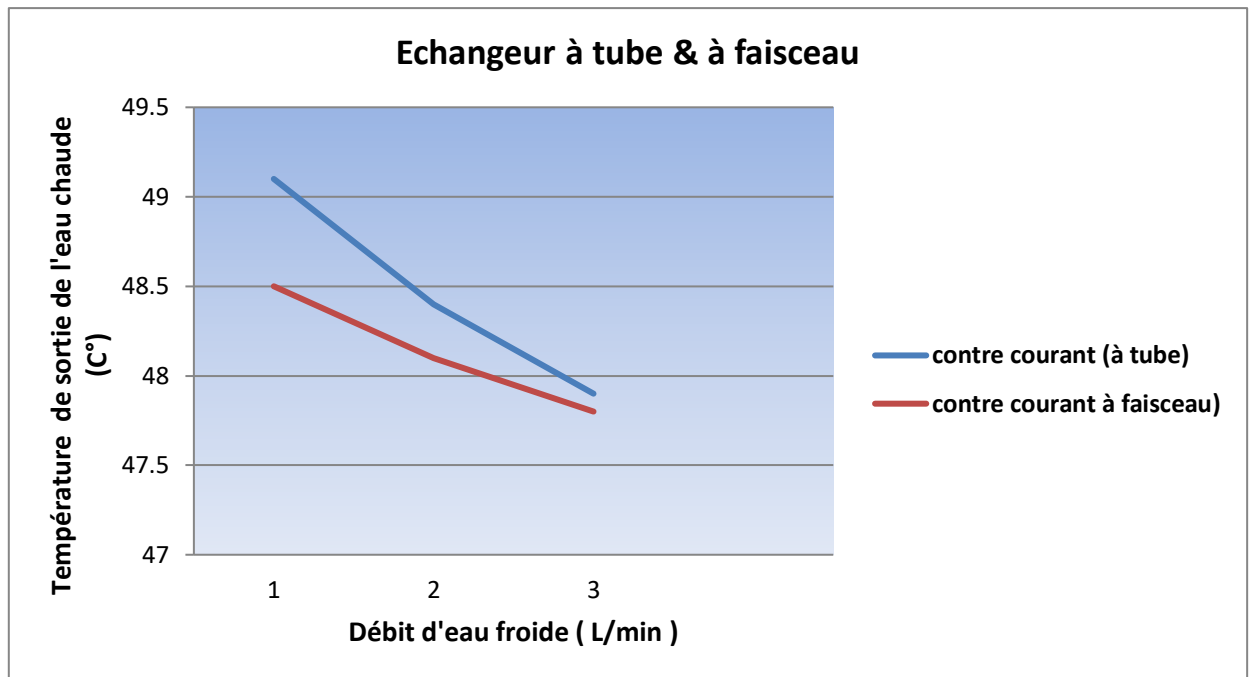
de chaleur à tube dans le courant de transfert opposé (contre -courant) est meilleur que le rendement dans le transfert Co-courant .

-la figure (IV,3) présente spécialement le cas d'un échangeur de chaleur à faisceau et montre une comparaison de rendement du circuit chaud en fonction de température de l'entrée de l'eau chaude , cette comparaison pour les deux différents courant de transfert (Co courant et contre-courant ) prouve que le rendement augmente avec l'augmentation de la température de l'entrée de l'eau chaude dans deux courant de transfert , et on remarque également que le rendement de l'échangeur de chaleur à faisceau en courant de transfert opposé 'contre-courant ) est meilleur que le rendement dans le transfert Co courant .

#### IV 1.2.2 Effet de variations de débit

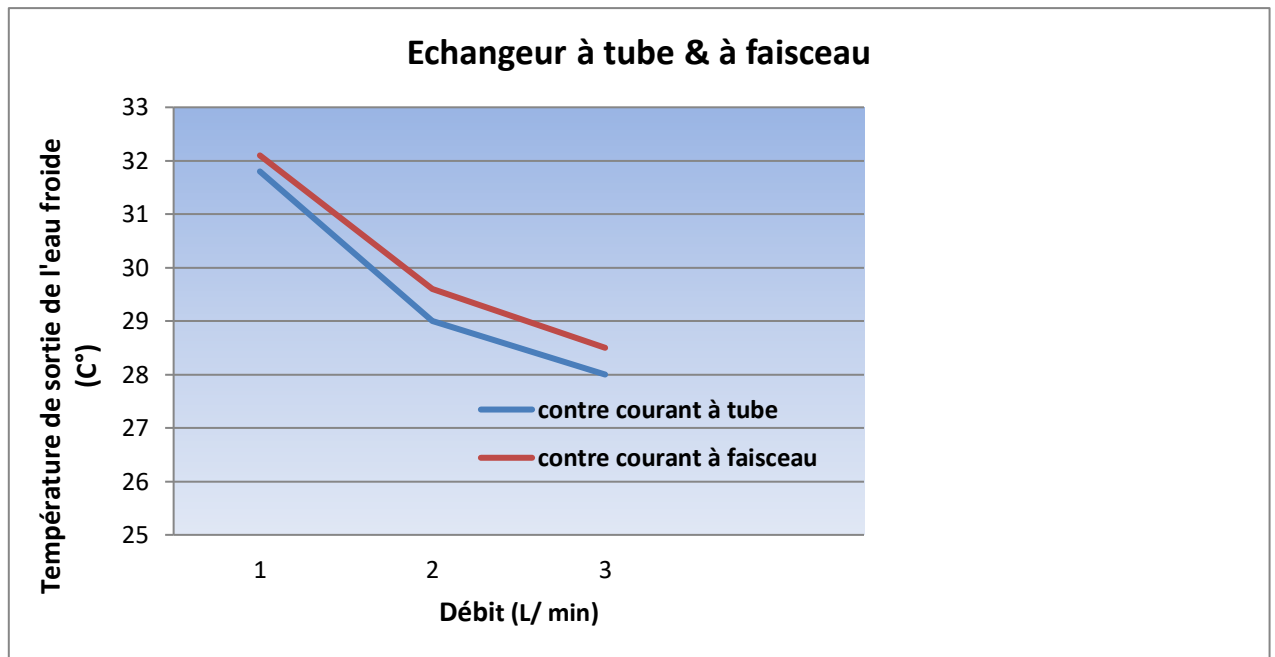
Tableau IV.3:

<b>Contre - courant (à tube)</b>											
Cas	Th	Th1	Th2	$\Delta_{Th}$	Th3	Th-moy	Tc1	Tc2	$\Delta_{Tc}$	Tc3	Tc-moy
<b>Qv= 1</b>	50	51,5	49,1	2,4	50,7	50,3	24,9	31,8	16,3	28,6	28,3
<b>Qv = 2</b>	50	51,6	48,4	3,2	50,2	50	24,2	29	4,8	26,6	26,6
<b>Qv= 3</b>	50	51,5	47,9	3,6	50	49,7	24,3	28	3,7	26,2	26,1
<b>Contre -courant (à faisceau)</b>											
Cas	Th	Th1	Th2	$\Delta_{Th}$	Th3	Th-moy	Tc1	Tc2	$\Delta_{Tc}$	Tc3	Tc-moy
<b>QV=1</b>	50	50,6	48,5	2,1	49,55	/	25,8	32,1	6,3	/	28,9
<b>QV=2</b>	50	50,8	48,1	2,7	49,45	/	25,3	29 ,6	4,3	/	27,4
<b>QV= 3</b>	50	51	47,8	3,2	49,4	/	25,3	28,5	3	/	26,9



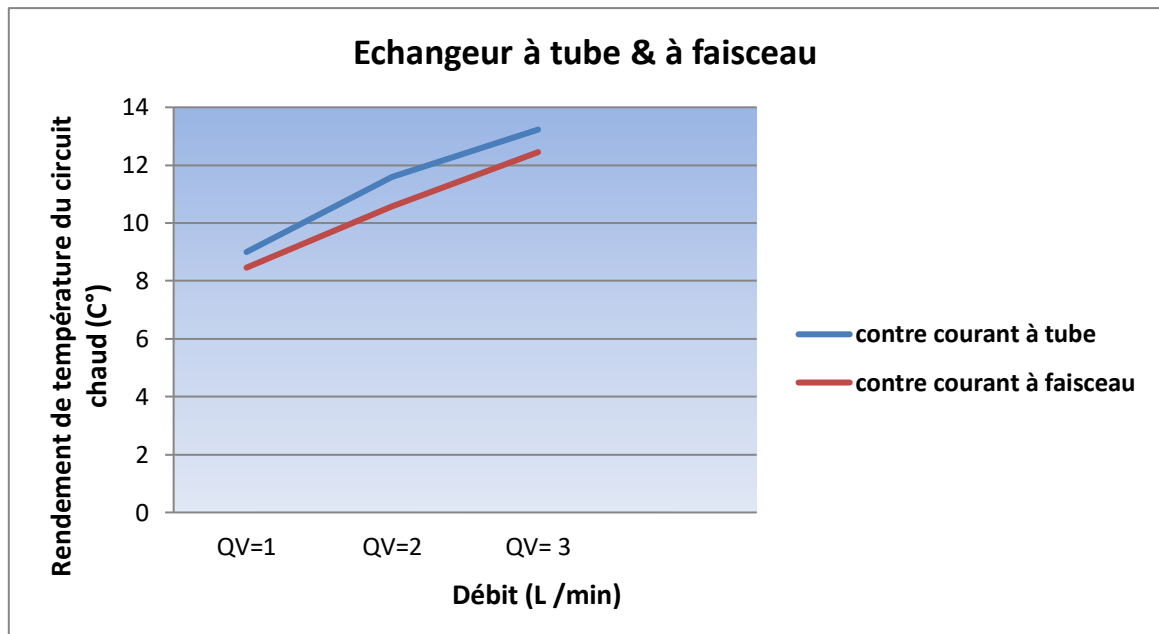
**Figure IV4 :** Température de sortie de l'eau chaude en fonction de débit (Contre-courant à tube & Contre-courant à faisceau)

-Sur la figure (IV.4), la température de sortie de l'eau chaude en fonction du débit d'eau froide pour un écoulement à contre-courant pour les deux échangeurs de chaleur à tube(en bleu) et à faisceau(en rouge) est présentée. Nous avons étudié cette expérience dans les conditions suivantes : la température d'entrée de l'eau chaude est fixée à 50°, et nous avons modifié le débit de l'eau en trois changements à savoir : 1L/min et 2 L/min et 3L/min. On remarque, que malgré le fait que la température de l'eau chaude à sa sortie de l'échangeur de chaleur est logiquement inférieure à celle de son entrée, Cette diminution diminue de plus en plus avec une augmentation du débit de l'eau froide. La chute de température est donc la même pour ces deux cas. (Pour les deux échangeurs de chaleur), et on note également que le transfert de chaleur entre les deux fluides est élevé dans l'échangeur à tube



**Figure IV .5 :** Température de sortie de l'eau froide en fonction de débit (Contre-courant à tube & Contre-courant à faisceau)

-La variation de la température de sortie de l'eau froide en fonction du débit volumique de l'eau froide est présentée sur la (figure IV. 5). On remarque, que malgré le fait que la température de l'eau froide à sa sortie de l'échangeur de chaleur est logiquement supérieure à celle de son entrée, cette augmentation diminue avec l'augmentation du débit de l'eau froide, et la différence entre les températures de sortie de l'eau froide et l'entrée de l'eau froide diminue de plus en plus avec l'augmentation de débit de l'eau froide. La chute de température est donc presque la même dans les deux dispositifs (échangeur de chaleur à tube et l'échangeur faisceau) Avec un transfert de chaleur est un peu élevé dans l'échangeur a faisceau

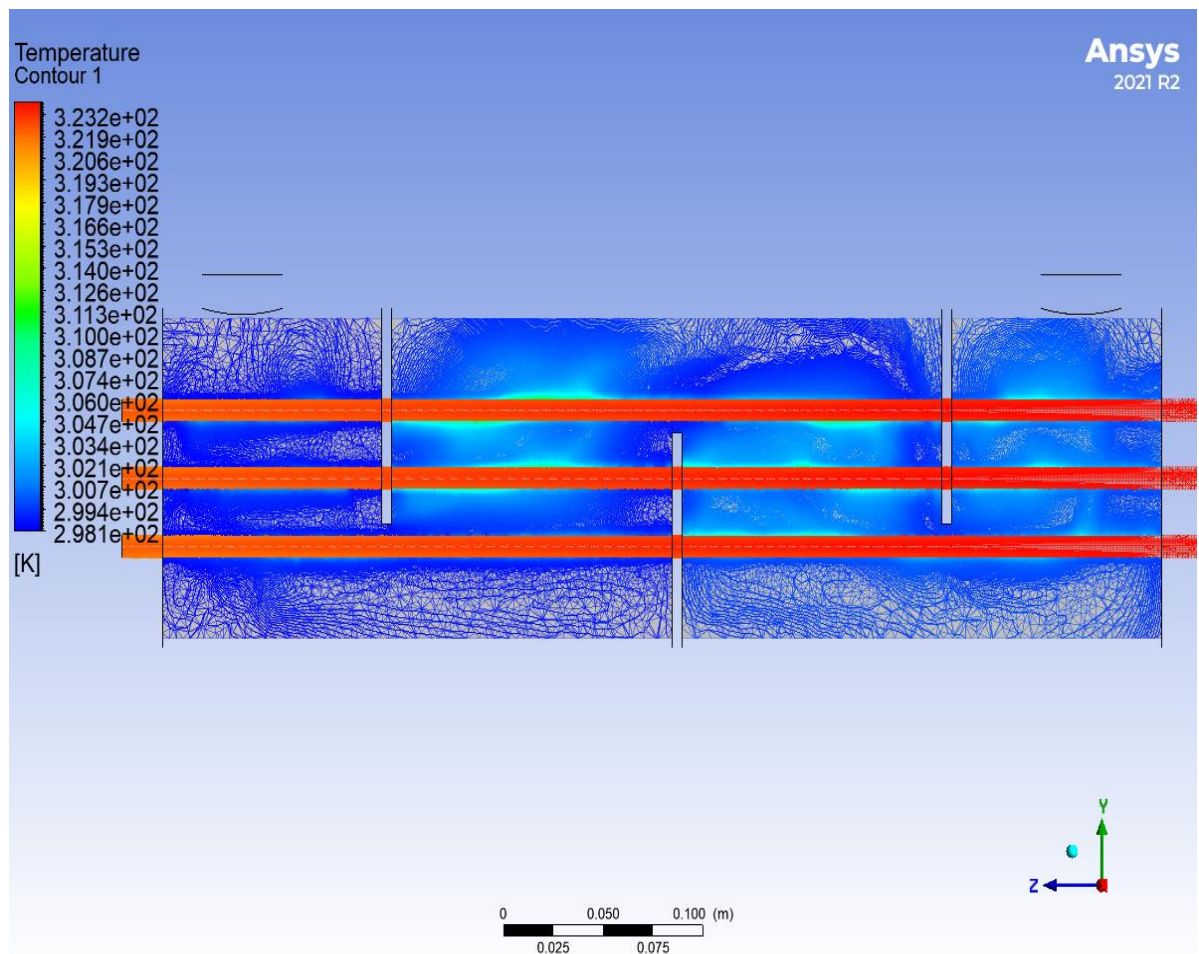


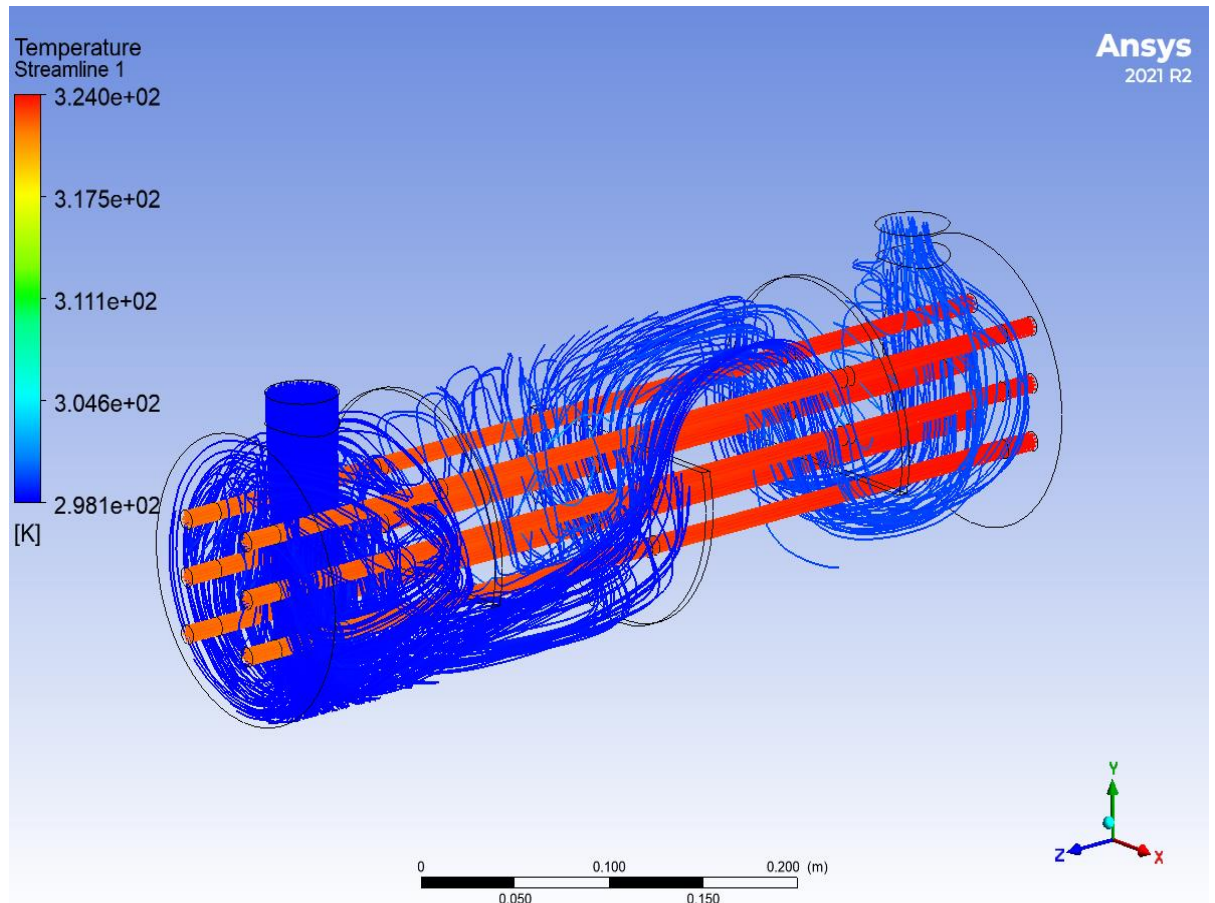
**Figure IV,6** : Rendement de température du circuit chaude (Contre-courant à tube et contre-courant à faisceau) en fonction de débit

-Pour rendre compte complètement des critères de sélection du point de vue thermique d'un échangeur de chaleur, il faudra introduire un paramètre très important, donc dans la figure (IV.6), nous avons fait une comparaison du rendement de la température de circuit chaud sur les deux échangeurs de chaleur (à tube et à faisceau) en fonction du débit sur qu'un seul courant de transfert (contre-courant), et d'après les calculs on remarque que le rendement de température du circuit chaud en fonction de débit est nettement meilleur dans le cas de l'échangeur de chaleur à tube par rapport à l'échangeur de chaleur à faisceau, malgré la variation de débit  $Q_f$ , et ces résultats présentés dans la figure IV.6

**partie 02:Simulation numérique d'un échangeur de chaleur à faisceau****IV 2.1 Introduction**

Dans ce travail, nous nous intéressons à simuler la réponse de l'échangeur de chaleur à faisceau soumis à des conditions spécifiques, les résultats numérique obtenus par le logiciel ANSYS FLUENT a été présenté dans cette partie ,qui contient aussi une discussion détaillée et une interprétation des résultats en termes d'effet de variation de températures et de l'effet de la variation pression et de vitesse dans la calandre et les tubes

**IV 2.2 présentation et discussion des résultats numérique****IV 2.2.1 Interprétation des résultats dans le cas de l'effet de variations de Température:**

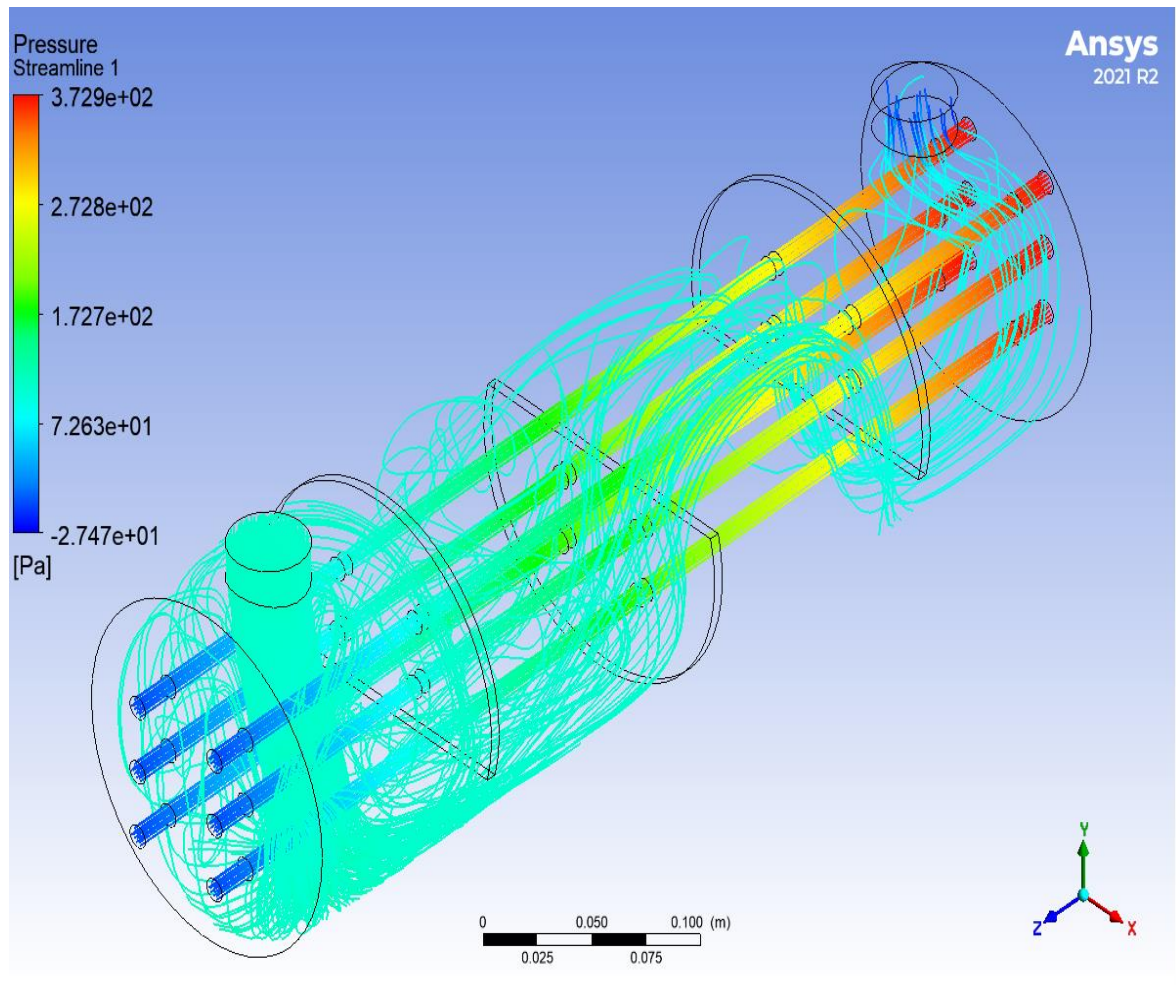


**Figure IV, 7** : La distribution de la température des fluides cotés tube et calandre

La figure (IV.7) montre l'échange thermique de l'eau froide dans la calandre, l'eau reçoit de la chaleur dégagée par les tubes, ce phénomène est plus clair surtout entre les chicanes. Le transfert de chaleur par convection entre les parois extérieures des tubes et le fluide assure une augmentation de température de 298K à 323K Q.

Cette figure montre également l'échange thermique de l'eau chaude en traversant les tubes, l'eau cède de la chaleur et sa température diminue à la sortie des tubes, sa diminution varie de 305K à 302K à cause d'un transfert de chaleur par conduction entre les parois extérieures et intérieures des tubes, la variation de la température dépend du mode de transfert de chaleur aussi.

## IV 2.2.2 Interprétation des résultats dans le cas de variations de pression



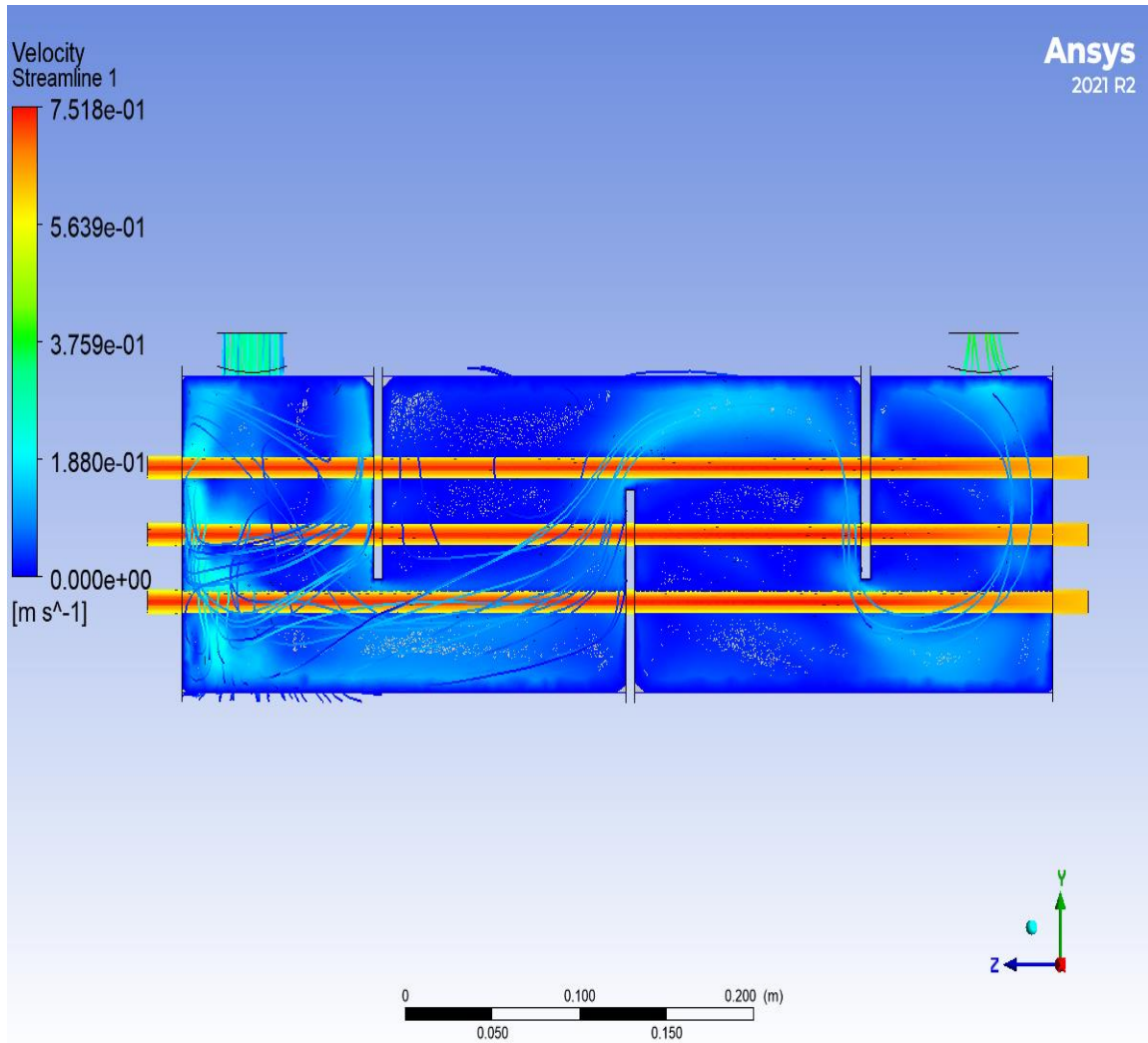
**Figure IV.8** : Variation de la pression cotée tube et calandre.

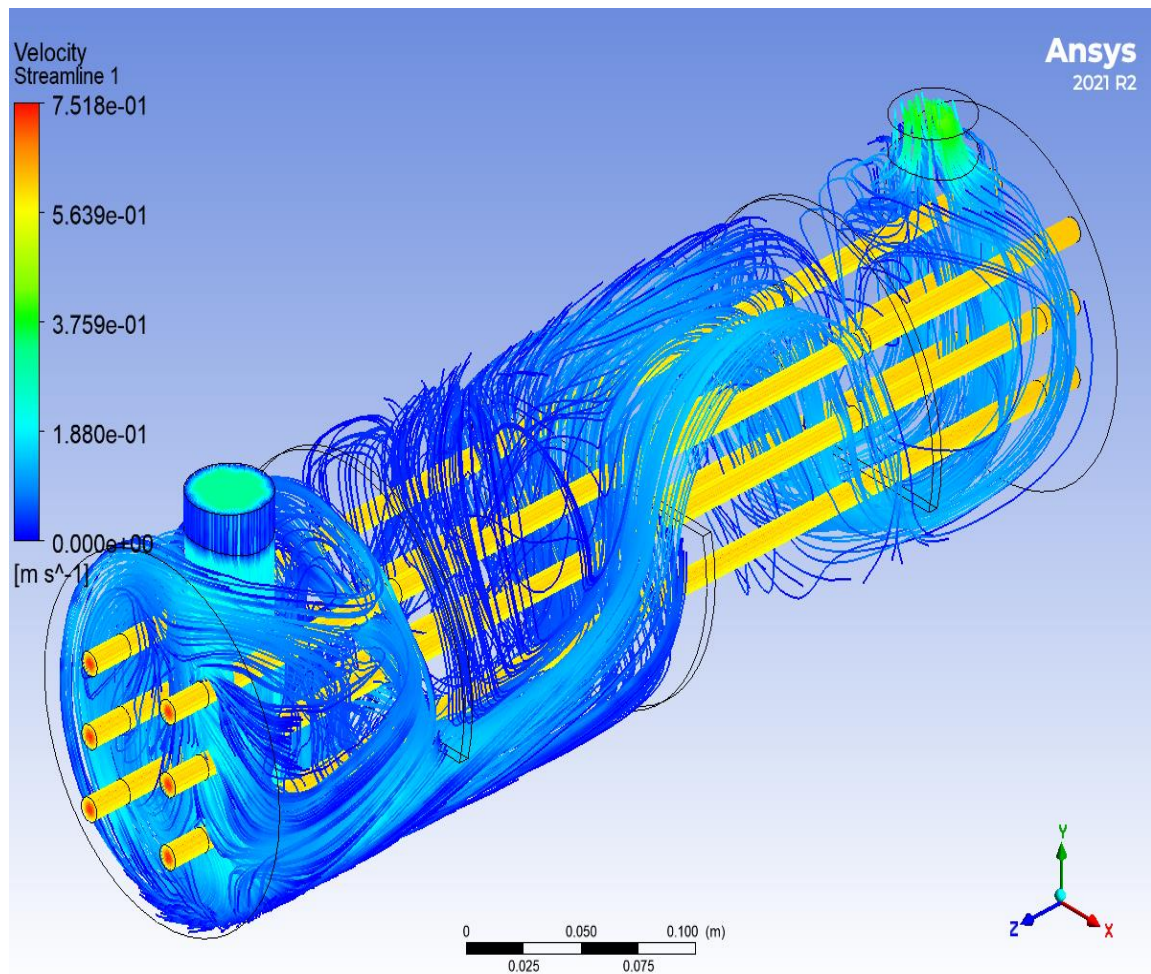
Pour la (figure IV.8), La différence entre la pression de l'eau froide à l'entrée et à la sortie dans la calandre est causée par la perte de pression linéaire et singulière provoquée par le frottement du fluide dans les parois des échangeurs et du chicane. Il est également remarquable qu'il y a une augmentation de la pression au bord des chicanes en raison d'un changement de section; cela provoque le liquide (eau froide) à se réchauffer. Ces pertes de charge et ces augmentations de température ont été causées par l'interaction des fluides avec la structure.



La pression à l'entrée des tubes est plus grande que la pression au point de sortie, ce qui est logique étant donné que le fluide a des pertes de charge linéaires le long du cours de son passage en raison de frottement avec la paroi de tube, et là on peut donc dire que la pression dépend de la température et la vitesse de circulation des fluides et de leurs caractéristiques physiques

#### IV 2.2.3 Interprétation des résultats dans le cas de variations de vitesse





**Figure IV.9** : Variation de la vitesse cotée tube et calandre.

La présentation de la résistance du fluide à la vitesse changeante aux extrémités de la calandre et du tube est représentée, respectivement, dans la (Figure IV.9). Il est évident que la vitesse de l'eau froide entrant dans la calandre est plus élevée que celle d'eau en sortant d'elle, et cela est dû aux obstacles (les chicanes et les parois extérieurs de tube et de la calandre).

L'écoulement est crucial à haute vitesse car il peut créer des virages autour des obstacles et faciliter la transmission de la chaleur, et de cela nous pouvons conclure que la vitesse des fluides dépend de la géométrie de l'échangeur de chaleur et le chemin suivi par le fluide



**Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

---

Le présent travail de mémoire de fin d'étude est basé sur l'étude, en régime permanent, du comportement thermique d'un écoulement dans deux échangeurs de chaleur de type différents, à double tube concentrique et à faisceau et calandre.

Ce projet est divisé en deux parties, la première partie a été effectuée expérimentalement dans le laboratoire de mécanique de l'université Belhadj Bouchaïb Ain Temouchent, puis une étude numérique qui a été effectuée par le logiciel **ANSYS FLUENT** pour analyser l'écoulement de fluide dans un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires et calandre

Une étude comparative entre les résultats expérimentaux de ces deux types d'échangeurs de chaleur 'bi tubulaire et à faisceau et calandre' pour deux modes de circulation Co-courant et contre-courant a été faite.

L'étude de l'influence de la variation du débit et de la température d'entrée a été aussi traitée et analysée pour ces deux modes dans la première partie.

A travers les résultats obtenus on a conclu que :

- L'augmentation de débit à l'intérieur du tube conduit à diminuer l'écart de température
- si la température d'entrée du fluide chaud augmente donc l'échange de la chaleur entre les deux fluides augmente en termes de puissance thermique.

- L'échangeur de chaleur à contre-courant est beaucoup mieux que l'échangeur de chaleur à Co-courant.

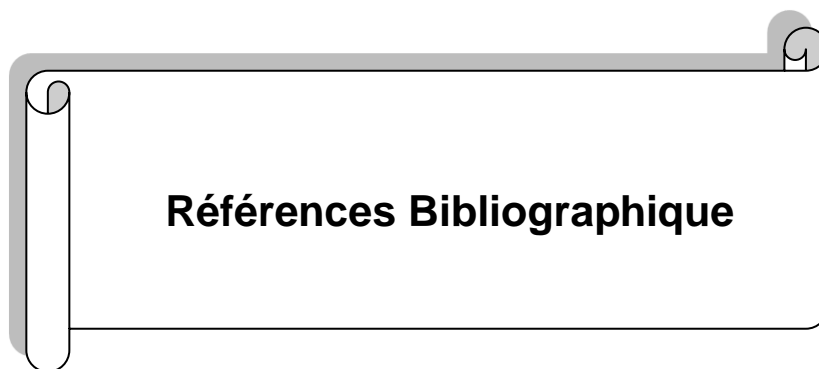
Le fonctionnement de l'échangeur de chaleur dépend de nombreux paramètres les plus importants de ces paramètres est la température ainsi le régime de l'écoulement.

Dans la deuxième partie et à cause des résultats numériques obtenus on a conclu que :

- La température des fluides, la vitesse de circulation, les propriétés physiques, telles que la densité et la viscosité, ainsi que la géométrie de l'échangeur de chaleur, affectent toutes la pression.

- La géométrie de l'échangeur de chaleur et le chemin du fluide déterminent la vitesse des fluides.

- Les changements de température dépendent du mode de transfert de chaleur.



**Références Bibliographique**

## Référence bibliographique

---

- [1]. bougriou c(1991) c(1991) onctionnement de l'échangeur de chaleur dépend de nombreux paramèta ailettes phDthesis. INSA de Lyon ISAL87
- [2]. Gnielinskiv(1976) New equations for heat transfNew in Turbulent pipe and Channel flow. int ChemEng 16:359-368
- [3]. Zo].359-368LE, Nadia CANEY, Patrice CLnel flow. int t transf chaleur dépend de nombreux paramètres les plus importants de ces paramètres est la température ainsi le régime d
- [4] : Livre : Transfert thermique Auteur : ANA-MARIA BIANCHI, YVES FAUTRELLE et JAQUELINE ETAY.(Hadi ta3 vre :
- [5] : Livre : Initiation aux transferts thermiques. Auteur : J.F. SACADURA.( Hadi tani)
- [6] : S. Sall ; Introduction gongtiongransfertsthermiques. Auteur : J.F. SACADURA.univ-tlemcen ; 2014
- [7] A. Mekhnache, R. Cedrati ; Les ; Les Les ti ; Les Leserts thermiques. Auteur : J.F. SACADURA.( Hadi tani) ; 2006 ;
- [8] M. Zemri ; Energies Renouvelables ; cours Master 1 Energies Renouvelables ;
- [9] Dr Belhamiani ; transfère de chaleur ; cours Master 1 transféré de chaleur ; PDF
- [10] Dr.H.benzenine; TP ; transhaleur ; cours Master 1 transféré de chaleur
- [11] Http: //www.prodidac.fr/energ%E9tique%/20/transferts%20thermiques
- [12]prodidac.fr/energ%E9tique%/20/transferts%20thermiquesww.prodidacUllmann' s-Encyclopedia-of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, DOI : 10.1002/14356007. b03\_02, 15 juin 2000, 114 p
- [13] [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur\\_de\\_chaleur](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur_de_chaleur)
- [31] A. OUGANA ; Etude et dimensionnement d'un système de refroidissement Tchîn-lait, Candia, Universités de Bejaia ; 2019 ; 3p

## Référence Bibliographique

---

[32] Belhadi .Noureddine ;Étude Thermique D'un Échangeur de Chaleur à Faisceau Tubulaire et Calandre (Eau de mer/Ammoniac)

[33]S.SALAOUATCHI ;ETUDE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A TUBES ET CALANDRE, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

[34]H.BECHIKR;Etude expérimentale et numérique d'un échangeur à faisceau de tube et calandre ; Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

[35]MELLAL Mustapha ;Caractérisation de l'écoulement de fluide et de transfert thermique dans un échangeur à faisceaux tubulaires, USTO MB

[36]N. BOULTIF ;Comportements des échangeurs de chaleur à tubes coaxiaux face aux perturbations

[37]N.Naili ;Optimisation analytique et validation expérimentale d'un échangeur enterré

[38]REHRAH ;ETUDE THERMIQUE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A FAISCEAU ET CALANDRE E102 A/BBougaraBoumerdes

[39],[40],[42],[43];ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUES D'UN ECHANGEUR A FAISCEAU DE TUBEET CALANDRE, Belhadj bouchaib - aintemouchent

[41] M.AMZAL;ETUDECOMPARATIVE DES TROIS MODELSD'ECHANGEUR DE CHALEUR A PLAQUES PAR SIMULATION NUMERIQUE, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

[40] MELLAL Mustapha ;Caractérisation de l'écoulement de fluide et de transfert thermique dans un échangeur à faisceaux tubulaires, USTO MB

[56] D. Adjaimi, Etude numérique en CFD de la convection naturelle dans des échangeurs de chaleur à ailettes carrées, Mémoire de master, Université de Biskra, 2018.

[55] M. Rekioua, Etude des performances d'un échangeur de chaleur croise avec ou sans ailettes poreuses, Mémoire de magistère, Université de Batna, 2011.

## Référence Bibliographique

---

[56] BRAHIM mahfoud . Simulation numérique d'un échangeur de chaleur à contre courant

[57] Université Paris-Saclay Master 2 Dynamique des Fluides et Energétique 2019-20