

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité: Energétique

THÈME

Etude expérimentale d'un échangeur de chaleur coaxial simple à tubes coaxiaux

Préparé par :
DJAIAI Ahmed
MEZLINI Mohamed Salah

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
CHAIB Khaled	MCB	Université Ibn Khaldoun Tiaret	Président
ABED Belkacem	MCA	Université Ibn Khaldoun Tiaret	Examinateur rap
SAD CHEMLOUL Nord-Eddine	MCA	Université Ibn Khaldoun Tiaret	Encadreur
BELMILOUD Mohamed Amine	MCB	Université Ibn Khaldoun Tiaret	Co- Encadreur

Année universitaire : 2016-2017

Dédicaces



*Je dédie ce mémoire
À mon cher père,
À ma très chère mère,
À mes frères et sœurs,
À mes amis.*



*DJEDIAI AHMED
MEZZINI MOHAMED
SALAH*

Remerciements

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

*Premièrement et avant tout, nous adressons le grand remerciement à notre encadreur **Mr : Nord-Eddine SAD CHEMLOUL** et Co-encadreur: **Mohamed Amine BELMILOU** pour ses conseils et ses dirigés.*

*Enfin, un grand merci à tous les enseignants d'énergétique, A Mr : **ABED Belkacem ET CHAIB Khaled**.*

Nous voulons également remercier tous les étudiants de notre promotion et nous souhaitons le bon courage à tous les étudiants pour finir ces études. Nous remercions également tous les professeurs du département.

Que toute personne ait participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail accepte nos grands et sincères remerciements.

Merci à tous.

Sommaire

	Pages
Dédicace.....	i
Remerciement.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Nomenclature.....	xi
Introduction générale.....	1

Chapitre 01 : Etude Bibliographique

1.1 les échangeurs de chaleur.....	3
1.1.1 Principe de fonctionnement.....	3
1.1.2 Circulation des écoulements.....	4
1.1.3 Distribution des températures.....	4
1.2 Différents types d'échange	5
1.2.1 Échange sans changement de phase.....	5
1.2.2 Échange avec changement de phase	5
1.3 Différents types d'échangeurs de chaleur	6
1.3.1 Échangeurs tubulaires.....	6
1.3.2 Échangeurs à plaques.....	8
1.4 Etude bibliographique.....	9

Chapitre 02 : Bilan énergétique

2.1. Description d'un échangeur coaxial.....	14
2.1.1. Principe de fonctionnement.....	14
2.1.2. Hypothèses d'étude	14
2.2. Bilan énergétique.....	15
2.2.1. Coefficient global de transfert.....	16
2.2.2. Méthode de ΔT_{LM} dans le cas U est constant.....	18
2.2.2.1 Échangeur à Co- courant.....	18
2.2.2.2 Échangeur à contre-courant	21
2.2.3. Méthode de ΔT_{LM} dans le cas U n'est pas constant.....	22

Chapitre 03 : Résultats et discussions

3.1 Introduction.....	24
3.2 Description de banc d'essai.....	24
3.3 Résultats expérimentales.....	26
3.3.1 Débit chaud fixe.....	26
3.3.1.1.Co-courant.....	26
3.3.1.2.Contre-courant	28
3.3.2. Température chaude fixe.....	30
3.3.2.1.Co-courant	30
3.3.2.2.Contre-courant	32
3.3.3. Différence de la température logarithmique moyenne ΔTLM	32
3.3.4. coefficients d'échange global	34
3.3.4.1.Co-courant.....	34
3.3.4.2.Contre-courant	35
Conclusion générale.....	39
Références bibliographiques.....	40
Annexe A.....	42
RESUME	

Liste des figures

Figures	Titres	Pages
Figure 1.1	Différent modes de circulation	4
Figure 1.2	Distribution des températures dans des échangeurs tubulaire coaxiaux.....	5
Figure 1.3	Échangeur monotube en serpentín.....	6
Figure 1.4	Échangeur coaxial	6
Figure 1.5	Échangeur à tubes séparés.....	7
Figure 1.6	Échangeur à tubes rapprochés	7
Figure 1.7	Échangeur à tube ailette	7
Figure 1.8	Divers constituants d'un échangeur à faisceau et calandre.....	8
Figure 1.9	Échangeur à plaques brasées: assemblage des plaques	9
Figure 1.10	problème considéré par [8].....	10
Figure 1.11	problème considéré par [9].....	10
Figure 1.12	problème considéré par [10].....	11
Figure 1.13	problème considéré par [11].....	12
Figure 1.14	problème considéré par [12].....	12
Figure 1.15	problème considéré par [13].....	13
Figure 2.1	Schéma d'un échangeur tubulaire simple.....	14
Figure 2.2	Schématisation des fonctionnements à co-courant et à contre-courant.....	14
Figure 2.3	représentation des surfaces d'échanges	15
Figure 2.4	Profil de température lors de l'échange à travers un élément de surface dS	17
Figure 2.5	Evolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur Co-courant	19
Figure 2.6	Evolution des températures du fluide chaud et du fluide froid d'un échangeur contre-courant.....	21
Figure 1.22	Description de banc d'essai : a) circuit d'échangeur de chaleur, b) réservoir de stockage	25
Figure 3.2	Variation du profil de la température d'eau (chaude et froide) en fonction des différentes positions dans un échangeur co-courant et pour $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$: a) $T_C = 40^\circ\text{C}$, b) $T_C = 50^\circ\text{C}$, c) $T_C = 60^\circ\text{C}$ et d) $T_C = 70^\circ\text{C}$	28
Figure 3.3	Variation du profil de la température d'eau (chaude et froide) en fonction des différentes positions dans un échangeur contre-courant et pour $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$: a) $T_C = 40^\circ\text{C}$, b) $T_C = 50^\circ\text{C}$, c) $T_C = 60^\circ\text{C}$ et d) $T_C = 70^\circ\text{C}$	30

Figure 3.4	Variation de profile de la température (chaude et froide) en fonction de différentes position pour l'échangeur co-courant et pour la température $T_C = 70^\circ\text{C}$: a) $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et b) $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$	31
Figure 3.5	Variation de profile de la température (chaude et froide) en fonction de différentes position pour l'échangeur contre-courant et pour la température $T_C = 70^\circ\text{C}$: a) $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et b) $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$	32
Figure 3.6	Variation de la ΔTLM en fonction des différentes valeurs de débits froid pour l'échangeur co-courant et pour les différentes températures : a) $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et b) $Q_F = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$	33
Figure 3.7	Variation de la ΔTLM en fonction des différentes valeurs de débits froid pour l'échangeur contre-courant et pour les différentes températures : a) $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et b) $Q_F = 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$	34
Figure 3.8	Variation du Coefficient d'échanger global U en fonction des différentes valeurs de débits chaud pour les différentes températures : a) co-courant, b) contre –courant	37

Liste des tableaux

Tableaux	Titres	Pages
Tableau 2.1	variation du coefficient d'échange global pour les différents types d'échangeurs.....	18
Tableau 3.1	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	27
Tableau 3.2	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	27
Tableau 3.3	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	27
Tableau 3.4	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	27
Tableau 3.5	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	29
Tableau 3.6	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	29
Tableau 3.7	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	29
Tableau 3.8	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	29
Tableau 3.9	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	31
Tableau 3.10	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	31
Tableau 3.11	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	32
Tableau 3.12	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	32
Tableau 3.13	les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$ et $Q_F = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$	35
Tableau 3.14	les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $Q_F = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$	35
Tableau 3.15	les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$ et $Q_F = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$	35
Tableau 3.16	les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des	35

	différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$ et $Q_F = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$	
Tableau 3.17	les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$ et $Q_F = 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$	36
Tableau 3.18	les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$ et $Q_F = 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$	36
Tableau 3.19	les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$ et $Q_F = 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$	36
Tableau 3.20	les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$ et $Q_F = 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$	36
Tableau B.1	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	45
Tableau B.2	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	45
Tableau B.3	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	45
Tableau B.4	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	45
Tableau B.5	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	46
Tableau B.6	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	46
Tableau B.7	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	46
Tableau B.8	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	46
Tableau B.9	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	47
Tableau B.10	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	47
Tableau B.11	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude	47

Liste des tableaux

	$Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	
Tableau B.12	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	47
Tableau B.13	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	48
Tableau B.14	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	48
Tableau B.15	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	48
Tableau B.16	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	48
Tableau B.17	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	49
Tableau B.18	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	49
Tableau B.19	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 300 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	49
Tableau B.20	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	49
Tableau B.21	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	50
Tableau B.22	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	50
Tableau B.23	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	50
Tableau B.24	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	50
Tableau B.25	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$	51
Tableau B.26	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	51
Tableau B.27	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	51
Tableau B.28	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude	51

Liste des tableaux

	$Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	
Tableau B.29	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	52
Tableau B.30	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$	52
Tableau B.31	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	52
Tableau B.32	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	52
Tableau B.33	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	53
Tableau B.34	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	53
Tableau B.35	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$	53
Tableau B.36	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	53
Tableau B.37	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	54
Tableau B.38	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	54
Tableau B.39	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	54
Tableau B.40	les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$	54

Nomenclature

Nomenclature

C	Débit calorifique	$[W / ^\circ C]$
Cp	La chaleur spécifique	$[J / Kg ^\circ C]$
e	épaisseur de la paroi solide	$[m]$
h	le coefficient moyen d'échange de chaleur par convection	$[W/m^2 \cdot ^\circ C]$
L	Longueur	$[m]$
\dot{m}	Débit massique Chaud	$[Kg / s]$
$P_{\text{absorbée}}$	Puissance absorbée	$[w]$
$P_{\text{émise}}$	Puissance émise	$[w]$
Q	Débit de fluide	$[Kg / s]$
R_e	la résistance par unité de surface de films	$[(m^2 \cdot ^\circ c) / w]$
S	La surface d'échange	$[m^2]$
T_F	La température de fluide froid	$[^\circ C]$
T_C	La température de fluide chaud	$[^\circ C]$
T_m	La température de fluide au milieu	$[^\circ C]$
u, v	Composant de vitesse	$[m/s]$
U	Coefficient d'échanger global	$[W/m^2 \cdot ^\circ C]$
ΔTLM	Différence de la température logarithmique moyenne	$[-]$

Symboles grecs

ρ	masse volumique	$[Kg/m^3]$
λ	la conductivité thermique	$[w / (m^2 \cdot ^\circ c)]$
ν	Viscosité cinématique	$[m^2 / s]$
ϕ	Variable dépendante	$[-]$
Φ	le flux de chaleur total	$[J / Kg ^\circ C]$
Γ_ϕ	Coefficient diffusion	$[-]$

S_ϕ Terme source [-]

Indices

a, b Indice d'entrée et de sortie de l'échangeur

e Entée

C Fluide chaud

F Fluide froid

m Moyen

s Sortie

x Axe des abscisses

Introduction
Générale

Les échanges thermiques interviennent dans de nombreux secteurs d'activités humaines. Dans la plupart de ces activités, le transfert de chaleur doit s'effectuer sans altération des milieux intervenant dans le transfert thermique. L'utilisation d'équipements spécifiques d'échange est alors nécessaire. Ces équipements sont connus sous la dénomination d'échangeurs de chaleur. Ce sont des systèmes thermodynamiques présents dans toutes les unités industrielles dans lesquelles interviennent les processus d'extraction de chaleur.

Situation de l'étude :

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échanger la chaleur entre deux fluides sans se mélanger. Dans un échangeur thermique, le fluide chaud et le fluide froid sont séparés par une paroi (plane ou tubulaire). La transmission de la chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid. Les fluides, chauffant et chauffé sont des fluides caloporteurs.

Dans le domaine des échangeurs de chaleur les résistances thermiques par conduction et par rayonnement sont souvent négligées devant la résistance convective globale des deux fluides. La majorité des échangeurs existant fonctionnent à des températures qui peuvent atteindre jusqu'à 600 °C. Étant donné que la majorité des échangeurs de chaleur utilisés sont à surface d'échange c'est-à-dire les deux fluides sont séparés par une paroi, ces deux fluides peuvent être soit deux liquides, soit deux gaz ou vapeurs, soit un liquide et un gaz en outre, les échanges de chaleur dans l'appareil sont effectués soit sans changement d'état (l'appareil est alors un simple échangeur), soit avec changement d'état (l'appareil est alors selon le cas, un condenseur ou un évaporateur ou un cristalliseur) aussi bouilleurs, en absence de la paroi séparatrice. Dans ce cas, il y a mélange direct entre les deux fluides (échangeur mélangeur). Les deux fluides sont de la même nature ou non miscibles. Un échangeur est rarement constitué d'un seul tube, en général, on a une multitude d'éléments (un ensemble de tubes ou de plaques, etc...).

Dans ce travail, nous présentons une étude théorique et expérimentale dans un échangeur de chaleur simple coaxial. Dans ce mémoire, nous avons étudié :

- ✓ Profils de la température
- ✓ Bilans énergétiques
- ✓ Différence de température moyenne logarithmique
- ✓ Coefficients de transfert de chaleur

Le présent mémoire comporte trois chapitres : Après cette brève introduction, nous abordons dans le premier chapitre une généralité sur les échangeurs, est une étude bibliographique. Le deuxième chapitre est une étude théorique et sur le dimensionnement d'un échangeur de chaleur qui représente le bilan énergétique et sur le calcul du coefficient d'échange globale des échangeurs

coaxiaux pour deux fluides. Dans le troisième chapitre, est une étude expérimentale de l'échangeur coaxiaux de forme U, deux configurations ont été utilisées le contre-courant et le co-courant. La variation de température de l'eau et du débit a permis d'étudier les caractéristiques de performance (puissance émise, puissance absorbée, perte de puissance, rendement, différence de température logarithmique et coefficient de transfert de chaleur globale). Ce travail se termine par une conclusion générale.

Chapitre 01 :
Étude Bibliographique

1.1. les échangeurs de chaleur :

Les procédés utilisés dans l'industrie demandent souvent que les fluides traités soient réchauffés ou refroidis avec ou sans changement de phases au cours des diverses opérations auxquelles ils sont soumis. La chaleur mise en œuvre représente une importante dépense d'énergie dont il est nécessaire de récupérer la plus grande quantité possible. De ce fait les échangeurs de chaleur constituent des appareillages importants [1].

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés.

On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), 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 [2,3].

1.1.1.Principe de fonctionnement [4] :

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

On distingue deux types de contact:

Échangeurs à contact direct : Le type le plus simple comprend un récipient (ou canalisation) dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale. Par exemple :

- ✓ Les réchauffeurs d'eau (injection de vapeur d'eau sous pression).
- ✓ Les dés réchauffeurs industriels et les condenseurs à injection (centrale thermique).

Échangeurs à contact indirect : En principe, pour les échangeurs les plus répandus dans l'industrie, les deux fluides, désignés par 1 et 2, s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison, à faible inertie thermique. La chaleur que le fluide 1 cède à la paroi, par convection le long

de la surface de contact, traverse l'épaisseur de la paroi par conduction et est cédé au fluide 2 par convection le long de l'autre face.

1.1.2. Circulation des écoulements [5,6]:

Ce classement est réalisé à partir de la géométrie de l'échangeur et du sens relatif de l'écoulement des deux fluides. Dans ce qui suit, on représente uniquement les circulations des fluides les plus souvent rencontrées.

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

- ✓ les vecteurs vitesses sont de même sens les écoulements sont « co-courants ».
- ✓ les vecteurs vitesses sont de sens contraire, les écoulements sont « à contre-courant ».
- ✓ les vecteurs vitesses sont en moyenne perpendiculaire l'un à l'autre ; il s'agit cette fois de « courant croisés ».

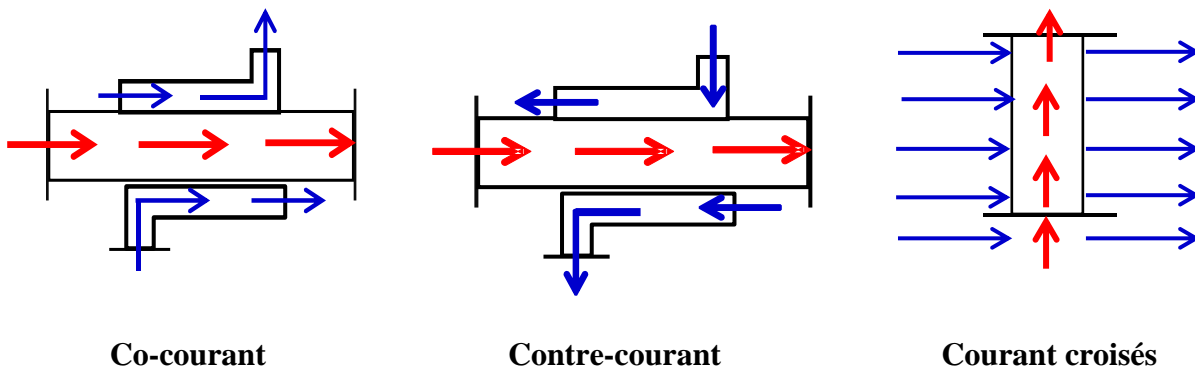


Figure 1.1 : Différent modes de circulation

1.1.3. Distribution des températures [7] :

Les températures des fluides pendant leurs traversées longitudinales de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase, en aucun cas sa température reste constante. La figure 1.2 donne l'allure de quelques distributions de températures des échangeurs très simple. Les températures sont repérées à l'aide d'indices « e » signifiant entrée et « s » sortie, « C » désignent le fluide chaud et « F » le fluide froid.).

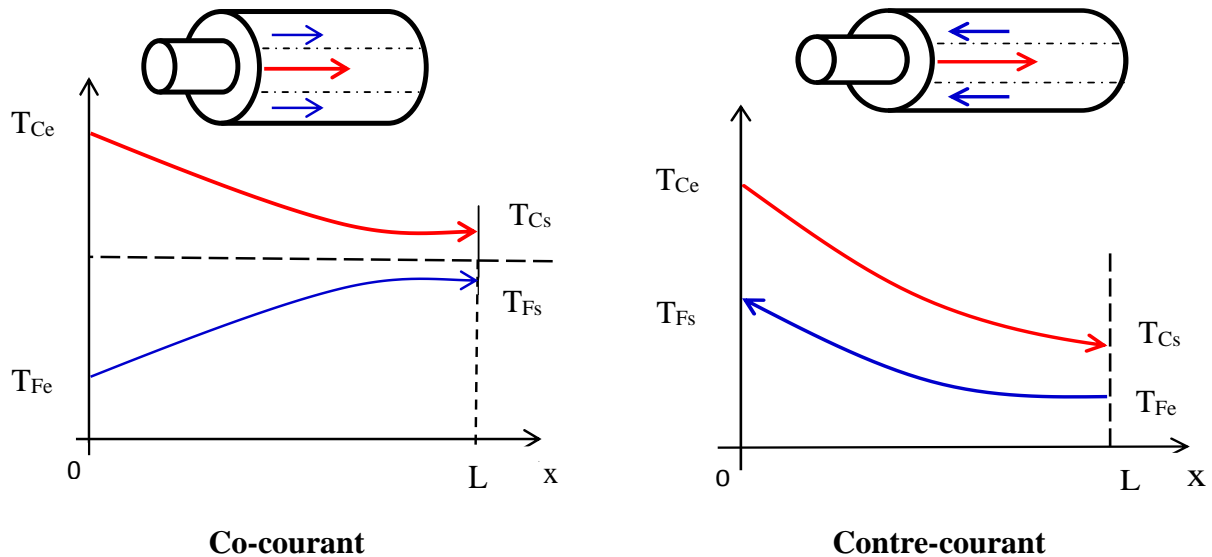


Figure 1.2: Distribution des températures dans des échangeurs tubulaire coaxiaux.

1.2. Différents types d'échange:

Les échangeurs de chaleur sont **diphasiques** ou **monophasique**.

1.2.1. Échange sans changement de phase :

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur. Parmi ces échangeurs on cite les échangeurs : (liquide -liquide, gaz -liquide et gaz-gaz...)

1.2.2. Échange avec changement de phase :

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

- ✓ l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise. Ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques installées en cascade. Ces sont **les évaporateurs - condenseurs**.
- ✓ le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés **évaporateurs**.
- ✓ le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état .A titre d'exemple ; ce cas est rencontré dans **les condenseurs** des machines frigorifiques. [4].

1.3. Différents types d'échangeurs de chaleur:

Il est possible de caractériser un échangeur de chaleur par [8] :

- ✓ La nature des matériaux qui le constituent (métallique, verre, plastique, graphite).
- ✓ La nature des fluides de transfert (liquide, gaz, mélange de plusieurs phases, solide pulvérisant).
- ✓ La conception de l'échangeur.

De ces caractéristiques on peut distinguer deux grandes catégories :

- ✓ Échangeurs tubulaires.
- ✓ Échangeurs à plaques.

1.3.1. Échangeurs tubulaires

Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, une maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à des pressions élevées et de grandes températures. Leur robustesse et leur fiabilité contrebalancent leur encombrement.

On distingue le plus souvent les catégories suivantes :

- Les échangeurs monotube dans lesquels le tube est placé dans un réservoir ;

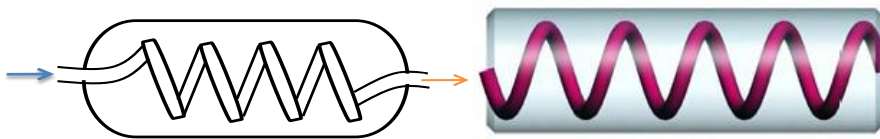


Figure 1.3 : Échangeur monotube en serpentins

- Les échangeurs coaxiaux pour lesquels les tubes sont le plus souvent cintrés ;

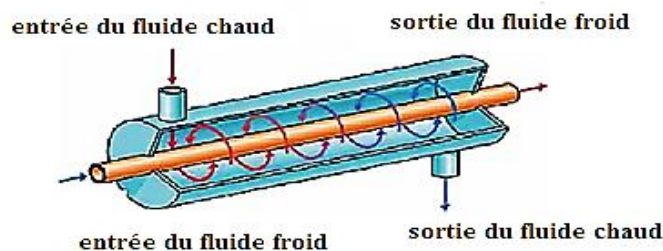


Figure 1.4 : Échangeur coaxial.

- Les échangeurs à tubes séparés : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant sont placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.

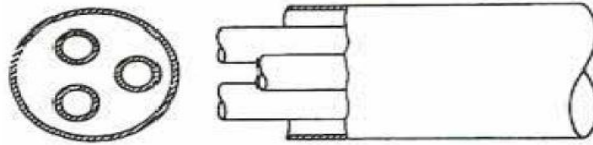


Figure 1.5: Échangeur à tubes séparés

- Les échangeurs à tubes rapprochés : les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire de rubans enroulés en spirale autour de certains d'entre.

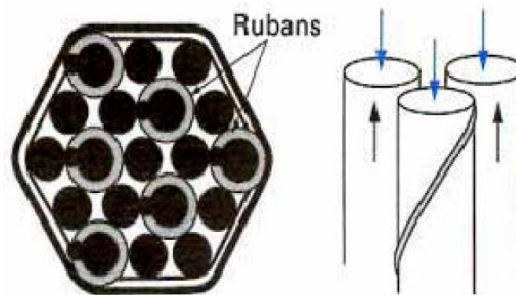


Figure 1.6: Échangeur à tubes rapprochés

- Les échangeurs à tubes ailettes qui permettent d'améliorer le coefficient d'échange : lorsque l'un des fluides transitant dans l'échangeur s'avère moins bon caloporteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes autour des tubes ou dans les tubes s'impose pour que la résistance thermique globale ne soit pas entièrement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique.

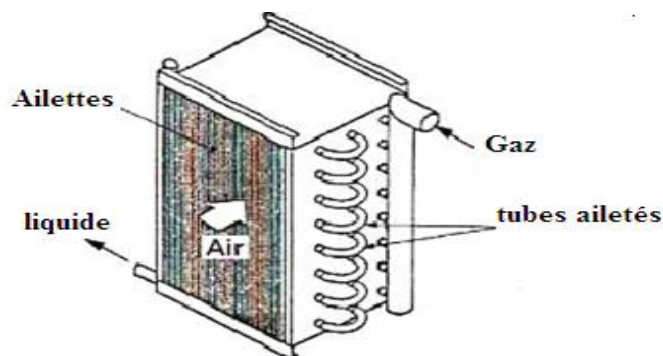


Figure 1.7: Échangeur à tube ailette.

- Les échangeurs à tube et à calandre ou la calandre est une enveloppe métallique cylindrique entourant un faisceau de tubes : ils possèdent une boîte de distribution c'est-à-dire un dispositif qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes.

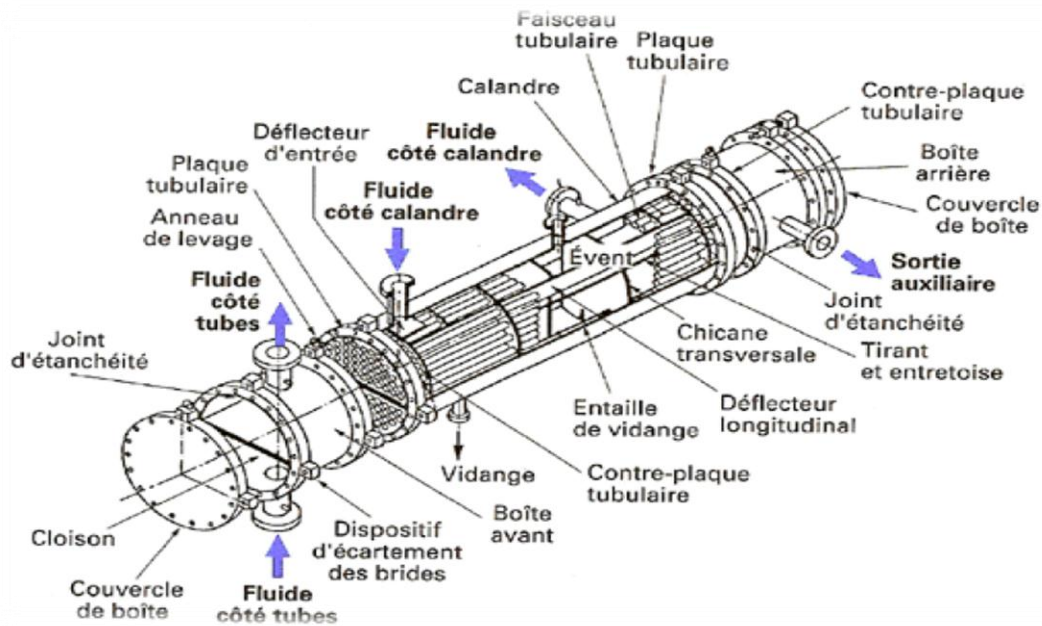


Figure 1.8: Divers constituants d'un échangeur à faisceau et calandre.

1.3.2. Échangeurs à plaques :

Les échangeurs à plaques ont subi depuis leurs créations, il ya environ 60 ans des améliorations substantielles. Ils sont formés par l'emplacement d'un ensemble de plaques métalliques embouties, au travers desquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. S'ils ne peuvent pas toujours être utilisés pour les températures élevées et les hautes pressions, les échangeurs à plaques bénéficient d'avantages tenant notamment à leur meilleur rendement et leur compacité. Plusieurs technologies sont en concurrence. La principale, et la plus ancienne, est celle des échangeurs à plaques avec joints. Un joint par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques. Ces échangeurs ne peuvent être utilisés que pour les pressions maximales de 30 bars et des températures maximales de 200 degrés Celsius.

D'autres technologies plus récentes permettent de remédier aux inconvénients de l'existence de joints, comme les échangeurs à plaques soudées, ces derniers sont adaptés à l'utilisation de fluides encrassant corrosifs, chauds, sous pression, présentent des débits très différents de part et d'autre de la surface d'échange.

Il existe d'autres échangeurs à plaques dont la diffusion est moins importante tels que les échangeurs à plaques dont la diffusion est moins importante tels que les échangeurs de chaleur spirales et les échangeurs à plaques brasées.

Les échangeurs à plaques brasées sont formés de plaques embouties, mais sans joints, qui forment ainsi un appareil compact et résistant à hautes pression.

Les échangeurs à spirales sont constitués de deux rubans de tôles gaufrées, enroulés et maintenus parallèles et où la circulation du fluide, est de type monocanal à courants parallèles ou croisés. Il y a encore les échangeurs à plaque serties qui sont constitués d'un assemblage de tôles planes parallèles entre lesquelles sont disposées des ailettes.

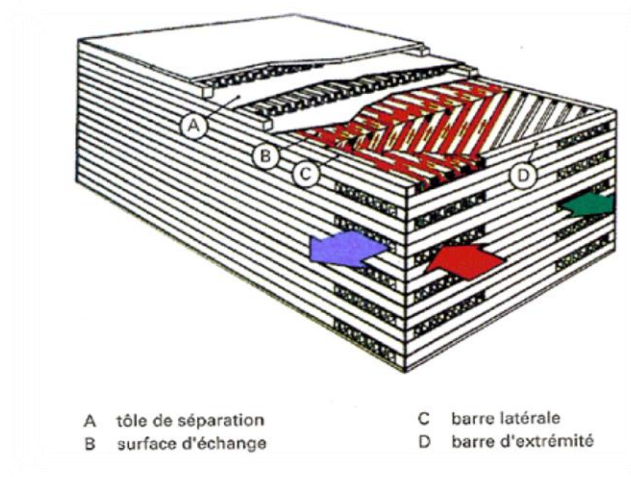


Figure 1.9: Échangeur à plaques brasées: assemblage des plaques.

1.4. Etude bibliographique :

Pour cette partie bibliographique, nous avons vu utile de citer uniquement les travaux récents sur les échangeurs de chaleur à tubes coaxiaux :

Chun et al [9] ont étudié expérimentalement l'effet des nanoparticules Al_2O_3 sur le transfert de chaleur dans un système d'échange de chaleur à double tubes (Figure 1.10). Les données expérimentales montrent que l'augmentation de nanoparticules dans le liquide augmente le transfert de la chaleur. La forme et le diamètre des particules sont essentiels pour l'amélioration du transfert de chaleur. L'augmentation des coefficients de transfert de chaleur peut être due à l'amélioration de la concentration des nanoparticules.

Zhang et al [10], dans leur étude expérimentale sur l'amélioration du transfert de chaleur, ont utilisé un échangeur de chaleur coaxial combiné avec des ailettes hélicoïdale et des obstacles pour la génération des tourbillons (Figure 1.11). Les résultats expérimentaux montrent que les ailettes hélicoïdales et les obstacles jouent un rôle très important pour l'amélioration de transfert de chaleur. D'autre part, le transfert de chaleur augmente pour les obstacles triangulaires et rectangulaires par rapport au cas sans obstacles.

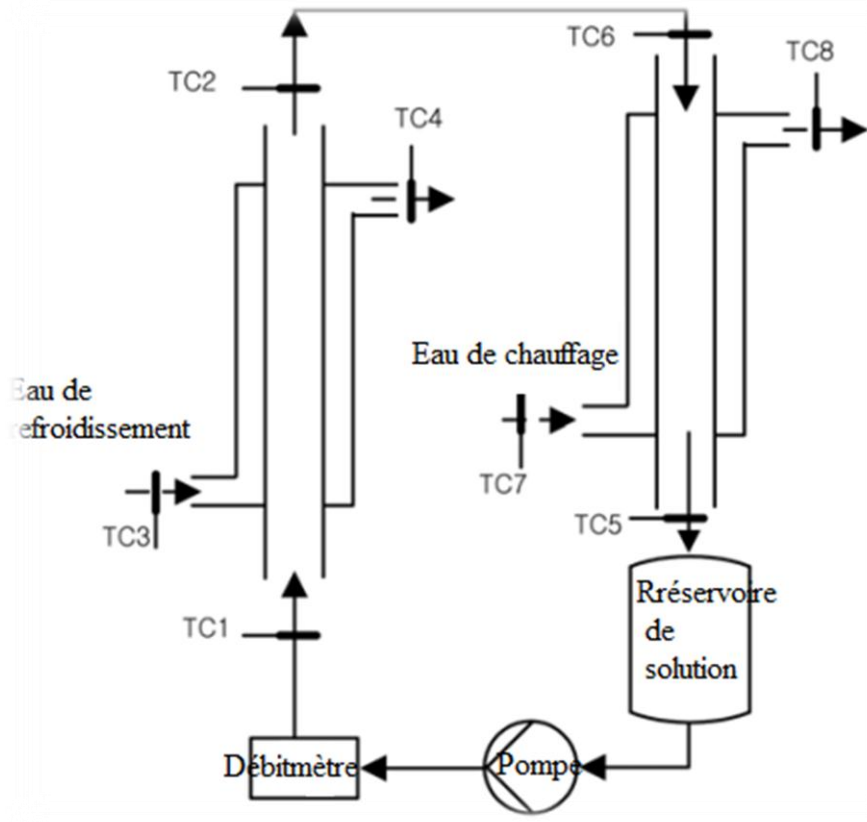


Figure 1.10 : problème considéré par [9].

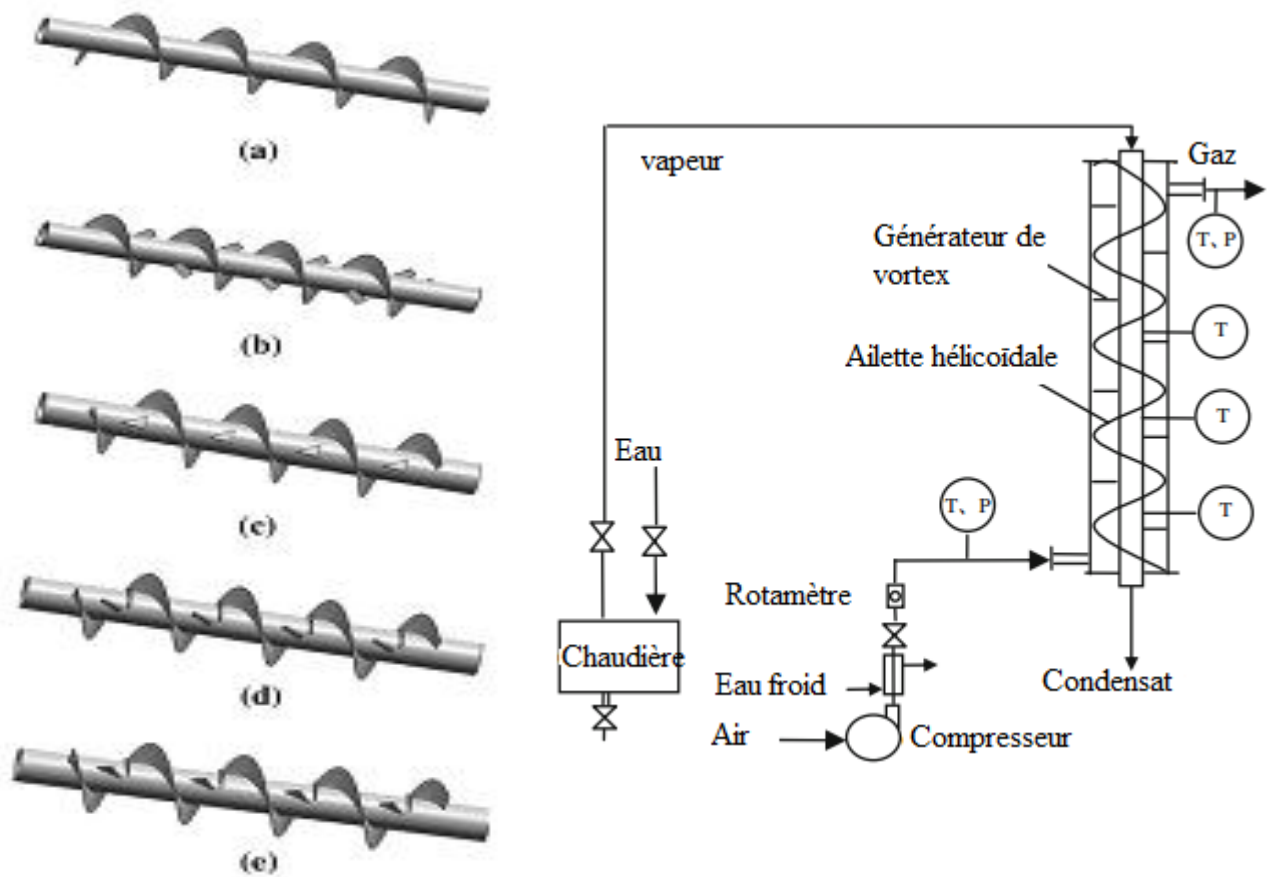


Figure 1.11 : problème considéré par [10].

Sheikholeslami et al [11] ont étudié expérimentalement et numériquement l'écoulement des fluides avec transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à double tube (Figure 1.12). Dans cette étude, l'écoulement est turbulent et les fluides utilisés sont l'air et l'eau. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt et l'échange thermique de la paroi augmentés avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

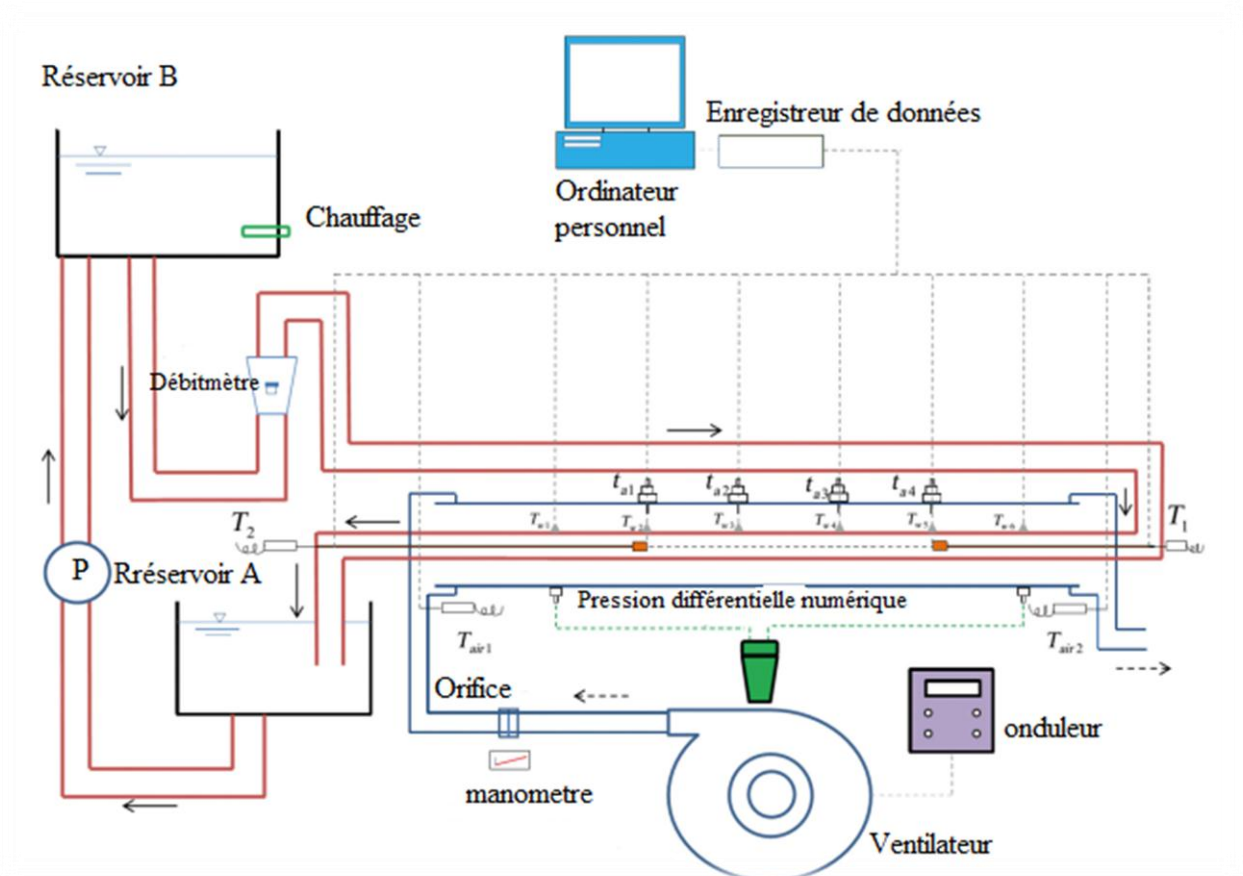


Figure 1.12 : problème considéré par [11].

L'effet des nanoparticules sur le transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur coaxial (Figure 1.13), ont été étudié expérimentalement par Aghayari et al [12]. Les expériences ont été effectuées sous conditions d'un écoulement turbulent. Les résultats montrent que l'utilisation de Nanofluid Al_2O_3 -eau donne des coefficients de transfert de chaleur plus élevés que ceux du fluide de base. Généralement, l'amélioration du transfert de chaleur par convection dépend de l'augmentation de la conductivité thermique du fluide. La conductivité thermique des nano fluides augmente avec l'augmentation des concentrations volumiques de nanoparticules.

Hazbehian et al [13] ont étudié expérimentalement l'amélioration de la performance thermique dans un échangeur de chaleur coaxial (Figure 1.14). L'objectif de cette étude est l'estimation du transfert de chaleur et du facteur de frottement de nanofluide TiO_2 / PVA . La performance

thermique du transfert de chaleur est plus élevée lorsque la largeur de la torsion la lame est plus accentuée. Cependant, l'augmentation de la largeur de torsion augmente le facteur de frottement.

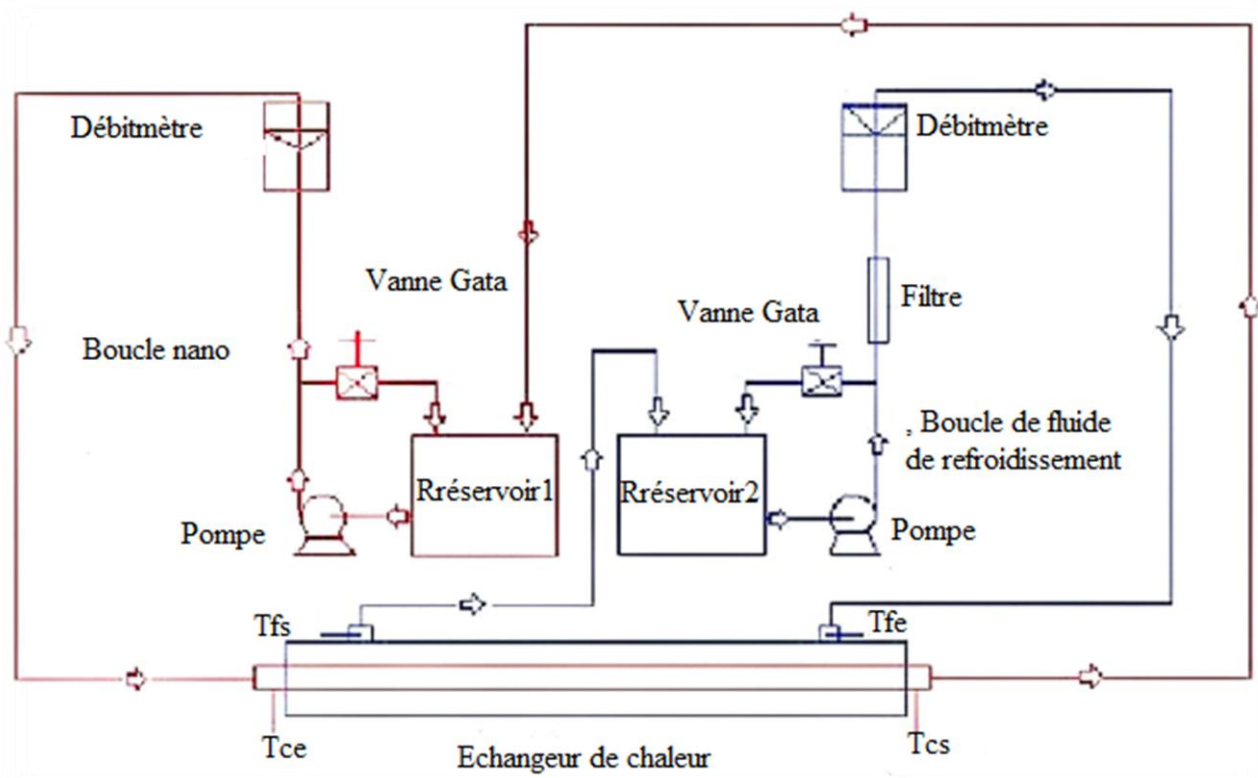


Figure 1.13 : problème considéré par [12].

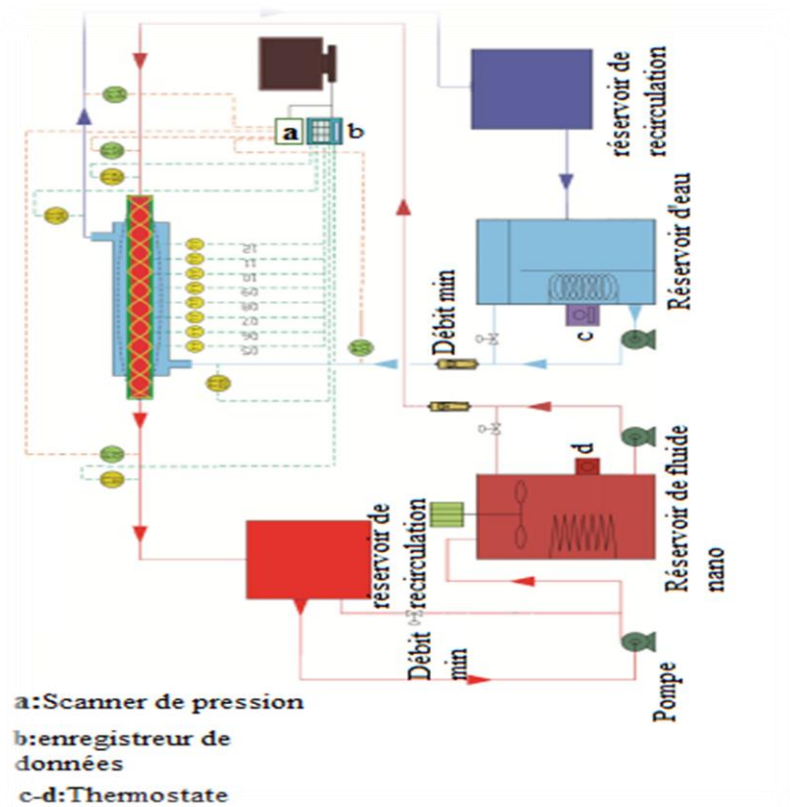


Figure 1.14 : problème considéré par [13].

L'optimisation d'un échangeur de chaleur tubulaire à double tubes (Figure 1.15) a été étudiée numériquement par Kareem [14]. Les simulations numériques sont effectuées pour trouver quelle la forme de la section transversale et de la tuyauterie (bobine hélicoïdale ou tube droit) permettant d'obtenir une bonne performance thermique. Les résultats montrent que le transfert de chaleur est plus élevé dans le cas de la section transversale rectangulaire. D'autre part, le transfert de chaleur dans la bobine hélicoïdale est deux fois supérieur à celle de tube droit. Le facteur de frottement était plus élevé dans la bobine hélicoïdale que le tube droit.

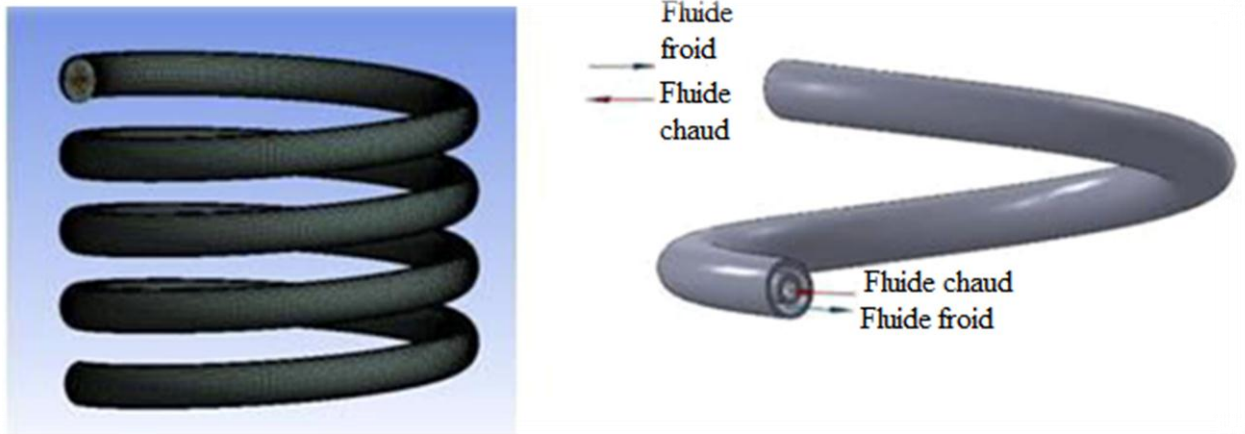


Figure 1.15 : problème considéré par [14].

Chapitre 02 :
Bilan énergétique

2.1. Description d'un échangeur coaxial [15]

Un échangeur de chaleur est un système qui permet de transférer un flux de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contact direct entre les deux fluides (par exemple radiateur d'automobile, évaporateur de climatiseur, ...etc.).

Pour cette étude thermique, il est nécessaire de faire appel aux équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ces équations sont données dans l'annexe (A.1)

Un échangeur tubulaire simple est constitué de deux tubes cylindriques coaxiaux. Un fluide (généralement le chaud) circule dans le tube intérieur, l'autre dans l'espace compris entre les deux tubes. Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid s'effectue à travers la paroi que constitue le tube intérieur :

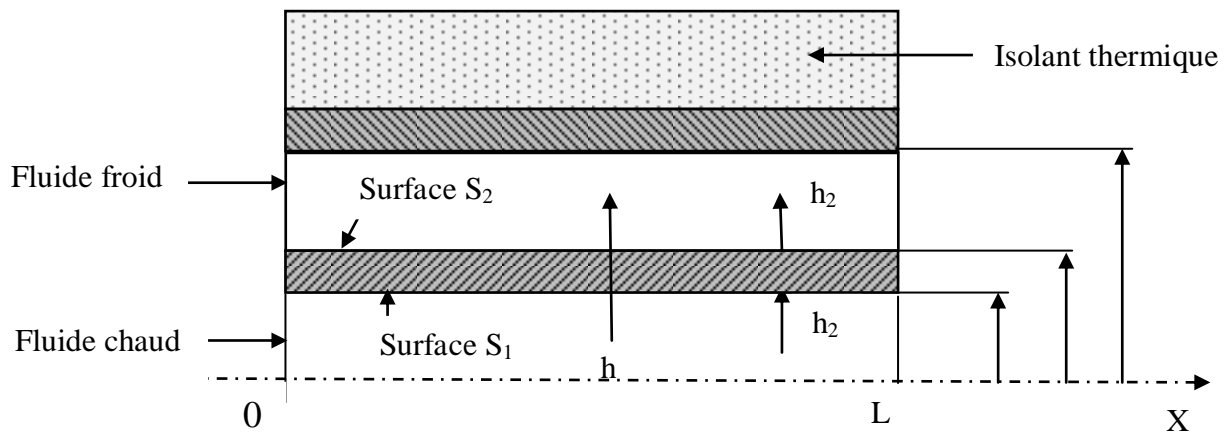


Figure 2.1 : Schéma d'un échangeur tubulaire simple

2.1.1. Principe de fonctionnement

Le fluide froid entre dans l'échangeur à la température T_{Fe} et en sort à T_{Fs} , le fluide chaud entre à T_{Ce} et sort à T_{Cs} . Deux modes de fonctionnement sont réalisables :

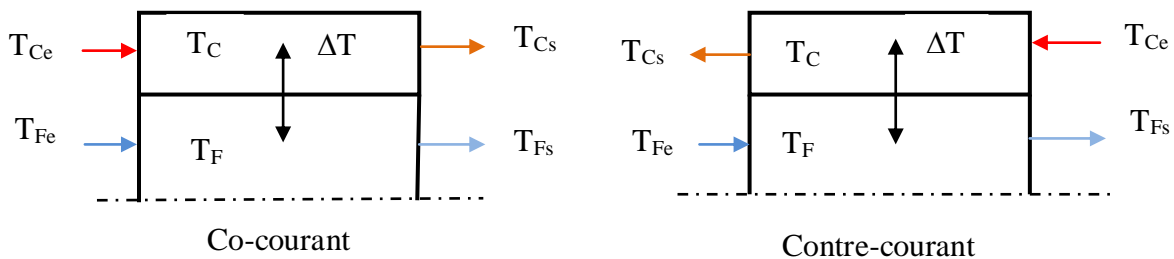


Figure 2.2 : Schématisation des fonctionnements à co-courant et à contre-courant

2.1.2. Hypothèses d'étude

Dans les calculs qui suivent, nous avons retenu les hypothèses suivantes :

- ✓ Pas de pertes thermiques : la surface de séparation est la seule surface d'échange.

✓ Pas de changement de phase au cours du transfert.

2.2. Bilan énergétique [15] :

Compte tenu des hypothèses plus haut, l'application du premier principe de la thermodynamique à la tranche de fluide chaud d'épaisseur dx échangeant la quantité de chaleur élémentaire $d\Phi_c$ conduit à :

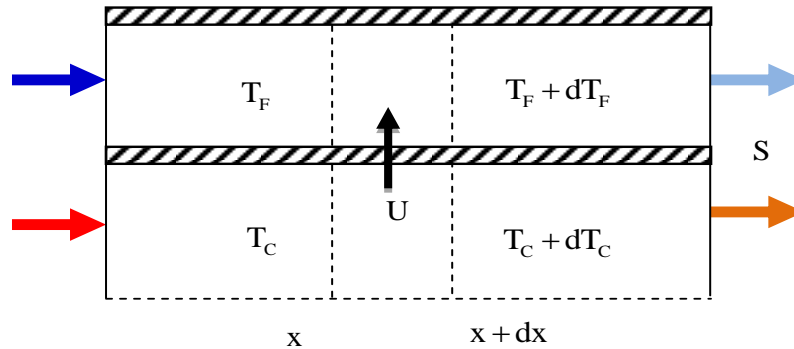


Figure 2.3 :représentation des surfaces d'échanges.

$$\frac{du_c}{dt} = 0 = d\Phi_c + m_c \left[\bar{h}_c - (\bar{h}_c + d\bar{h}_c) \right] \quad (2.1)$$

Où \bar{h}_c représente l'enthalpie spécifique (massique) du fluide chaud et $\frac{du_c}{dt}$ la variation de son énergie interne au cours du temps. Si l'enthalpie varie avec la température selon $d\bar{h}_c = Cp_c \cdot dT_c$, ou Cp_c représente la capacité calorifique à pression constante du fluide chaud et si on considère que le régime est établi, alors l'expression du premier principe devient :

$$0 = d\Phi_c + \rho_c Q_c \cdot Cp_c \left[T_c - (T_c + dT_c) \right] \quad (2.2)$$

$$d\Phi_c = \rho_c Q_c \cdot Cp_c \cdot dT_c \quad (2.3)$$

Le même raisonnement, assorti des mêmes hypothèses concernant le fluide froid, conduit alors à :

$$d\Phi_f = \rho_f Q_f \cdot Cp_f \cdot dT_f \quad (2.4)$$

Or, les deux quantités $d\Phi_c$ et $d\Phi_f$ sont égales et de signes opposés, si bien que l'on peut convenir de la définition de $d\Phi = d\Phi_c = -d\Phi_f > 0$.

L'expression du flux élémentaire que l'on dérive de l'équation :

$$\Phi = U \cdot S \cdot (T_c - T_f) \quad (2.5)$$

Le système d'équations à résoudre devient :

$$d\Phi_C = -\dot{m}_C \cdot Cp_C \cdot dT_C \quad (2.6.a)$$

$$d\Phi_F = \dot{m}_F \cdot Cp_F \cdot dT_F \quad (2.6.b)$$

$$d\Phi = U \cdot dS \cdot (T_C - T_F) \quad (2.6.c)$$

On tire tout d'abord, des équations (2.6.a) et (2.6.b)

$$dT_C = -\frac{d\Phi_C}{\dot{m}_C \cdot Cp_C} \quad \text{Et} \quad dT_F = \frac{d\Phi_F}{\dot{m}_F \cdot Cp_F} \quad (2.7)$$

$$dT_C - dT_F = d(T_C - T_F) = -d\Phi_C \left(\frac{1}{\dot{m}_C \cdot Cp_C} + \frac{1}{\dot{m}_F \cdot Cp_F} \right) \quad (2.8)$$

On remplace cette équation dans (2.6.c) on obtient une équation différentielle décrivant le comportement de l'écart de température $T_C - T_F$ avec la surface S :

$$d(T_C - T_F) = -U \cdot dS \cdot (T_C - T_F) \left(\frac{1}{\dot{m}_C \cdot Cp_C} + \frac{1}{\dot{m}_F \cdot Cp_F} \right) \quad (2.9)$$

2.2.1. Coefficient global de transfert [16]

Une première expression du flux de chaleur transféré dans un échangeur peut être déterminée en écrivant qu'il est égal au flux de chaleur perdu par le fluide chaud et au flux de chaleur gagné par le fluide froid pendant leur traversée de l'échangeur :

$$\Phi = \dot{m}_F Cp_F (T_{Fs} - T_{Fe}) = \dot{m}_C Cp_C (T_{Ce} - T_{Cs}) \quad (2.10)$$

Les produits : $C_F = \dot{m}_F Cp_F$ et $C_C = \dot{m}_C Cp_C$ sont appelés les débits calorifiques des deux fluides.

Le flux de chaleur peut donc finalement s'écrire :

$$\Phi = C_F (T_{Fs} - T_{Fe}) = C_C (T_{Ce} - T_{Cs}) \quad (2.11)$$

Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid est la résultante de trois phénomènes successifs:

- ✓ Convection entre le fluide chaud et la face externe de la paroi solide.
- ✓ Conduction à travers cette paroi solide.
- ✓ Convection entre la face interne de la paroi solide et le fluide froid.

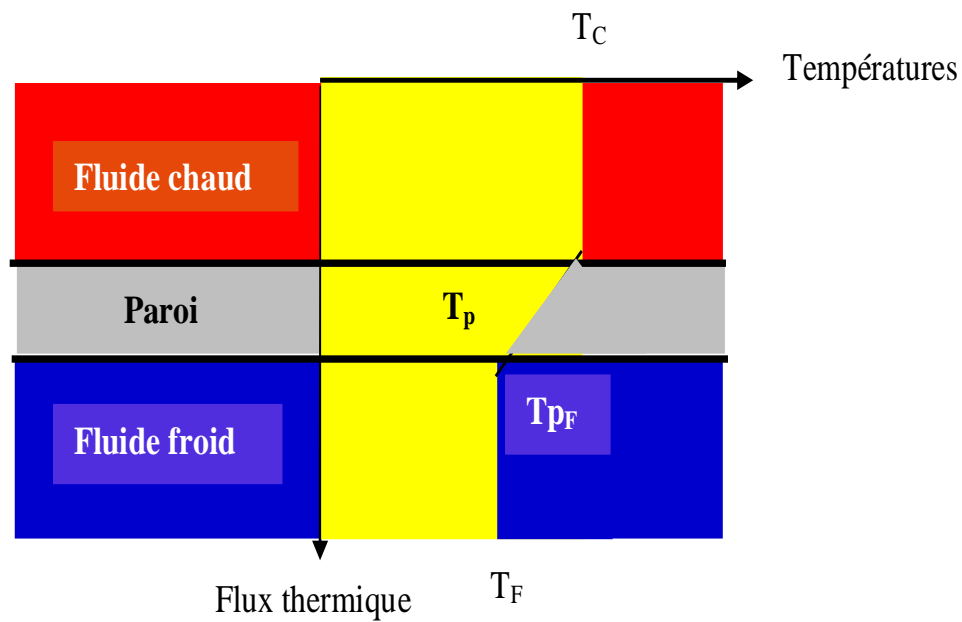


Figure 2.4 : Profil de température lors de l'échange à travers un élément de surface dS

- La convection dans le fluide chaud est régie par un coefficient de convection h_C permettant de définir une résistance thermique convective $\frac{1}{h_C S}$.
- La convection dans le fluide froid est régie par un coefficient de convection h_F permettant de définir une résistance thermique convective $\frac{1}{h_F S}$.
- La conduction à travers la paroi solide d'épaisseur e et de conductivité thermique λ , il en est rendu compte par une résistance thermique de conduction $\frac{e}{\lambda S}$.

De sorte que le flux thermique transféré du fluide chaud au fluide froid est donné par l'expression:

$$\Phi = \frac{T_C - T_F}{\frac{1}{h_C S} + \frac{e}{\lambda S} + \frac{1}{h_F S}} \quad (2.12)$$

Où $\Phi = US(T_C - T_F)$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_C S} + \frac{e}{\lambda S} + \frac{1}{h_F S}} \quad (2.13)$$

On distingue deux conditions pour calculer le coefficient d'échange global

- 1- La relation (2.13), nous avons supposé la même surface d'échange S côté chaud et côté froid. Mais dans la pratique, la surface d'échange n'a pas toujours la même étendue au contact des deux fluides. Il faut donc introduire des surfaces d'échange S_C et S_F . Le coefficient d'échange global, soit à l'unité de surface d'échange côté chaud U_C et soit à l'unité de surface d'échange côté froid U_F .
- 2- De plus, au bout d'un certain temps de fonctionnement, les parois d'échange se recouvrent d'un film d'encrassement. Ces dépôts de tartre et de salissures ont une conductivité thermique faible par rapport à celle du métal, et constituent donc des résistances thermiques supplémentaires R_{ec} et R_{ef} s'opposant à l'échange.

En définitive, la performance réelle de l'échangeur sera déduite du calcul de l'un ou de l'autre des deux coefficients d'échange global suivants:

$$U_F = \frac{1}{\frac{1}{h_C} + R_{ec} + \frac{e}{\lambda} \frac{S_C}{S_m} + \left(R_{ef} + \frac{1}{h_F} \right) \frac{S_C}{S_F}} \quad (2.14)$$

$$U_C = \frac{1}{\frac{1}{h_F} + R_{ef} + \frac{e}{\lambda} \frac{S_F}{S_m} + \left(R_{ec} + \frac{1}{h_C} \right) \frac{S_F}{S_C}} \quad (2.15)$$

le tableau 2.1 présente les ordres de grandeur du coefficient global de transfert U de divers types d'échangeurs :

Coefficient d'échange global U	
Liquide-liquide	100-2000
Liquide-gaz	30-300
Condenseur	500-5000

Tableau 2.1 : variation du coefficient d'échange global pour les différents types d'échangeurs

2.2.2. Méthode de ΔTLM dans le Cas U est constant

2.2.2.1. Échangeur à Co- courant :

Dans ce type d'échangeur, que l'on dénomme aussi à courant parallèles, les deux fluides circulent dans le même sens [16].

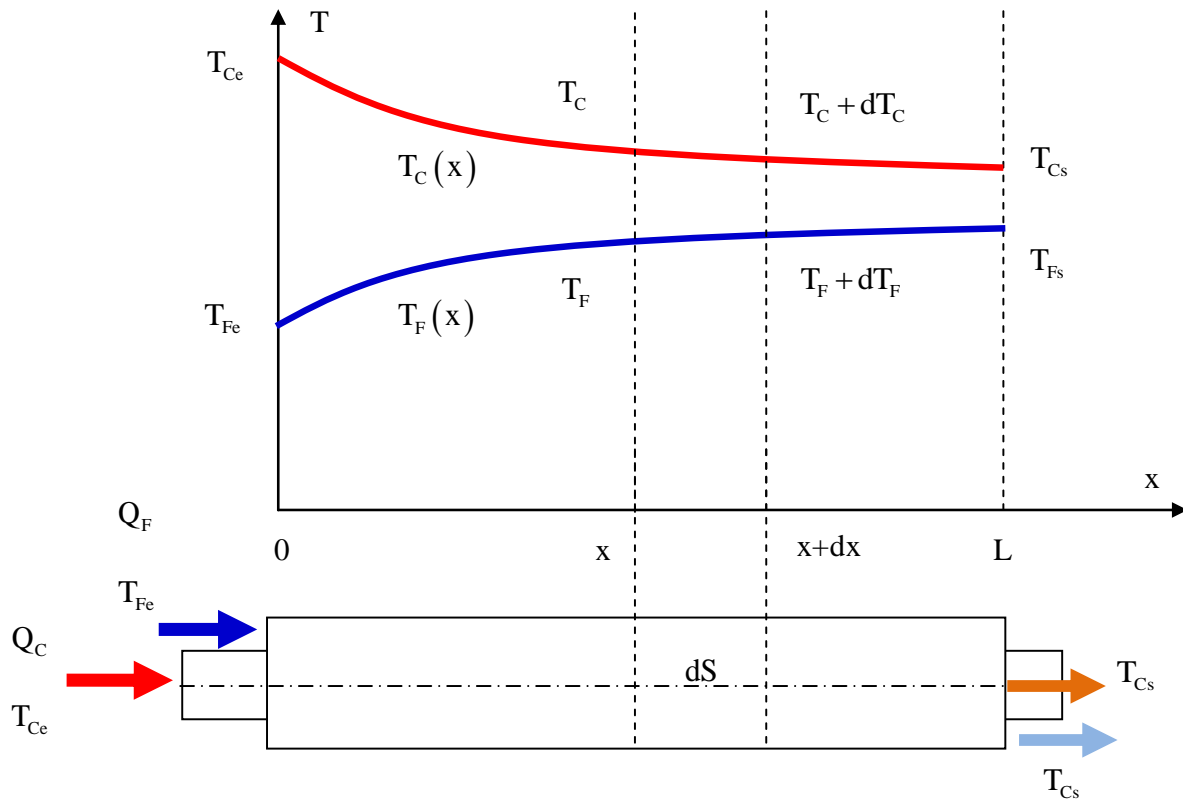


Figure 2.5: Evolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur Co-courant.

Sont supposé connus:

- Les débits des fluides chaud et froid Q_C et Q_F .
- Les températures d'entrée des fluides chaud et froid T_{Ce} et T_{Fe} .
- Les températures de sortie des fluides chaud et froid T_{Cs} et T_{Fs} .

L'éventuelle répartition spatiale des températures de fluide chaud $T_C(x)$, et froid $T_F(x)$ le long de l'échangeur [16].

Nous allons établir la relation liant le flux de chaleur transmis dans l'échangeur au Coefficient d'échange global U et à la surface d'échange S . cette relation est fondamentale car elle permet de dimensionner un échangeur, c'est-à-dire de calculer la surface d'échange nécessaire pour transférer un flux imposé. Pour cela, effectuons un bilan thermique de la partie d'échangeur comprise entre les distances x et $x + dx$ de l'entrée de l'échangeur [15]

D'après l'équation (2.9)

$$d(T_C - T_F) = -U \cdot dS \cdot (T_C - T_F) \left(\frac{1}{\dot{m}_C \cdot Cp_C} + \frac{1}{\dot{m}_F \cdot Cp_F} \right) \quad (2.9)$$

Si on suppose que le coefficient d'échange global U et les deux capacités calorifiques C_{p_C} et C_{p_F} demeurent constantes le long de l'échangeur, on peut intégrer l'équation suivante de 0 à x pour obtenir :

$$\int_0^x \frac{d(T_C - T_F)}{(T_C - T_F)} = -U \left(\frac{1}{\dot{m}_C \cdot C_{p_C}} + \frac{1}{\dot{m}_F \cdot C_{p_F}} \right) \int_0^x dS \quad (2.16)$$

$$\ln \frac{T_C(x) - T_F(x)}{T_{Ce} - T_{Fe}} = -U \left(\frac{1}{\dot{m}_C \cdot C_{p_C}} + \frac{1}{\dot{m}_F \cdot C_{p_F}} \right) S(x) \quad (2.17)$$

$$\frac{T_C(x) - T_F(x)}{T_{Fe} - T_{Ce}} = \exp \left[-U \left(\frac{1}{C_C} + \frac{1}{C_F} \right) S \right] \quad (2.18)$$

Les conditions aux limites

$$\begin{cases} T_C(0) = T_{Ce} & \text{et} & T_F(0) = T_{Fe} \\ T_C(L) = T_{Cs} & \text{et} & T_F(L) = T_{Fs} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\Phi = -C_C \cdot (T_{Cs} - T_{Ce}) \quad (2.20.a)$$

$$\Phi = C_F \cdot (T_{Fs} - T_{Fe}) \quad (2.20.b)$$

Applique (2.20.a) et (2.20.b) sur l'équation (2.18) :

$$\frac{T_{Cs} - T_{Fs}}{T_{Ce} - T_{Fe}} = \exp \left[-U \left(\frac{1}{C_C} + \frac{1}{C_F} \right) S \right] = \frac{-U \cdot S}{\Phi} [(T_{Cs} - T_{Ce}) - (T_{Fs} - T_{Fe})] \quad (2.21)$$

$$\ln \left(\frac{T_{Cs} - T_{Fs}}{T_{Ce} - T_{Fe}} \right) = \frac{U \cdot S}{\Phi} [(T_{Cs} - T_{Fs}) - (T_{Ce} - T_{Fe})] \quad (2.22)$$

$$\text{Avec} \begin{cases} \Delta T_a = T_{Ce} - T_{Fe} \\ \Delta T_b = T_{Cs} - T_{Fs} \end{cases}$$

Que l'on écrit plus commodément :

$$\Phi = \frac{\Delta T_b - \Delta T_a}{\ln \left(\frac{\Delta T_b}{\Delta T_a} \right)} U S \quad (2.23)$$

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_b - \Delta T_a}{\ln \left(\frac{\Delta T_b}{\Delta T_a} \right)} \quad (2.24)$$

2.2.2.2 Échangeur à contre-courant :

Dans ce type d'échangeur, les deux fluides circulent dans le sens contraire, l'entrée de l'un des fluides étant à l'opposé de l'autre[16].

On attribue par exemple l'abscisse $x = 0$ l'entrée du fluide chaud et $x = L$ à celle du fluide froid.

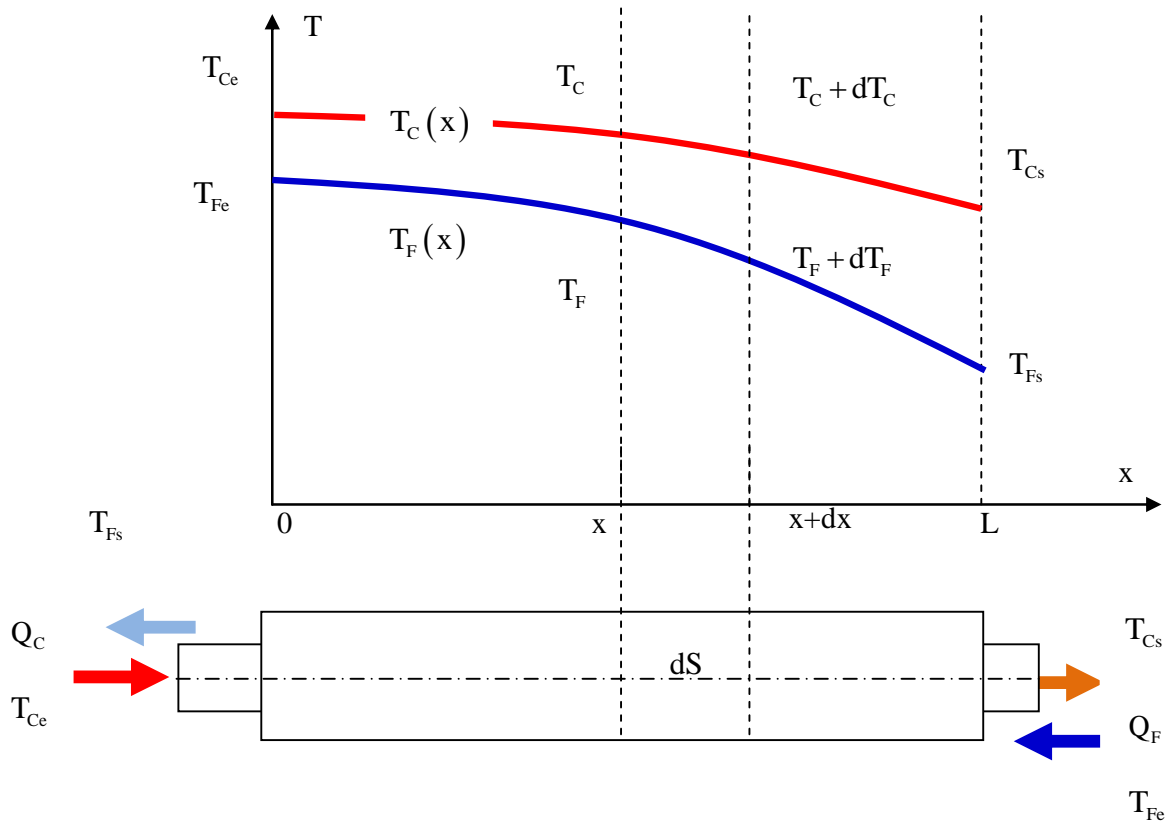


Figure 2.6 : Evolution des températures du fluide chaud et du fluide froid d'un échangeur contre-courant.

D'après l'équation (2.9)

$$d(T_C - T_F) = -U \cdot dS \cdot (T_C - T_F) \left(\frac{1}{\dot{m}_C \cdot Cp_C} + \frac{1}{\dot{m}_F \cdot Cp_F} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{d(T_C - T_F)}{(T_C - T_F)} = -U \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_C \cdot Cp_C} + \frac{1}{\dot{m}_F \cdot Cp_F} \right) \cdot dS \quad (2.25)$$

Après intégration entre les bornes $x = 0$ et $x = L$ on aura :

$$\frac{T_C(x) - T_F(x)}{T_{Ce} - T_{Fs}} = \exp \left[-U \left(\frac{1}{C_C} - \frac{1}{C_F} \right) S \right] \quad (2.26)$$

Les conditions aux limites

$$\begin{cases} T_C(0) = T_{Ce} & \text{et} & T_F(0) = T_{Fs} \\ T_C(L) = T_{Cs} & \text{et} & T_F(L) = T_{Fe} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\Phi = -C_C \cdot (T_{Cs} - T_{Ce}) \quad (2.28.a)$$

$$\Phi = C_F \cdot (T_{Fs} - T_{Fe}) \quad (2.28.b)$$

$$\frac{T_{Cs} - T_{Fe}}{T_{Ce} - T_{Fs}} = \exp \left[-U \left(\frac{1}{C_C} - \frac{1}{C_F} \right) S \right] = \frac{-U.S}{\Phi} [(T_{Cs} - T_{Fe}) - (T_{Ce} - T_{Fs})] \quad (2.29)$$

$$\ln \left(\frac{T_{Cs} - T_{Fe}}{T_{Ce} - T_{Fs}} \right) = \frac{U.S}{\Phi} [(T_{Cs} - T_{Fe}) - (T_{Ce} - T_{Fs})] \quad (2.30)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \Delta T_a = T_{Ce} - T_{Fs} \\ \Delta T_b = T_{Cs} - T_{Fe} \end{cases}$$

Que l'on écrit plus commodément :

$$\Phi = \frac{\Delta T_b - \Delta T_a}{\ln \left(\frac{\Delta T_b}{\Delta T_a} \right)} U.S \quad (2.31)$$

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_b - \Delta T_a}{\ln \left(\frac{\Delta T_b}{\Delta T_a} \right)} \quad (2.32)$$

2.2.3. Méthode de ΔTLM dans le cas U n'est pas constant [15] :

On utilise dans ce cas la méthode de Colburn qui fait l'hypothèse que le coefficient global de transfert U varie linéairement en fonction de ΔT : $U = a + b\Delta T$

Nous pouvons écrire :

- A l'entrée de l'échangeur : $U_e = a + b\Delta T_e$
- A la sortie de l'échangeur : $U_s = a + b\Delta T_s$

$$\text{Les coefficients } a \text{ et } b \text{ s'expriment par : } b = \frac{U_e - U_s}{\Delta T_e - \Delta T_s} \text{ et } a = U_e - \frac{U_e - U_s}{\Delta T_e - \Delta T_s} \Delta T_e$$

Le bilan thermique de l'échangeur entre les abscisses X et $x + dx$ s'écrit toujours :

$$-Q_f dT_e = U dS_2 (T_e - T_s) \text{ soit } \frac{dT_e}{T_e - T_s} = -\frac{U dS_2}{Q_F}$$

Le calcul de $\int_{T_{Fe}}^{T_{Fs}} \frac{dT_F}{U(T_F - T_C)}$ après avoir exprimé U et T_F en fonction de T_C conduit au résultat

final suivant :

$$\Phi = \frac{U_e \Delta T_b - U_s \Delta T_a}{\ln\left(\frac{U_e \Delta T_b}{U_s \Delta T_a}\right)} \quad (2.33)$$

Dans le cas où U ne varie pas linéairement sur tout l'échangeur, on découpera celui-ci en autant demorceaux sur lesquels on pourra faire l'hypothèse d'une variation linéaire de U (voir Annexe A.2)

Chapitre 03 :
Résultats et Discussions

3.1. Introduction:

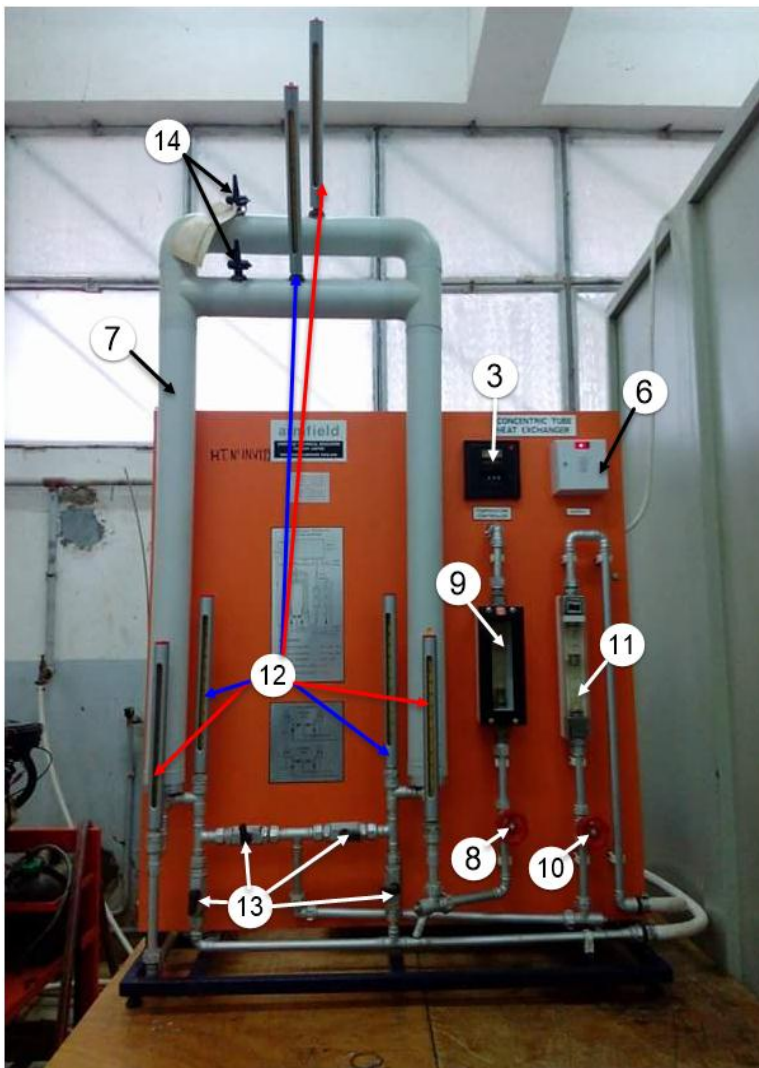
L'échangeur de chaleur à tubes coaxiaux « Armfield » a été spécialement conçu pour démontrer les principes de fonctionnement d'un échangeur de chaleur industriel de la manière la plus pratique dans le laboratoire.

Le banc d'essai permet de réaliser une série de mesures simples. Les expériences peuvent être facilement conduites dans un court du temps, et pour montrer l'importance pratique de ce qui suit :

- ✓ Profils de la température
- ✓ Bilans énergétiques
- ✓ Différence de température moyenne logarithmique (ΔTLM)
- ✓ Coefficients de transfert de chaleur

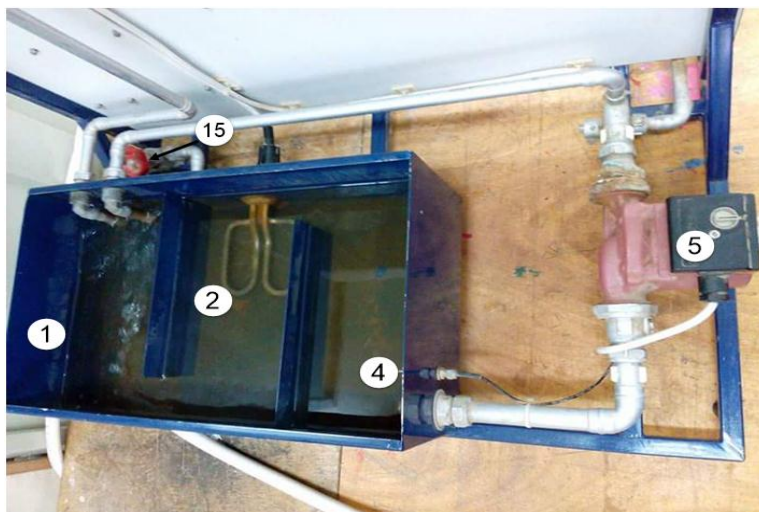
3.2. Description de banc d'essai :

Le banc d'essai est composé : d'un réservoir de stockage (1) dans lequel une résistance électrique (2) sert à chauffer l'eau. La température de chauffe de l'eau est fixée à l'aide régulateur de température (3) lié au thermostat (4). La température maximale que peut atteindre le régulateur est 80° C. La résistance électrique ainsi que la pompe (5) sont mises en marche par l'interrupteur (6). L'eau chaude est mise en écoulement dans le tube intérieur de l'échangeur de chaleur (7) à l'aide de pompe à trois vitesses de rotation. Le débit d'eau chaude est fixé à l'aide de la vanne (8) et mesuré à l'aide du rotamètre (9). L'eau froide qui circule dans l'espace annulaire vient directement du robinet. Le débit d'eau froide est fixé à l'aide de la vanne (10) et mesuré à l'aide du rotamètre (11). L'échangeur est isolé thermiquement. La température le long de l'échangeur (entrée, milieu, sortie) est mesurée à l'aide des trois thermomètres (12) pour chaque tube. La configuration de l'échangeur (co-courant et contre courant) est obtenue par une combinaison de fermeture ou d'ouverture des vannes de commande (13). La purge de l'air dans le système est faite à l'aide des vannes (14) situées en haut de l'échangeur. La vanne (15) permet la vidange du réservoir de stockage (1) [17].



a)

1. Réservoir de stockage d'eau chaude
2. Résistance électrique
3. Régulateur de température
4. Thermostat
5. Pompe
6. Interrupteur de mise en marche de résistance émarginée
7. Tube coaxiaux forme U
8. Vanne d'eau chaude
9. Rotamètre (eau chaude)
10. Vanne d'eau chaude
11. Rotamètre (eau froide)
12. Thermomètre
13. Vannes de commande (co-courant ou contre courant)
14. Les vannes de purge
15. Vanne de vidange de réservoir de stockage



b)

Figure 3.1 : Description de banc d'essai : a) circuit d'échangeur de chaleur, b) réservoir de stockage.

3.3. Résultats expérimentales :

Le but de ces expériences est l'étude de la variation de la température de l'eau chaude et de l'eau froide dans un échangeur de chaleur coaxiale (co-courant et contre courant). Quatre températures respectivement 40°C, 50°C, 60°C et 70°C ont été utilisées. La durée des expériences a pris 2 heures, la température moyenne du laboratoire était de 18°C.

3.3.1. Débit chaud fixe

3.3.1.1. Co-courant

La figure 3.2 représente la variation de la température d'eau chaude et froide entre l'entrée et la sortie d'un l'échangeur de chaleur co-courant. Le débit d'eau chaud est fixé à $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$. On remarque que les quatre températures d'entrée (figure 3.2a-d) l'allure de la variation de la température le long de l'échangeur est la même. Si on considère une position dans l'échangeur de chaleur et un même débit de l'eau chaude, on remarque que plus le débit de l'eau froide augmente et plus et plus la température de l'eau chaude diminue. Pour un débit $Q_F = 500 \text{ cm}^3/\text{min}$, l'échange thermique est faible. La variation de la température d'entrée de l'eau chaude entre 40°C et 70°C a montré que le bon transfert de chaleur est obtenu pour une température de 70°. L'échange thermique entre l'eau chaude et froide est bon lorsque du débit d'eau froide est diminué, par contre, lorsque le débit froide augmente, l'échange thermique entre l'eau froide et chaude est bon.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
05 février 2017		14h00-15h45			15 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	15	40	22	36	25	33	
1000	15	38	19	34	22	30	
1500	14	38	17	33	20	29	
2000	14	38	16	32	18	29	
2500	14	38	15	32	17	29	

Tableau 3.1 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 février 2017		9h00-10h15			16 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	10	50	21	39	24	34	
1000	10	49	15	36	18	30	
1500	10	48	13	35	15	29	
2000	10	47	12	34	14	28	
2500	10	47	11	33	13	27	

Tableau 3.2 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 février 2017		9h00-10h15			17 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	13	60	26	45	30	40	
1000	12	60	20	42	22	35	
1500	12	58	16	40	19	33	
2000	11	57	15	39	17	31	
2500	11	56	14	38	16	30	

Tableau 3.3 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 février 2017		10h30-11h40			17 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	17	68	30	52	35	46	
1000	17	67	25	49	28	42	
1500	17	67	23	48	25	40	
2000	17	66	21	46	23	38	
2500	17	66	20	45	22	37	

Tableau 3.4 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$

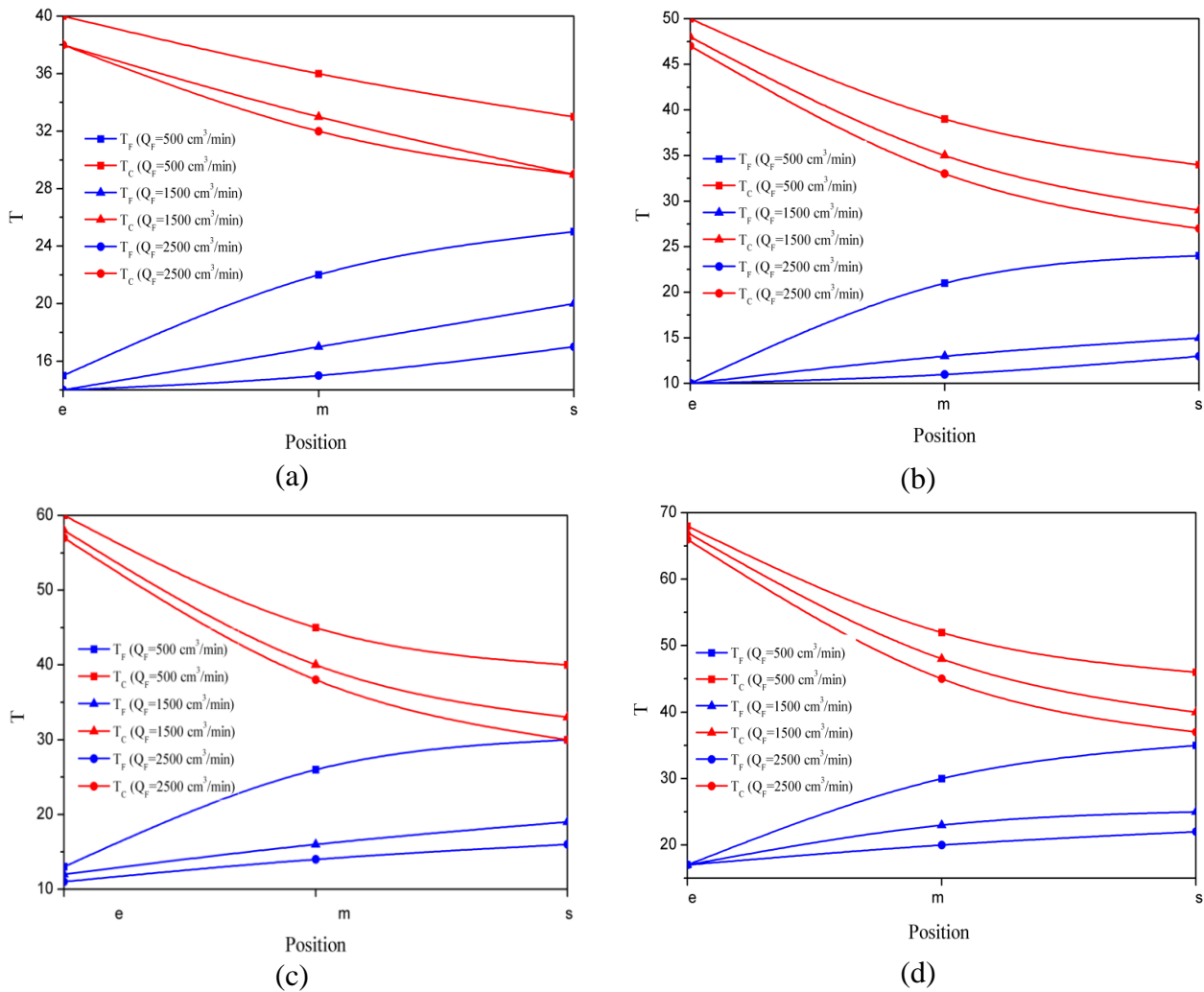


Figure 3.2 : Variation du profil de la température d’eau (chaude et froide) en fonction des différentes positions dans un échangeur co-courant et pour $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$: a) $T_C = 40^\circ\text{C}$, b) $T_C = 50^\circ\text{C}$, c) $T_C = 60^\circ\text{C}$ et d) $T_C = 70^\circ\text{C}$.

3.3.1.2. Contre-courant

La figure 3.3 représente la variation de la température d’eau chaude et froide entre l’entrée et la sortie d’un l’échangeur de chaleur co-courant. Le débit chaud est fixé à $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$. On remarque que Les résultats précédents restent valables dans ce cas (l’échange thermique entre l’eau chaude et l’eau froide est bon lorsque du débit d’eau froide diminue, par contre, lorsque le débit d’eau froide augmente, l’échange thermique entre l’eau froide et l’eau chaude est bon.), mais la différence entre les valeurs des températures chaude ou froide reste presque constante par rapport au cas du co-courant.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 Mars 2017		14h00-15h00			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	19	38	22	34	25	30	
1000	19	38	20	32	23	29	
1500	20	38	20	32	22	29	
2000	20	38	20	33	21	29	
2500	20	39	20	32	21	29	

Tableau 3.5 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		9h00-9h55			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	20	50	25	43	32	36	
1000	20	50	22	40	27	34	
1500	20	49	21	39	25	33	
2000	20	48	21	38	24	32	
2500	20	48	20	37	23	32	

Tableau 3.6 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		14h00-15h00			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	22	60	27	50	36	41	
1000	22	59	25	47	31	39	
1500	22	58	24	45	28	37	
2000	22	57	23	44	27	36	
2500	22	57	23	43	26	36	

Tableau 3.7 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 Mars 2017		8h50-9h50			18 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	16	68	24	54	37	43	
1000	15	67	19	49	27	39	
1500	15	66	18	47	24	36	
2000	15	66	17	45	22	35	
2500	15	66	16	44	20	34	

Tableau 3.8 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$

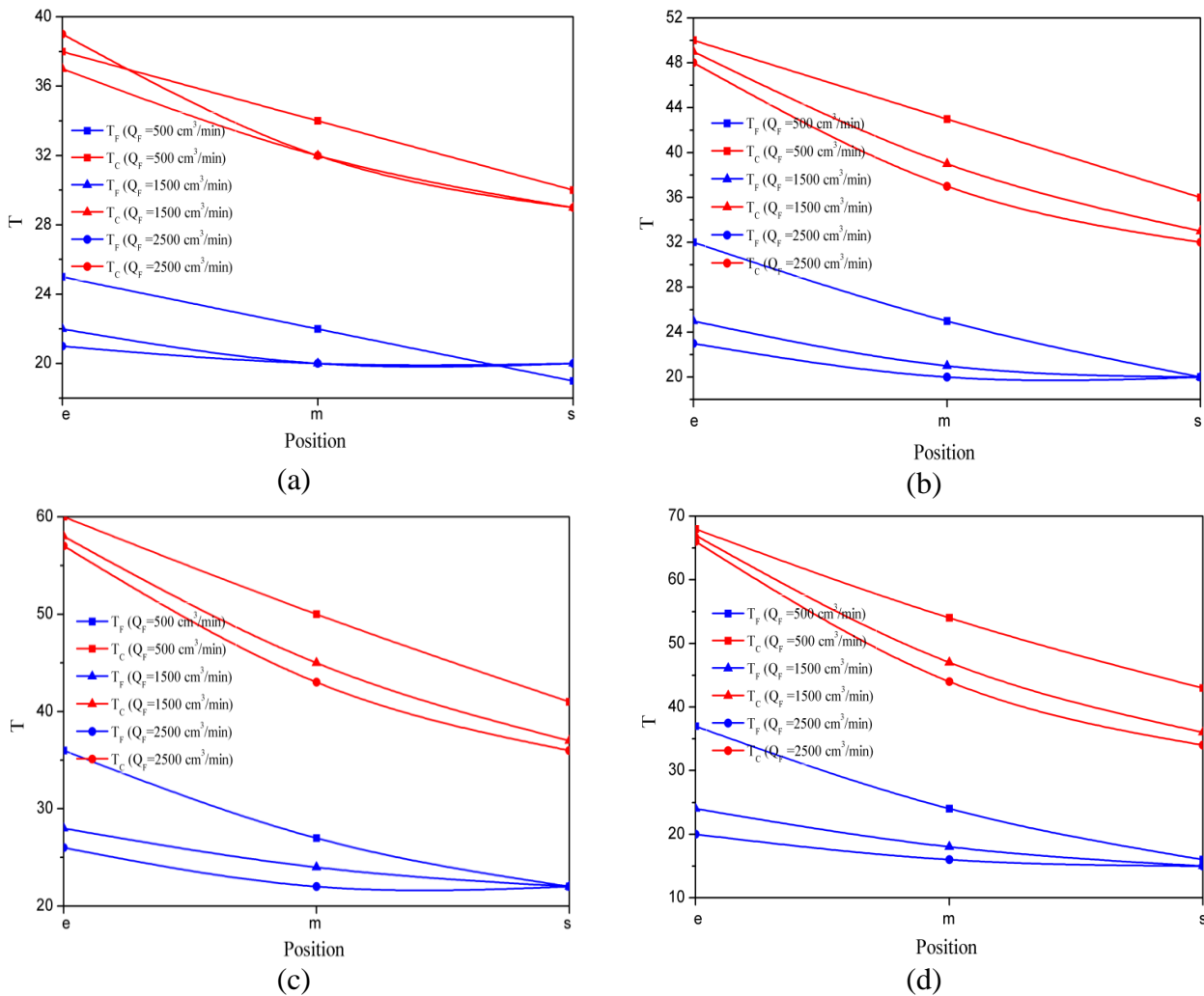


Figure 3.3 : Variation du profil de la température d'eau (chaude et froide) en fonction des différentes positions dans un échangeur contre-courant et pour $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$: a) $T_C = 40^\circ\text{C}$, b) $T_C = 50^\circ\text{C}$, c) $T_C = 60^\circ\text{C}$ et d) $T_C = 70^\circ\text{C}$.

3.3.2. Température chaude fixe

3.3.2.1. Co-courant

Les figures 3.4 et 3.5 représentent la variation de la température d'eau chaude et froide dans le cas d'un échangeur co-courant et à contre-courant. Le débit d'eau chaude varie entre $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$. La température du réservoir chaude fixée à 70°C . Les résultats trouvés précédemment restent valables dans ce cas (l'échange thermique entre l'eau chaude et froide est bon lorsque du débit d'eau froide diminue, par contre, lorsque le débit d'eau froide augmente, l'échange thermique entre l'eau froide et chaude est bon). Les valeurs existantes dans les deux tableaux ci-dessous montrent que, les valeurs les plus élevées de la perte de chaleur entre l'entrée et la sortie du tube interne, est obtenue pour le débit d'eau chaud égale à $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$. Concernant le gain de chaleur entre l'entrée et la sortie du tube externe, la valeur maximale est obtenue pour $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 février 2017		10h30-11h40			17 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	17	68	30	52	35	46	
1000	17	67	25	49	28	42	
1500	17	67	23	48	25	40	
2000	17	66	21	46	23	38	
2500	17	66	20	45	22	37	

Tableau 3.9 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400$ cm³/min et pour $T = 70^\circ\text{C}$

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
08 Mars 2017		8h45-10h40			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	18	68	35	59	42	55	
1000	18	67	28	57	33	51	
1500	17	67	25	55	29	49	
2000	17	66	23	54	27	47	
2500	17	65	22	53	25	46	

Tableau 3.10 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000$ cm³/min et pour $T = 70^\circ\text{C}$

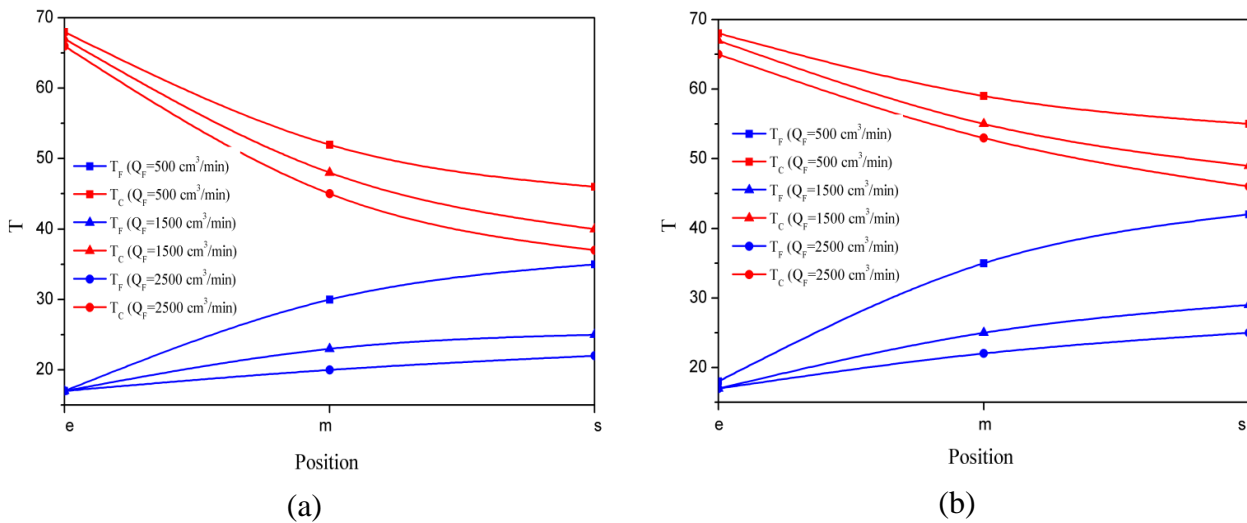


Figure 3.4 : Variation de profile de la température (chaude et froide) en fonction de différentes position pour l'échangeur co-courant et pour la température $T_C = 70^\circ\text{C}$: a) $Q_C = 400$ cm³/min et b) $Q_C = 1000$ cm³/min

3.3.2.2. Contre-courant

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 Mars 2017		8h50-9h50			18 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	16	68	24	54	37	43	
1000	15	67	19	49	27	39	
1500	15	66	18	47	24	36	
2000	15	66	17	45	22	35	
2500	15	66	16	44	20	34	

Tableau 3.11 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400$ cm³/min et pour $T = 70^\circ\text{C}$

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 Mars 2017		10h00-10h55			18 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	16	68	28	61	42	51	
1000	15	67	22	58	32	48	
1500	15	67	20	55	28	46	
2000	15	66	18	54	25	45	
2500	15	66	17	53	23	44	

Tableau 3.12 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000$ cm³/min et pour $T = 70^\circ\text{C}$

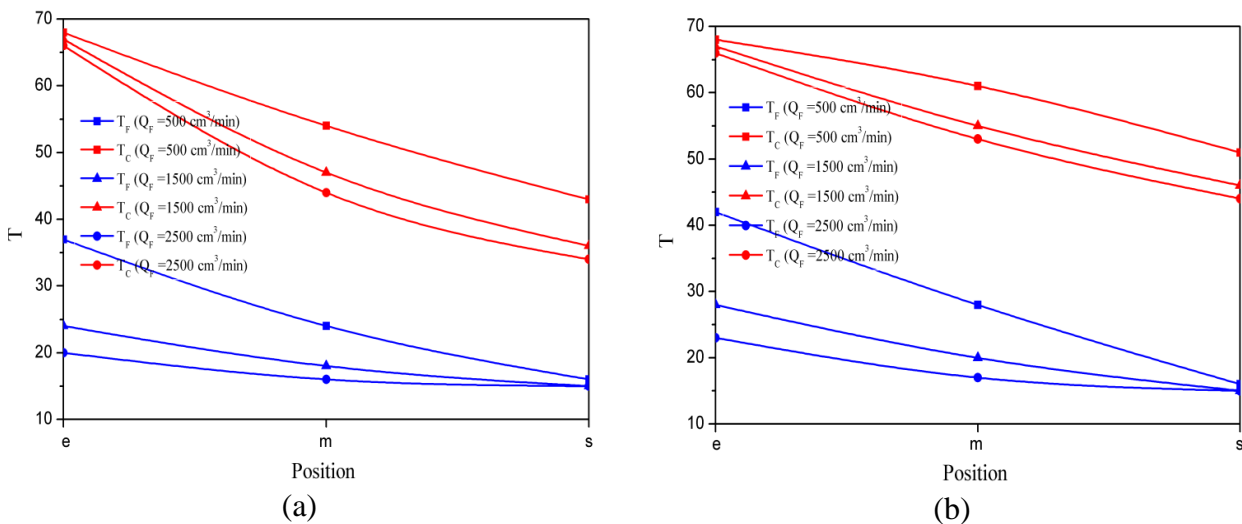


Figure 3.5 : Variation de profile de la température (chaude et froide) en fonction de différentes position pour l'échangeur contre-courant et pour la température $T_C = 70^\circ\text{C}$: a) $Q_C = 400$ cm³/min et b) $Q_C = 1000$ cm³/min

3.3.3. Différence de la température logarithmique moyenne ΔTLM :

La figure 3.6 représente la variation de la ΔTLM dans le cas d'un échangeur de chaleur co-courant. La figure 3.6(a) est obtenue pour le débit chaud est fixé à $Q_C = 400$ cm³/min. On remarque que les trois courbes correspondant aux températures 50°C , 60°C et 70°C ont la même allure. La

ΔTLM augmente jusqu'à un débit d'eau froide à $Q_F = 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$, puis elles demeurent constantes. Pour la courbe de température 40°C , la ΔTLM augmente avec l'augmentation du débit d'eau froide.

La figure 3.6(b) est obtenue pour le débit d'eau froide fixé à $Q_F = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$. Le résultat montre que la valeur maximale de ΔTLM dans le cas $T_C = 40^\circ\text{C}$ est obtenue pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$. Pour les deux températures 50°C et 70°C les valeurs de ΔTLM presque restent constantes lorsque $Q_C \geq 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$. Pour la température 60°C , la valeur maximale de ΔTLM est obtenue pour $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$.

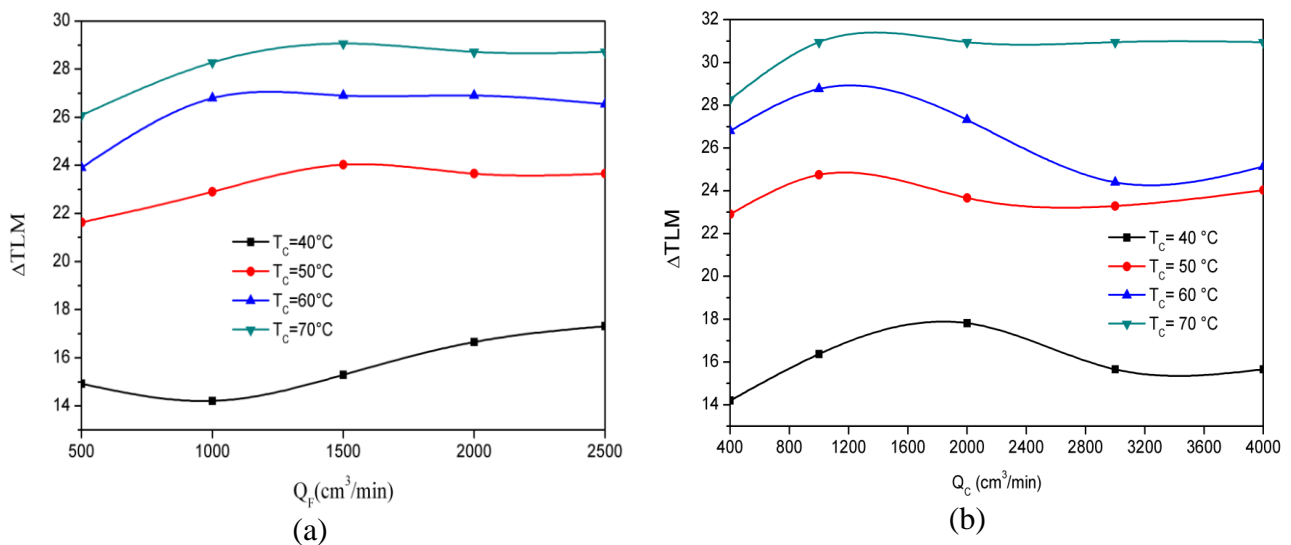


Figure 3.6 : Variation de la ΔTLM en fonction des différentes valeurs de débits froid pour l'échangeur co-courant et pour les différentes températures : a) $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et b) $Q_F = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$.

La figure 3.7 représente la variation de la ΔTLM dans le cas d'un échangeur de chaleur contre-courant. La figure 3.7(a) est obtenue pour le débit chaud est fixé à $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$. Les résultats montrent que les trois courbes correspondant aux températures 40°C , 50°C et 60°C ont la même allure. La ΔTLM reste presque constante quelque soit la valeur du débit d'eau froide. D'autre part pour la courbe à température 70°C , la valeur maximale de la ΔTLM est obtenue pour le débit d'eau froide $Q_F = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$.

En générale, la performance thermique ne dépend pas à la variation du débit d'eau froide, puisque les courbes parallèles au l'axe horizontale, elle dépend à la température initiale chaude.

L'influence de la variation de débit d'eau chaude est présenté dans la figure 3.7(b) et pour le débit d'eau froide fixé à $Q_F = 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$. Les résultats montrent que lorsque le débit d'eau chaude est inférieur à $Q_C < 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ les valeurs de la ΔTLM restent presque constantes et

sont parallèles à l'axe horizontale pour la température chaude comprise entre 40°C et 60°C. Ceci montre que la variation de ΔTLM ne dépend pas du changement du débit d'eau chaude. Pour la température 70°C la valeur maximale est obtenue pour $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$.

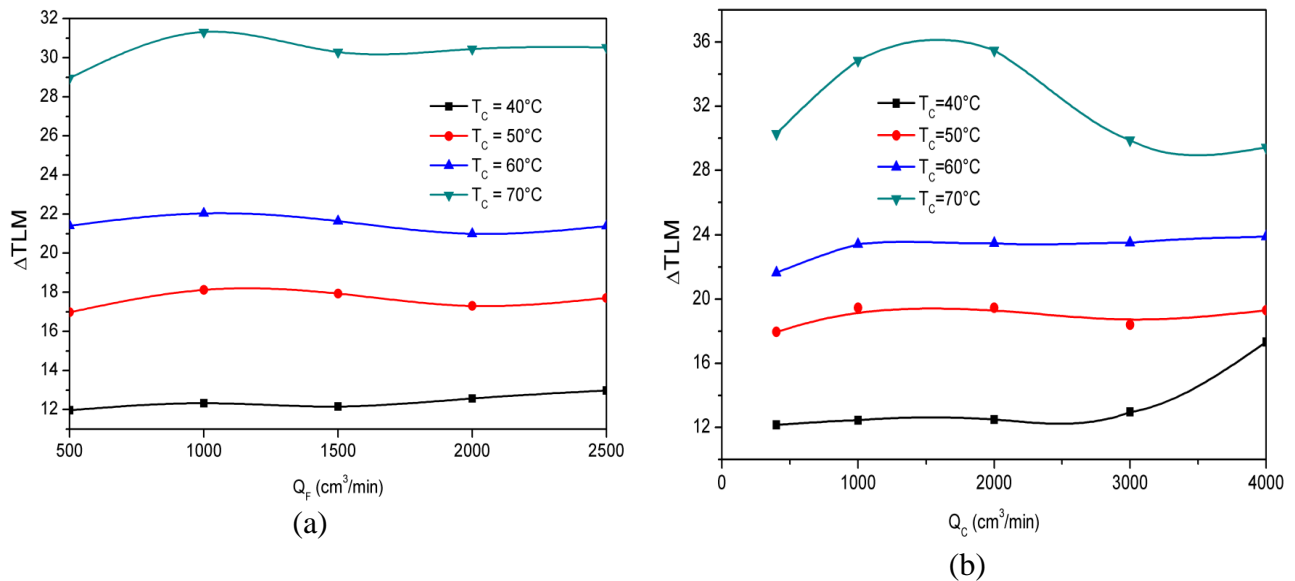


Figure 3.7 : Variation de la ΔTLM en fonction des différentes valeurs de débits froid pour l'échangeur contre-courant et pour les différentes températures : a) $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et b) $Q_F = 1500 \text{ cm}^3/\text{min}$

3.3.4. Variation du coefficient d'échange global U

Les tableaux ci-dessous présentent la variation du coefficient d'échange global U en fonction du débit d'eau chaude dans le cas d'un échangeur de chaleur co-courant et contre courant. Les résultats montrent que le coefficient d'échange thermique global U augmente avec l'augmentation de débit d'eau chaude Q_C .

3.3.4.1. Co-courant

Pour le tableau 3.13, on remarque que la valeur minimale du coefficient d'échange globale U est obtenue pour le débit d'eau chaude égale à $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$. Pour les deux débits d'eau chaude $Q_C = 3000$ et $4000 \text{ cm}^3/\text{min}$, les valeurs de U sont presque égales. Les tableaux 3.14-3.16, montrent que le coefficient d'échange global U augmente lorsque le débit d'eau chaude Q_C .

On conclue que, la performance thermique d'un échangeur de chaleur coaxial est plus élevée lorsque le débit d'eau chaude augmente.

Q_C (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	ΔTLM	$P_{absorbée}$	$P_{émise}$	U
400	15	38	19	34	22	30	14,20	732,54	221,33	769,76
1000	12	37	16	32	19	29	16,37	733,41	553,47	668,67
2000	12	39	18	35	22	33	17,82	1047,73	829,69	877,61
3000	12	37	19	35	24	33	15,66	1257,27	830,20	1198,22
4000	14	39	20	37	26	35	15,66	1256,33	1106,26	1197,32

Tableau 3.13 : les valeurs du coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 40^\circ C$ et $Q_F = 1000$ cm³/min

Q_C (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	ΔTLM	$P_{absorbée}$	$P_{émise}$	U
400	10	49	15	36	18	30	22,91	839,04	523,56	546,68
1000	10	48	17	40	21	36	24,74	1153,68	827,01	695,90
2000	10	47	20	42	25	39	23,67	1573,20	1103,00	992,17
3000	12	48	21	45	28	42	23,29	1676,36	1240,51	1074,12
4000	12	50	23	46	30	44	24,04	1885,91	1652,69	1171,10

Tableau 3.14 : les valeurs du coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 50^\circ C$ et $Q_F = 1000$ cm³/min

Q_C (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	ΔTLM	$P_{absorbée}$	$P_{émise}$	U
400	12	60	20	42	22	35	26,79	1047,73	685,86	583,62
1000	12	57	22	48	26	43	28,76	1466,82	961,36	761,13
2000	13	56	24	50	30	46	27,31	1780,55	1373,93	973,07
3000	18	57	29	53	36	50	24,40	1881,34	1442,05	1150,71
4000	18	59	31	56	40	54	25,13	2299,42	1372,27	1365,81

Tableau 3.15 : les valeurs du coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 60^\circ C$ et $Q_F = 1000$ cm³/min

Q_C (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	ΔTLM	$P_{absorbée}$	$P_{émise}$	U
400	17	67	25	49	28	42	28,28	1150,04	683,85	606,95
1000	18	67	28	57	33	51	30,96	1567,78	1094,17	755,92
2000	18	67	30	60	38	56	30,96	2090,38	1504,48	1007,90
3000	18	67	32	61	40	58	30,96	2299,42	1846,41	1108,69
4000	18	67	33	62	42	60	30,96	2508,45	1914,79	1209,48

Tableau 3.16 : les valeurs du coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 70^\circ C$ et $Q_F = 1000$ cm³/min

3.3.4.2. Contre-courant

Les résultats obtenus sont similaires aux ceux obtenues dans le cas co-courant. Le tableau 3.17 montre que le coefficient d'échange globale U augmente jusqu'à une valeur de débit d'eau chaude égale à $Q_C = 2000$ cm³/min, puis diminue. Les tableaux 3.18-3.20 donnent les valeurs du coefficient

U en fonction du débit d'eau chaude Q_C , lorsque le débit chaud augmente, le coefficient U augmente.

Q_C (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	ΔTLM	$P_{absorbée}$	$P_{émise}$	U
400	20	38	20	32	22	29	12.17	208.86	249.04	256.15
1000	20	38	21	34	24	31	12.44	417.72	484.24	501.17
2000	20	38	23	35	26	33	12.49	626.58	691.77	748.75
3000	21	39	24	37	27	35	12.97	626.35	829.81	720.78
4000	21	49	21	39	25	33	17.31	417.56	4408.91	360.04

Tableau 3.17 : les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 40^\circ C$ et $Q_F = 1500$ cm³/min

Q_C (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	ΔTLM	$P_{absorbée}$	$P_{émise}$	U
400	20	49	21	39	25	33	17.94	522.15	440.89	434.41
1000	20	48	23	42	27	38	19.46	731.01	689.17	560.67
2000	20	48	24	42	27	38	19.46	731.01	1378.33	560.67
3000	20	46	25	44	30	41	18.39	1044.30	1034.55	847.55
4000	21	48	26	46	32	44	19.29	1148.30	1102.67	888.48

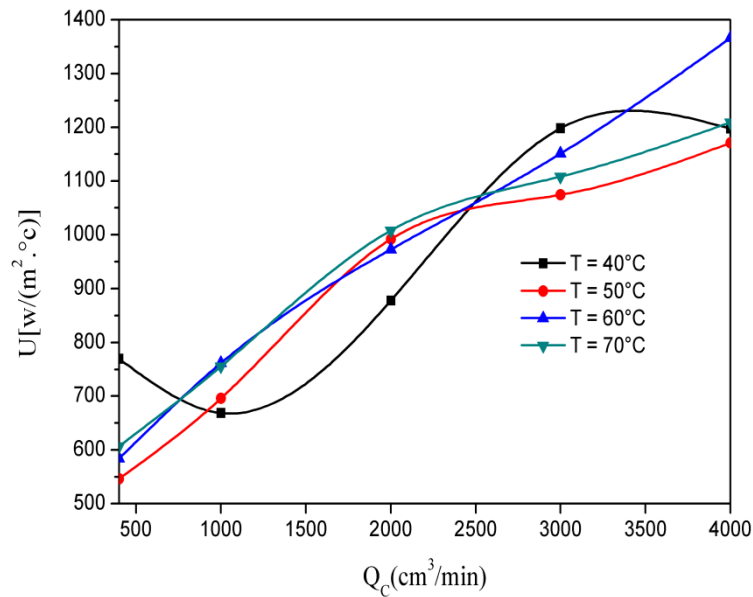
Tableau 3.18 : les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 50^\circ C$ et $Q_F = 1500$ cm³/min

Q_C (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	ΔTLM	$P_{absorbée}$	$P_{émise}$	U
400	22	58	24	45	28	37	21.64	626.12	577.20	431.84
1000	23	57	25	50	31	44	23.41	834.51	892.71	532.06
2000	23	57	28	53	35	48	23.47	1251.77	1236.06	796.04
3000	24	58	30	55	35	48	23.50	1147.03	2061.44	728.51
4000	25	59	32	56	38	52	23.87	2327.12	1921.17	1455.10

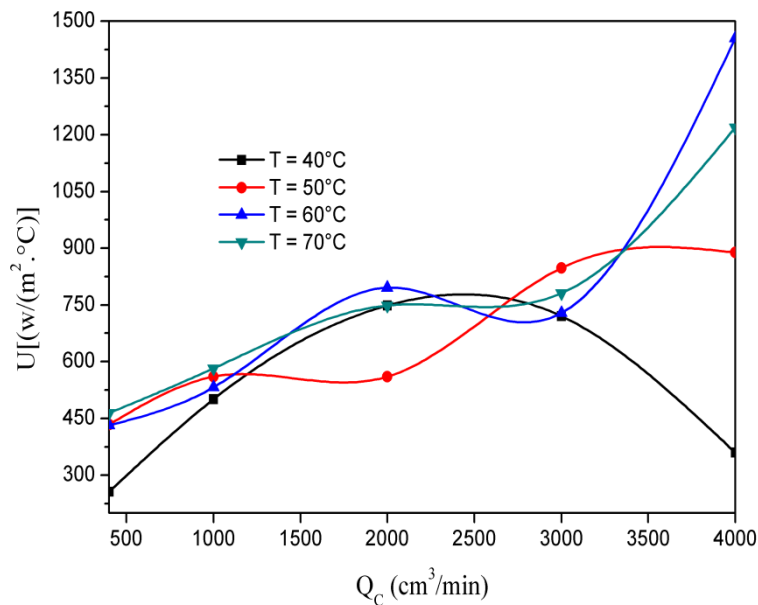
Tableau 3.19 : les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 60^\circ C$ et $Q_F = 1500$ cm³/min

Q_C (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	ΔTLM	$P_{absorbée}$	$P_{émise}$	U
400	15	66	18	47	24	36	30.30	942.12	820.97	464.07
1000	15	67	20	55	28	46	34.85	1360.84	1436.09	582.81
2000	15	66	23	59	32	52	35.48	1779.56	1915.59	748.61
3000	22	64	30	60	37	55	29.90	1565.29	1848.71	781.36
4000	17	63	27	59	40	54	29.45	2404.54	2465.98	1218.63

Tableau 3.20 : les valeurs de rendement et coefficient d'échange global en fonction des différences valeur du débit d'eau chaude et pour $T_C = 70^\circ C$ et $Q_F = 1500$ cm³/min



(a)



(b)

Figure 3.8 : Variation du Coefficient d'échangeur global U en fonction des différentes valeurs de débits chaud pour les différentes températures : a) co-courant, b) contre -courant

La figure 3.8 représente la variation coefficient d'échangeur global U dans le cas d'un échangeur de chaleur co-courant. La figure 3.8(a) est obtenue pour des différentes valeurs de débits chauds $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$, $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$, $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$, $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$.

On remarque que les quatre courbes correspondant aux températures 40°C , 50°C , 60°C et 70°C ont la même allure. Le coefficient de transfert de chaleur globale U augmente avec le débit d'eau

chaude jusqu'à une valeur presque constante pour les différentes températures. Pour la courbe de température 60°C, la valeur du U est maximale.

La figure 3.8 représente la variation coefficient d'échangeur global U dans le cas d'un échangeur de chaleur contre-courant. La figure 3.8(b) est obtenue pour des différentes valeurs de débits chauds $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$, $Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$, $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$, $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$.

On remarque que les quatre courbes correspondant aux températures 40°C, 50°C, 60°C et 70°C ont allures différentes. Le coefficient de transfert de chaleur globale U augmente avec le débit d'eau chaude jusqu'à des valeurs différents pour les différentes températures. Pour la courbe de température 60°C, la valeur du U est toujours maximale.

Conclusion
Générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié expérimentalement un échangeur de chaleur à tubes coaxiaux.

Le dispositif expérimental, monté dans le hall technologique du département de génie mécanique de l'université de Tiaret, se compose d'un échangeur de chaleur à tubes coaxiaux « Armfield » avec alimentation électrique et alimentation en eau.

L'échangeur de chaleur est du type à double tubes coaxiaux avec l'eau chaude en écoulement dans le tube interne tandis que l'eau froide en écoulement dans l'espace annulaire. L'échangeur de chaleur comprend trois points de mesure de températures : deux aux extrémités et la troisième au milieu. Des thermocouples mesurent les températures du courant à l'entrée et à la sortie des deux tubes formant l'échangeur de chaleur.

Les mesures effectuées ont permis d'étudier les profils de température, les bilans énergétiques, la différence de température moyenne logarithmique (ΔTLM), et le coefficient de transfert de chaleur globale. Deux configurations de l'échangeur de chaleur ont été utilisées, le co-courant et le contre-courant. Quatre températures respectivement 40°C, 50°C, 60°C et 70°C ont été utilisées.

La comparaison des résultats pour les deux configurations, a montré :

- Une légère différence dans les températures de sortie de l'eau froide,
- Une augmentation de la ΔTLM dans le cas de la configuration contre-courant,
- Une augmentation du coefficient globale de transfert de chaleur dans le cas de la configuration contre-courant,

Ces trois derniers résultats confirment l'utilisation courante de l'échangeur à contre-courant par rapport à celle du co-courant. Rappelons que l'inconvénient de l'échangeur à co-courant est le croisement des profils de températures.

On remarque que la valeur de la ΔTLM augmente avec l'augmentation du débit d'eau froide. Les résultats montrent que le coefficient d'échange thermique global U augmente avec l'augmentation de débit d'eau chaude Q_C .

On remarque que, la performance thermique d'un échangeur de chaleur coaxial est plus élevée lorsque le débit d'eau chaude augmente.

Références
Bibliographique

- [1] A.BONTENPS. Échangeur de chaleur, description des échangeurs, technique de l'ingénieur traitée génie énergétique B2341, pp. 1-7.
- [2] A.MEZMIZ. Mini projet 1^{ère} post graduation « différent type d'échangeur » de l'université Mentouri Constantine (2006).
- [3] J.F.SACCADURA. Initiation aux transferts thermique, paris 4^{ème} édition (1993).
- [4] M.MOUSSA, J.MARIE PERRIERCORNET. Échangeur de chaleur : échangeur tubulaire et échangeur à surface raclée, JEAN CASTING LASVINOTTES (2002).
- [5] J.PADET. Échangeurs thermiques. Masson, Paris, Milan, Barcelone (1994).
- [6] MEDEREG Hamid, Étude et organigramme de calcul d'un échangeur de chaleur, Mémoire Master Génie Mécanique Energétique, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, année (2013/2014).
- [7] TAOURIT FARIDA, Etude du comportement dynamique et thermique de deux écoulements du fluide dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes), Mémoire de Master en Génie Energétique, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, année (2013-2014).
- [8] FINKBEINER.F, GONAD.T, et FILIOL.B, Échangeurs thermiques enjeux marche, technologie et politique d'innovation, Edition Européennes thermique et industries (ETI), France (1993).
- [9] Byung-Hee Chun, Hyun Uk Kang, and Sung Hyun Kim, Effect of alumina nanoparticles in the fluid on heat transfer in double-pipe heat exchanger system, *Korean J. Chem. Eng.*, (2008), 25(5), 966-971 .
- [10] Li Zhang , Hongmei Guo , Jianhua Wu , Wenjuan du compound heat transfer enhancement for shell side of double-pipe heat exchanger by helical fins and vortex generators *Heat Mass Transfer* (2012) 48,1113–1124.
- [11] M. Sheikholeslamia, M. Gorji-Bandpy, and D.D. Ganji, Fluid flow and heat transfer in an air-to-water double-pipe heat exchanger, *The European physical journal plus* (2015) 130: 225.
- [12] Reza Aghayari , Heydar Maddah , Fatemeh Ashori , Afshin Hakiminejad , Mehdi Aghili Effect of nanoparticles on heat transfer in mini double-pipe heat exchangers in turbulent flow *Heat Mass Transfer* (2015) 51:301–306 .
- [13] Mohammad Hazbehian , Heydar Maddah, Hamid Mohammadiun , Mostafa Alizadeh Experimental investigation of heat transfer augmentation inside double pipe heat exchanger equipped with reduced width twisted tapes inserts using polymeric nanofluid *Heat Mass Transfer* (2016) 52, 2515–2529.

- [14] Rashid Kareem, Optimization of double pipe helical tube heat exchanger and its comparison with straight double tube heat exchanger, *J. Inst. Eng. India Ser. C*, (2016) DOI10.1007/s40032-016-0261-x.
- [15] Yves Jannot and Christian Moyen, *Transfer thermique coures et 55 exercices corrigés* , *Ecole des Mines Nancy* (2012).
- [16] Site web : cours-iup-me-échangeur thermique.
- [17] Manuel d'instructions échangeur de chaleur de tube concentrique HT4.

ANNEXE

ANNEXE A

A.1. Equation gouvernantes

Les équations de la conservation peuvent se généraliser sous une seule forme d'équations aux dérivées partielles. Si on note toute variable générale mesurée par le symbole ϕ , l'équation différentielle générale s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \phi) + \text{div}(\rho v \cdot \phi) \text{div} \left(\Gamma_{\phi} \cdot \vec{\text{grad}} \phi \right) + S_{\phi} \quad (\text{A.1})$$

On peut considérer que les équations suivantes décrivent le phénomène d'écoulement à l'intérieur d'un échangeur de chaleur :

A.1.1. Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{A.2})$$

A.1.2. Équation de quantité de mouvement

$$\text{Selon } ox : u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Selon } oy : u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{A.4})$$

A.1.3. Équation d'énergie

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{A.5})$$

A.2. Coefficient d'échange global considère comme non constant, fonction de T

Dans le cas il faut résoudre :

$$-\int_0^S \frac{dS}{Q_C} = \int_{T_1=T_{ce}}^{T_2=T_{cs}} \frac{1}{U} \frac{dT}{T-t} \quad (\text{A.6})$$

A.2.1. Résolution graphique :

L'intégration du 2^{ème} membre se fait graphiquement généralement en tracer la courbe

$$\frac{1}{U(T-t)} = f(T) \quad (\text{A.7})$$

Cette méthode donne de bons résultats mais elle est fastidieuse

A.3. Méthode de Calburn :

L'hypothèse de Calburn est que U varie linéairement en fonction de l'écart de la température $\Delta T = T - t$ des deux fluides dans un même plan transversal de l'échangeur

$$U = a + b\Delta T \quad (\text{A.8})$$

✓ à l'entrée $U_e = a + b\Delta T_e$

✓ à la sortie $U_s = a + b\Delta T_s$

$$\Rightarrow \begin{cases} b = \frac{U_e - U_s}{\Delta T_e - \Delta T_s} \\ a = U_e - \frac{U_e - U_s}{\Delta T_e - \Delta T_s} \Delta T_e \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

D'autre part on pose

$$T - t = \left(1 + \frac{Q_c}{q_c}\right) T = \left(\frac{Q_c}{q_c} T_1 + t_1\right) = cT + d \quad (\text{A.10})$$

Et l'intégral à effectuer devant :

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{U} \frac{dT}{T - t} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{(a + b\Delta T)\Delta T} dT \quad (\text{A.11})$$

Soit

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{a + b(cT + d)} \cdot \frac{dT}{cT + d} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{bcT + a + bd} \cdot \frac{dT}{cT + d} \quad (\text{A.12})$$

La linéarisation des termes à l'intérieur de l'intégrale donne :

$$\frac{1}{bcT + a + bd} \cdot \frac{1}{cT + d} = \frac{A}{bcT + a + bd} + \frac{B}{cT + d} \quad (\text{A.13})$$

En multipliant chaque terme par $bcT + a + bd$ et en faisant

$$T = \frac{-bd - a}{bc} \Rightarrow A = -\frac{b}{a} \quad (\text{A.14})$$

De là en multipliant chaque terme par $cT + d$ et en faisant $T = -\frac{d}{c} \Rightarrow B = \frac{1}{a}$

On aura donc

$$-\int_0^S \frac{dS}{Q_C} = -\frac{b}{a} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{bcT+a-bd} + \frac{1}{a} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{cT-d} \quad (\text{A.15})$$

$$-\frac{S}{Q_C} = -\frac{1}{ac} \ln \frac{\Delta T_s \cdot U_e}{\Delta T_e \cdot U_s} \quad (\text{A.16})$$

$$Q_C = \frac{acS}{\ln \frac{K_e \cdot \Delta T_s}{K_s \cdot \Delta T_e}} \quad (\text{A.17})$$

En multipliant chaque terme par $(T_1 - T_2)$, on obtient

$$\Phi = \frac{ac(T_1 - T_2)S}{\ln \frac{U_e \cdot \Delta T_s}{U_s \cdot \Delta T_e}} \quad (\text{A.18})$$

En remplaçant a et c par leur expression, on aura

$$\Phi = \frac{(U_e \cdot \Delta T_s - U_s \cdot \Delta T_e)S}{\ln \frac{U_e \cdot \Delta T_s}{U_s \cdot \Delta T_e}} \quad (\text{A.19})$$

Ou sous la forme :

$$\Phi = (K\Delta T)_M S \quad (\text{A.20})$$

Cette relation : la moyenne logarithmique du produit $(K\Delta T)$

ANNEXE B : LES TABLEAUX EXPERIMENTALES

Echangeur co-courant

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
05 février 2017		14h00-15h45			15 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	15	40	22	36	25	33	
1000	15	38	19	34	22	30	
1500	14	38	17	33	20	29	
2000	14	38	16	32	18	29	
2500	14	38	15	32	17	29	

Tableau B.1 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
06 février 2017		9h40-11h00			13 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	15	37	21	33	25	31	
1000	12	37	16	32	19	29	
1500	11	36	15	31	17	28	
2000	12	37	14	30	16	28	
2500	12	38	13	32	15	28	

Tableau B.2 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
07 février 2017		9h15-10h15			15 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	13	40	23	37	29	35	
1000	12	39	18	35	22	33	
1500	12	38	16	34	20	31	
2000	11	37	15	33	18	30	
2500	11	37	14	32	17	29	

Tableau B.3 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
07 février 2017		10h15-11h15			15 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	13	38	24	36	29	35	
1000	12	37	19	35	24	33	
1500	12	37	17	34	21	32	
2000	12	37	16	33	19	31	
2500	11	36	15	33	18	30	

Tableau B.4 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
07 février 2017		14h15-15h15			18 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	15	40	21	38	32	37	
1000	14	39	20	37	26	35	
1500	13	38	20	35	23	34	
2000	13	37	16	35	21	32	
2500	13	37	16	34	20	32	

Tableau B.5 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 février 2017		8h15-9h00			16 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	10	50	21	39	24	34	
1000	10	49	15	36	18	30	
1500	10	48	13	35	15	29	
2000	10	47	12	34	14	28	
2500	10	47	11	33	13	27	

Tableau B.6 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 février 2017		9h15-10h15			16 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	11	48	23	42	28	39	
1000	10	48	17	40	21	36	
1500	10	47	15	39	18	35	
2000	10	47	13	38	16	34	
2500	10	47	13	38	15	33	

Tableau B.7 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 février 2017		10h30-11h15			16 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	11	48	26	44	33	42	
1000	10	47	20	42	25	39	
1500	10	46	16	40	21	37	
2000	10	46	15	40	20	36	
2500	10	45	14	39	18	35	

Tableau B.8 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 février 2017		14h10-14h55			16 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	13	50	29	47	36	45	
1000	12	48	21	45	28	42	
1500	12	47	19	43	24	39	
2000	11	45	17	41	22	38	
2500	11	45	16	40	20	37	

Tableau B.9 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 février 2017		15h00-15h45			16 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	12	50	30	48	39	46	
1000	12	50	23	46	30	44	
1500	12	48	20	45	26	42	
2000	11	47	18	43	23	40	
2500	11	45	17	42	22	39	

Tableau B.10 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 février 2017		9h15-10h10			17 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	13	60	26	45	30	40	
1000	12	60	20	42	22	35	
1500	12	58	16	40	19	33	
2000	11	57	15	39	17	31	
2500	11	56	14	38	16	30	

Tableau B.11 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400$ cm³/min et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 février 2017		10h15-10h55			17 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	13	58	28	50	34	46	
1000	12	57	22	48	26	43	
1500	12	57	18	47	22	41	
2000	12	56	17	46	20	40	
2500	11	56	16	45	19	39	

Tableau B.12 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000$ cm³/min et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 février 2017		11h00-11h45			17 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	14	58	32	54	40	51	
1000	13	56	24	50	30	46	
1500	13	55	21	48	26	44	
2000	13	55	19	47	24	43	
2500	13	55	18	47	22	42	

Tableau B.13 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 février 2017		14h00-14h45			17 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	18	59	35	55	44	53	
1000	18	57	29	53	36	50	
1500	18	56	26	51	32	48	
2000	17	55	24	50	29	46	
2500	17	54	23	49	28	4	

Tableau B.14 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
08 Mars 2017		8h45-9h40			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	18	60	37	57	46	55	
1000	18	59	31	56	40	54	
1500	18	58	27	54	34	51	
2000	18	56	25	52	31	49	
2500	18	55	24	50	29	48	

Tableau B.15 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 février 2017		10h00-10h40			17 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	17	68	30	52	35	46	
1000	17	67	25	49	28	42	
1500	17	67	23	48	25	40	
2000	17	66	21	46	23	38	
2500	17	66	20	45	22	37	

Tableau B.16 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
08 Mars 2017		8h45-9h35			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	18	68	35	59	42	55	
1000	18	67	28	57	33	51	
1500	17	67	25	55	29	49	
2000	17	66	23	54	27	47	
2500	17	65	22	53	25	46	

Tableau B.17 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
08 Mars 2017		9h40-10h05			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	18	68	39	62	48	59	
1000	18	67	30	60	38	56	
1500	17	65	27	58	33	53	
2000	17	64	25	57	30	51	
2500	17	63	24	55	29	49	

Tableau B.18 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
08 Mars 2017		10h10-10h55			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	18	68	40	63	50	61	
1000	18	67	32	61	40	58	
1500	17	65	28	59	35	55	
2000	17	64	26	58	32	53	
2500	17	62	24	56	30	51	

Tableau B.19 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
08 Mars 2017		11h00-11h40			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	18	67	40	63	51	61	
1000	18	67	33	62	42	60	
1500	18	66	30	60	37	58	
2000	18	65	27	58	35	56	
2500	18	64	26	56	32	54	

Tableau B.20 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Echangeur contre courant

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 Mars 2017		14h00-14h35			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	19	38	22	34	25	30	
1000	19	38	20	32	23	29	
1500	20	38	20	32	22	29	
2000	20	39	20	33	21	29	
2500	20	38	20	32	21	29	

Tableau B.21 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 Mars 2017		14h40-15h15			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	20	38	24	36	29	33	
1000	20	38	22	35	25	32	
1500	20	38	21	34	24	31	
2000	20	38	20	34	23	31	
2500	20	38	20	34	22	31	

Tableau B.22 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 Mars 2017		15h20-15h55			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	20	39	26	37	31	35	
1000	20	38	24	36	28	34	
1500	20	38	23	35	26	33	
2000	20	37	22	35	25	32	
2500	20	37	21	35	24	32	

Tableau B.23 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
09 Mars 2017		16h00-14h30			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	21	40	28	39	33	37	
1000	21	39	25	38	30	36	
1500	21	39	24	37	27	35	
2000	21	38	23	36	26	34	
2500	21	38	2339	35	25	33	

Tableau B.24 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		8h15-8h55			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	21	50	25	43	32	36	
1000	21	50	22	40	27	34	
1500	21	49	21	39	25	33	
2000	21	48	21	38	24	32	
2500	21	48	20	37	23	32	

Tableau B.25 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000$ cm³/min et pour $T_C = 40^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		9h00-9h45			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	20	50	25	43	32	36	
1000	20	50	22	40	27	34	
1500	20	49	21	39	25	33	
2000	20	48	21	38	24	32	
2500	20	48	20	37	23	32	

Tableau B.26 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		9h55-10h25			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	20	49	27	45	35	41	
1000	20	48	24	43	29	39	
1500	20	48	23	42	27	38	
2000	20	48	22	42	25	37	
2500	20	47	21	41	25	37	

Tableau B.27 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		10h30-10h55			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	20	49	31	45	35	41	
1000	20	48	27	43	29	39	
1500	20	48	24	42	27	38	
2000	20	47	24	42	25	37	
2500	20	47	23	41	25	37	

Tableau B.28 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 2000$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		11h00-11h40			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	20	48	31	47	39	44	
1000	20	47	27	45	33	42	
1500	20	46	25	44	30	41	
2000	20	45	24	43	28	40	
2500	20	45	23	42	27	39	

Tableau B.29 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 3000$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
08 Mars 2017		11h40-12h00			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	20	50	33	49	46	46	
1000	21	49	28	47	35	45	
1500	21	48	26	46	32	44	
2000	21	47	25	45	30	42	
2500	21	46	24	44	29	41	

Tableau B.30 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 4000$ cm³/min et pour $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		14h00-14h45			20 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	22	60	27	50	36	41	
1000	22	59	25	47	31	39	
1500	22	58	24	45	28	37	
2000	22	57	23	44	27	36	
2500	22	57	23	43	26	36	

Tableau B.31 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 400$ cm³/min et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		14h50-15h15			21 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	23	58	31	53	41	47	
1000	23	58	27	51	34	45	
1500	23	57	25	50	31	44	
2000	23	57	24	49	29	43	
2500	23	57	24	48	28	42	

Tableau B.32 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude $Q_C = 1000$ cm³/min et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		15h15-15h45			21 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	23	59	36	56	46	52	
1000	23	58	30	54	38	49	
1500	23	57	28	53	35	48	
2000	23	57	27	52	32	46	
2500	23	56	26	50	31	45	

Tableau B.33 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		15h45-16h10			21 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	23	60	38	58	46	52	
1000	23	59	32	56	38	49	
1500	24	58	30	55	35	48	
2000	24	57	29	54	32	46	
2500	24	56	28	52	31	45	

Tableau B.34 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
12 Mars 2017		16h10-16h20			21 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	24	60	40	59	49	56	
1000	24	60	34	57	42	54	
1500	25	59	32	56	38	52	
2000	25	57	30	54	36	50	
2500	25	56	30	52	35	49	

Tableau B.35 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 60^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 Mars 2017		8h50-9h50			18 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	16	68	24	54	37	43	
1000	15	67	19	49	27	39	
1500	15	66	18	47	24	36	
2000	15	66	17	45	22	35	
2500	15	66	16	44	20	34	

Tableau B.36 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude
 $Q_C = 400 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 Mars 2017		9h50-10h25			18 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	16	68	28	61	42	51	
1000	15	67	22	58	32	48	
1500	15	67	20	55	28	46	
2000	15	66	18	54	25	45	
2500	15	66	17	53	23	44	

Tableau B.37 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 Mars 2017		10h30-11h20			18 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	16	67	35	64	48	58	
1000	16	67	27	61	39	55	
1500	15	66	23	59	32	52	
2000	15	65	21	57	29	50	
2500	15	64	20	56	27	48r	

Tableau B.38 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 2000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 Mars 2017		14h05-14h55			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	21	68	41	65	53	61	
1000	22	65	33	62	43	57	
1500	22	64	30	60	37	55	
2000	22	62	28	58	35	52	
2500	22	61	27	57	33	51	

Tableau B.39 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 3000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Date d'expérience		Heure			Température de la salle		
13 Mars 2017		15h00-15h45			19 °C		
Q_F (cm ³ /min)	T_{Fe}	T_{Ce}	T_{Fm}	T_{Cm}	T_{Fs}	T_{Cs}	
500	18	68	40	66	56	63	
1000	17	66	31	63	46	58	
1500	17	63	27	59	40	54	
2000	17	61	25	57	32	53	
2500	17	60	23	56	30	51	

Tableau B.40 : les valeurs de la température chaude et froide pour le débit d'eau chaude

$Q_C = 4000 \text{ cm}^3/\text{min}$ et pour $T_C = 70^\circ\text{C}$.

Résumé

Le présente mémoire consiste à étudier les caractéristiques des échangeurs de chaleur de façon générale (principe de fonctionnement, types d'écoulement, types de contacts, problèmes de fonctionnement, aussi la présentation de ces différents types avec leurs conception, la méthode de calcul existant (ΔTLM), et plus précisément nous avons traité le type où l'échangeur est tubulaire).

Le bilan thermique nous a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres physiques des fluides et l'évolution de la température de sortie du fluide le long de l'échangeur en utilisant même fluide à température différents. Les résultats des cette étude expérimentale montre que une légère différence dans les températures de sortie de l'eau froide ainsi que Les valeurs de ΔTLM et le coefficient global de transfert de chaleur U sont les plus élevé dans le cas de la configuration contre-courant.

Abstract:

In this study deals with the general characteristics of heat exchangers (principle of operation, flow types ,contacts types, operating problems, presentation of these types with their design, existing calculation method (ΔTLM), and more precisely we have treated the type where the exchanger is tubular).

The thermal balance allowed us to highlight the influence of the physical parameters of the fluids and the evolution of the temperature of exit of the fluid along the exchanger using same fluid at different temperatures. The results of this experimental study show that a slight difference in the cold-water outlet temperatures as well as the ΔTLM values and the overall heat transfer coefficient U are highest in the case of the counter-current configuration.