

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية 1

Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de Génie des Procédés

Mémoire de Master 2

En Génie chimique

**Etude et réalisation d'un échangeur
de chaleur : comparaison et efficacité**

Réalisé par:

GUENAOUI Dounia
BRAHMI Asma

Proposé par :

M. CHANANE Kamal.

Année universitaire

2021/2022

Résumé

Ce travail consiste à réaliser et à étudier un échangeur de chaleur tubulaire coaxial et le comparer avec un autre échangeur de même type en vue de déterminer son efficacité pour les deux modes de fonctionnement à co-courant et contre-courant. Pour cela un montage expérimental est mis en place pour mesurer les températures d'entrée et de sortie et calculer les flux de chaleur et l'efficacité. Une feuille de calcul sur le logiciel Microsoft Excel est établie pour faciliter le travail. Nous nous sommes intéressés aux pertes de chaleur sur la paroi externe. Des mesures à l'aide d'un thermomètre infrarouge ont révélé des pertes allant jusqu'à 30% du flux échangé par les deux fluides.

Mots clés : Echangeur de chaleur, Efficacité, Pertes de chaleur.

ملخص

يتكون هذا العمل من دراسة مبادل حراري أنبوبي متحد المحور ومقارنته بمبادل آخر من نفس النوع من أجل تحديد كفاءته في وضعي التشغيل التيار المشترك والتيار المعاكس. لهذا ، تم إعداد تجريبي لقياس درجات حرارة المداخل والمخارج وحساب تدفقات الحرارة والكفاءة. تم إنشاء جدول بيانات على برنامج Microsoft Excel لتسهيل الحساب. التبديد الحراري على السطح الخارجي للمبادل الحراري كشفنا عنه بعد القياسات باستخدام مقياس حرارة بالأشعة تحت الحمراء الذي أظهر تبديد يصل إلى 30% من التدفق المتبادل.

الكلمات المفتاحية: المبادل الحراري ، الكفاءة المبادل الحراري، التبديد الحراري.

Abstract :

This work consists in realizing and studying a coaxial tubular heat exchanger and comparing it with another exchanger of the same type in order to determine its efficiency for the two modes of co-current and counter-current operation. For this, an experimental board is set up to measure the inlet and outlet temperatures and calculate the heat flows and efficiency. A spread sheet on Microsoft Excel software is established to facilitate the work. We were interested in the heat losses on the external wall. Measurements using an infrared thermometer revealed losses of up to 30% of the flux exchanged by the two fluids.

Keywords: heat exchanger, Efficiency, Heat losses.

Remerciements

Nous remercions « ALLAH » Le Tout Puissant de nous avoir donné la santé, volonté et le courage d'accomplir ce modeste travail.

Au terme de ce travail présenté dans ce mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master(2),

Nous voudrions d'abord remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail, tous les enseignants du département de génie des procédés pour leur patience et leur volonté et tout le personnel administratif et technique.

Ce travail ne serait pas aussi riche sans l'aide et l'encadrement de **Mr CHANANE Kamel**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour son aide pratique, sa patience et ses encouragements tout au long de ce travail de recherche.

Enfin, nous sommes tenons à remercier vivement nos familles ainsi que nos proches pour leur soutien.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.
Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A mes sœurs, et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments
d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement
supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la
vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de
succès.*

A tous ceux que j'aime.

Merci !

Dounia

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier Le Bon DIEU dem'avoir donné la force, le courage et la volonté.

Je tiens à Dédier cet humble travail à :

**** A ma chère mère ****

Qui a toujours été une âme et un soutien à chaque étape de ma vie, elle a tout mon amour et mes remerciements.

**** A mon cher père ****

Pour le gout à l'effort qu'il a suscité en moi.

**** A mon mari ****

Pour tout l'encouragement, le respect, l'amour et le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce travail.

À mes sœur « Zaho » et« Naima».

À mes frères «faycel », « Imed »et «Adem ».

Et toutes celles et ceux qui m'aiment et que J'aime aussi.

Asma

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités et revue bibliographique

I.1. Introduction	2
I.2. Définition d'un échangeur de chaleur	2
I.3. Fonctions des échangeurs de chaleur	3
I.4. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur	3
I.5. Matériaux applicables aux échangeurs de chaleur	4
I.6. Types classiques des échangeurs de chaleur	4
I.6.1. Critères de classification des échangeurs	4
a) Classification selon le mode de circulation	5
b) Classification suivant la nature de matériau de la paroi d'échange :	6
c) Classification selon le type d'appareillage :	6
I.7. Etude d'un échangeur tubulaire	8
I.7.1. Le principe de l'échangeur tubulaire	10
I.7.2. Utilisation des échangeurs tubulaires	10
I.8. Étude d'un échangeur à plaques	11
I.8.1. Principe de fonctionnement	11
I.8.2. Structure d'un échangeur à plaques	12
I.8.3. Type des échangeurs à plaques	13
a) Échangeurs à surface primaire :	13
b) Échangeurs à plaques et joints :	13
c) Échangeur Pack inox :	14
I.8.4. Utilisations des échangeurs à plaques	14
I.9. Autres types d'échangeurs	15
I.10. Avantages et inconvénients d'un échangeur à plaques	15
I.10.1. Les avantages	15
I.10.2. Les inconvénients	15

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1. Introduction	16
II.2. Matériels	16
II.3. Mode opératoire	17
II.2. Méthodes de calcul des échangeurs	18
II.2.2. Grandeurs thermiques	18
a) Flux de chaleur :	19
b) La chaleur :	19
c) Conductivité thermique :.....	19
II.2.3. Grandeurs physiques	20
a) Viscosité (μ) :	20
b) Débit :	20
II.2.4. Nombre de Reynolds	20
II.2.5. Prandtl :	21
II.2.6. Nombre de Nusselt	21
II.2.7. L'étude des échangeurs	22
a) Calcul du coefficient global de transfert thermique U :.....	22
b) Calcul de ΔTLM :	23
II.2.8. Les modes d'écoulement	23
II.2.9. Échangeur de chaleur tubulaire en verre	25
II.2.10. Échangeur de chaleur tubulaire en cuivre	28

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.1. Etude l'efficacité des échangeurs	31
III.1.1. Echangeur en verre à contre-courant	31
III.1.2. Echangeur en verre co-courant.....	32
III.1.3. Echangeur en cuivre à contre-courant	33
III.1.4. Echangeur en cuivre co-courant	34
III.2. Etudes des coefficients d'échange global	34
III.2.1. Coefficient global de l'échangeur en verre	34
III.2.1. Coefficient global de l'échangeur en cuivre	35
III.3. Etudes des pertes extérieures de l'échangeur	36
III.4. Modélisation des échangeurs sur Excel	38
Conclusion Générale	40

Liste des figures

	Page
Figure I.1: Echangeur de Chaleur	2
Figure I.2: Principe de fonctionnement d'un échangeur	3
Figure I.3 : Échange de chaleur entre deux fluides dans un échangeur	4
Figure I.4 : Circulation à contre-courant	5
Figure I.5: Circulation à co-courant	5
Figure I.6 : Circulation à courant croisé	5
Figure I.7 : Schéma et photographie d'un échangeur à double tubes	6
Figure I.8 : Schéma et photographie d'un échangeur à plaques	7
Figure I.9 : Les différents types d'échangeurs tubulaires	8
Figure I.10 : Echangeur monotube	9
Figure I.11 : Échangeur coaxial cintré	9
Figure I.12: Échangeur à plaques	11
Figure I.13: Schéma d'un échangeur à plaques avec écoulement des fluides	12
Figure I.14: Schéma de la structure d'un échangeur à plaques	12
Figure I.15: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire	13
Figure I.16: Échangeur à plaques et joints	13
Figure I.17 : Échangeur Pack inox	14
Figure II.1 : thermomètre infrarouge	16
Figure II.2 : thermomètre digital	16
Figure II.3 : Bain marie (20 à 100°C)	17
Figure II.4: Schéma du montage expérimental de l'installation de l'échangeur en verre	18
Figure II.5 : Schéma de l'installation de l'échangeur en cuivre	18
Figure II.6 : Évolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant	24
Figure II.7 : Évolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre-courant	24
Figure III.1: Schéma de mesure des températures à la paroi extérieur des échangeurs	36
Figure III.2: Variation de la température de la paroi externe sur la longueur de l'échangeur pour l'échangeur en verre	37
Figure III.3: Variation de la température de la paroi externe sur la longueur de l'échangeur pour l'échangeur en cuivre	38
Figure III.4: Extrait de la feuille de calcul Excel pour le calcul de l'échangeur de chaleur	39

Liste des tableaux

	Page
Tableau I.1: Avantages et inconvénients d'un échangeur tubulaire	10
Tableau I.2: Composants essentielles d'un échangeur de chaleur	12
Tableau III.1: Résultats de l'étude de l'échangeur en verre à contre-courant	32
Tableau III.2: Résultats de l'étude de l'échangeur en verre à co-courant	32
Tableau III.3: Résultats de l'étude de l'échangeur en cuivre à contre-courant	33
Tableau III.4: Résultats de l'étude de l'échangeur en cuivre à co-courant	34
Tableau III.5: Coefficient global de l'échangeur tubulaire en verre pour les deux modes d'écoulement	34
Tableau III.6: Coefficient global de l'échangeur tubulaire en cuivre pour les deux modes d'écoulement	35
Tableau III.7: Variation de la température de paroi en fonction de la longueur de l'échangeur	36

Nomenclature

Symboles	Significations	Unité
h_1	Coefficient d'échange convectif du fluide chaud	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
h_2	Coefficient d'échange convectif du fluide froid	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
U	Le coefficient d'échange global	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
λ_{verre}	La conductivité thermique de verre	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
λ_{cuivre}	La conductivité thermique de cuivre	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
C_p	La capacité thermique spécifique de l'eau	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}]$
m	Le débit volumique	$[\text{m}^3/\text{h}]$
\dot{m}	Le débit massique	$[\text{kg}/\text{h}]$
ν	La viscosité cinématique	$[\text{m}^2/\text{s}]$
Φ	Le flux de chaleur	$[\text{J}/\text{h}]$
S	La surface	$[\text{m}^2]$
S	L'aire de la section de passage du fluide	$[\text{m}^2]$
d_h	Le diamètre hydraulique	$[\text{m}]$
$d_{\text{int}} (d_1)$	Le diamètre intérieur du tube	$[\text{m}]$
T_c	La température du fluide chaud	$[^\circ\text{C}]$
T_f	La température du fluide froid	$[^\circ\text{C}]$
P	Périmètre mouillé	$[\text{m}]$
L	La longueur	$[\text{m}]$
ΔT_{LM}	La différence de température	$[^\circ\text{C}]$
T_{1s}	La température de sortie du fluide chaud	$[^\circ\text{C}]$
T_{2s}	La température de sortie du fluide froid	$[^\circ\text{C}]$

T_{1e}	La température d'entrée du fluide chaud	[°C]
T_{2e}	La température d'entrée du fluide froid	[°C]
E	L'efficacité	(°/°)

Nombres sans dimensions :

Re : Nombre de Reynolds.

Pr : Nombre de Prandtl.

Nu : Nombre de Nusselt.

Indices et exposant :

c : chaud.

f : froid.

1 : entrée.

2 : sortie.

Introduction générale

Introduction générale

L'échangeur de chaleur est un appareil thermique de grande importance dans les installations thermiques et énergétiques. Il permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans contact direct entre les deux. Le même fluide peut conserver son état physique liquide ou gazeux, ou se présenter successivement sous les deux phases.

Sans conteste les échangeurs de chaleur occupent une place primordiale et indispensable dans tous les systèmes thermiques, on estime que presque toute l'énergie thermique transite au moins une fois par un échangeur de chaleur.

L'efficacité des échangeurs contribue à la réduction de la consommation de l'énergie et de fait de la consommation des combustibles comme le pétrole ou le gaz naturel.

Problématique : peut-on réduire les émissions de GES en augmentant l'efficacité des échangeurs de chaleur ?

La production de la chaleur par combustion est responsable des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. L'augmentation de l'efficacité d'un échangeur réduit considérablement les émissions de gaz à effet de serre.

Notre travail consiste à étudier un échangeur de chaleur tubulaire coaxial en verre et un autre échangeur en cuivre de même dimension. Pour cela nous avons réalisé les échangeurs et nous les avons mis à l'épreuve sur un montage expérimental simple.

Notre mémoire se divise en 3 chapitres :

Nous avons abordé dans le premier chapitre l'aspect technologique des échangeurs en génie chimique, formes, types, utilisations et performances.

Dans le deuxième chapitre nous avons montré le matériel utilisé et les méthodes de calcul avec des exemples en écoulement à co-courant et à contre-courant.

Enfin dans le troisième chapitre nous avons compilés les résultats trouvés sur les deux types d'échangeurs pour les deux marches ; co-courant et contre-courant .Pour terminer ce travail et avec un thermomètre infrarouge, des mesures sur la paroi extérieure ont été prises pour étudier les pertes de chaleur avec le milieu extérieur.

CHAPITRE I :

Généralités et revue bibliographique

I.1. Introduction

Dans un procédé industriel, les échangeurs de chaleur sont un élément essentiel de dans le chauffage ou le refroidissement des flux de matières et la maîtrise de l'énergie. La majorité de l'énergie thermique utilisée dans un procédé passe par les échangeurs de chaleur. Pour une application donnée, l'échangeur de chaleur dépend de plusieurs paramètres, la température et la pression des fluides, leurs propriétés thermiques, la corrosivité, la maintenance des équipements et leur utilisation. Dans ce chapitre nous allons fournir des informations générales sur les différents types d'échangeurs de chaleur, en donnant leurs caractéristiques et leur domaine d'utilisation. [1]

I.2. Définition d'un échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est un dispositif conçu pour transférer de la chaleur entre deux ou plusieurs fluides. L'équipement chauffe souvent un fluide de procédé et refroidit l'autre sans contact entre les deux.

Les échangeurs de chaleur permettent l'échange de chaleur entre deux liquides, deux gaz ou un gaz et un liquide. Dans le cas d'un transfert de chaleur accompagné d'un changement de phase, la source de chaleur peut remplir alors une fonction d'évaporation ou de condensation du flux de matière. [1]



Figure I.1 : Echangeur de chaleur. [2]

I.3. Fonctions des échangeurs de chaleur

Un échangeur est un dispositif permettant d'abaisser ou d'augmenter la température d'un fluide ou de modifier son état physique. Dans les procédés pétrochimiques, changements de température ou d'état d'un liquide sont nécessaires pour séparer, distiller, stocker et transporter ce liquide. Pour ce faire, nous devons ajouter ou retirer une certaine quantité de chaleur à travers le dispositif de transfert de chaleur. Échangeur, condenseur, réchauffeur. [3]

- **Échangeur** : Il permet le transfert de calories d'un liquide à un autre sans modifier l'état de ces fluides.
- **Condenseur**: Il permet de changer l'état du liquide : par exemple passage de l'état liquide à l'état gazeux.
- **Rebouilleur** : Les échangeurs de chaleur sont utilisés pour chauffer ou vaporiser des liquides.
- **Réchauffeur** : Il permet d'augmenter la température du liquide ou du solide destiné à être utilisé dans le système tel que le chauffage au mazout pour une meilleure circulation dans les tuyaux, le chauffage du gaz avant d'entrer dans la turbine.
- **Refroidisseur** : Il refroidit un gaz ou un liquide après son utilisation par exemple moins les calories stockées par l'huile de lubrification de la motrice chaleur

I.4. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur

En principe, pour les échangeurs les plus couramment utilisés dans l'industrie, deux fluides circulent dans un espace séparé par une paroi ou chicane à faible inertie thermique à travers laquelle s'effectue le processus d'échange par conduction. En effet, la chaleur que l'un des fluides transfère aux parois par convection le long de la surface de contact est transférée par conduction et à l'autre fluide par convection le long de l'autre surface. [4]

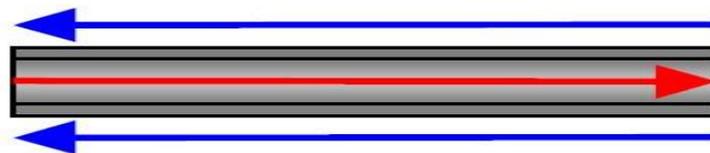


Figure I.2: Principe de fonctionnement d'un échangeur. [3]

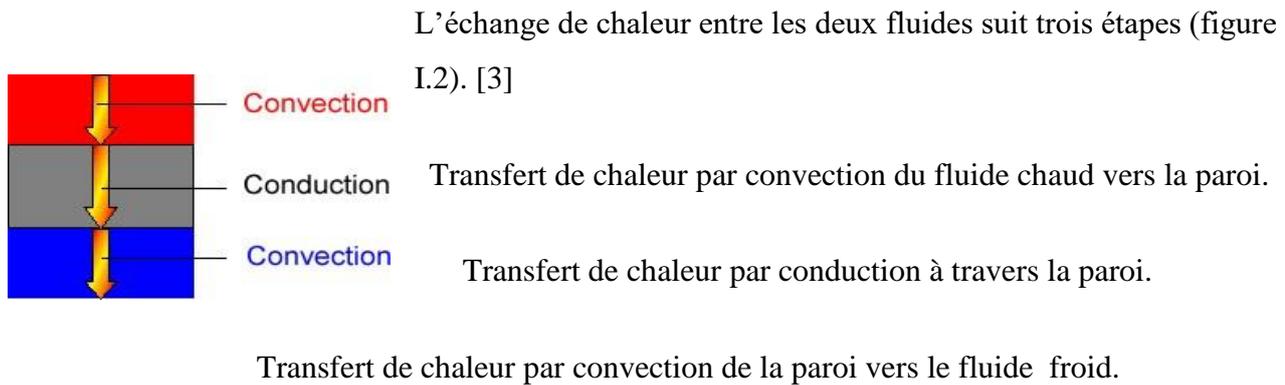


Figure I.3 : Échange de chaleur entre deux fluides dans un échangeur. [3]

I.5. Matériaux applicables aux échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont fabriqués à partir de divers matériaux. Le choix des matériaux pour les différentes parties de l'échangeur dépend d'abord des conditions d'utilisation (Température, pression, corrosivité du milieu). Les températures de fonctionnement des échangeurs se situent généralement dans la plage d'utilisation de l'acier au carbone (entre 30° et 475°C). [5]

Les matériaux utilisés pour fabriquer les tuyaux sont généralement métalliques (acier, laiton). Les céramiques se développent dans des échangeurs où transitent des fluides à haute température. Des tubes en plastique (souvent de très petit diamètre) sont également utilisés, soit en faisceaux, soit noyés dans de fines feuilles qui jouent le rôle de raidisseurs.[6]

I.6. Types classiques des échangeurs de chaleur

Afin de résoudre le problème de l'échange de chaleur, les utilisateurs sont confrontés à une variété de produits qui sont principalement divisés en échangeurs de chaleur à plaques et échangeurs de chaleur à calandre et à tube ou les échangeurs tubulaires.

I.6.1. Critères de classification des échangeurs

Il existe plusieurs critères pour classer les différents types d'échangeurs de chaleur, ce dernier peut être divisé dans les catégories suivantes :

a) Classification selon le mode de circulation

Une classification peut être établie, selon le sens relatif d'écoulement des deux fluides, puis on distingue [7] :

- **Circulation à contre-courant** : Dans ce cas, les deux fluides circulent en sens opposés, vers chaque côté de la paroi.

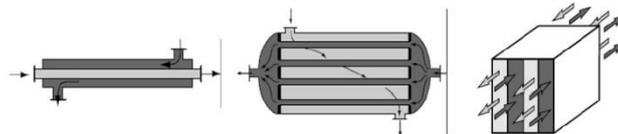


Figure I.4: Circulation à contre-courant. [7]

- **Circulation à co-courant (courant parallèle)** : Dans ce cas, les deux fluides circulent dans le même sens, vers chaque côté de la paroi.

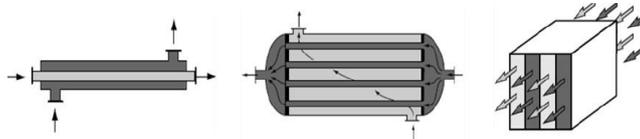


Figure I.5 : Circulation à co-courant. [7]

- **Circulation à courants croisés** : L'écoulement de deux liquides s'effectue dans deux directions perpendiculaires.

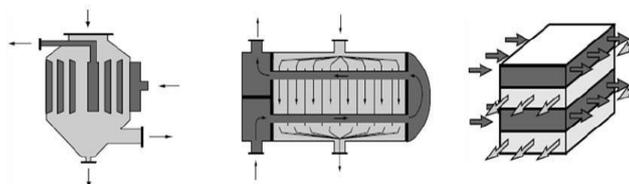


Figure I.6 : Circulation à courant croisé. [7]

- **Circulation à courants mixte** : Dans ce cas, les trois modes actuels précédents coexistent.

b) Classification suivant la nature de matériau de la paroi d'échange :

On retiendra deux types de paroi [1] :

- ❖ Échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux :
superalliages, métaux ou alliages réfractaires.
- ❖ Échangeurs de chaleur non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

c) Classification selon le type d'appareillage :

- Échangeur coaxial (double tubes) :

Ces échangeurs sont constitués d'éléments rectilignes de deux tubes concentriques réunis à leurs extrémités par des coudes. Les différents éléments sont tous assemblés par désassemblages rapides, et le remplacement des tubes est possible. Les problèmes de dilatation thermique et d'étanchéité entre le tube interne et le tube externe sont résolus en utilisant des joints de câble ou des joints toriques. [3]



Figure I.7 : Schéma et photographie d'un échangeur à double tubes. [3]

Ces tuyaux sont généralement en acier et les longueurs courantes sont de 3, 6, 4,5 ou 6 m. Les tubes en verre et les tubes en graphite sont également utilisés dans des applications spéciales. Ces échangeurs, utilisés dès l'origine, sont adaptés aux produits sales, aux faibles débits, hautes températures et pressions.

- Échangeur à plaques :

Un échangeur à plaques est constitué d'un ensemble de plaques métalliques embouties à travers lesquelles s'effectue un transfert de chaleur entre deux fluides. Les plaques : sont serrées

entre un bâti fixe et un bâti mobile. Elles sont positionnées et guidées par 2 barres support inférieure et supérieure, Un joint par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques. [3]

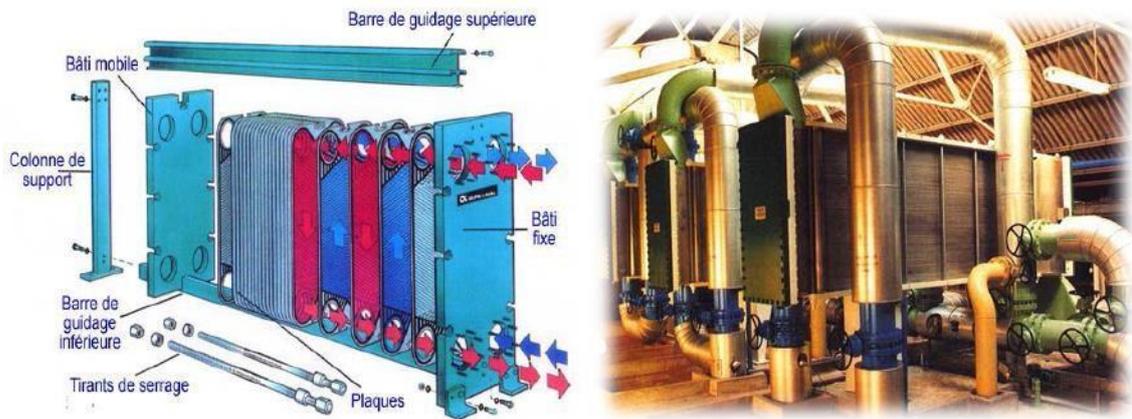


Figure I.8 : Schéma et photographie d'un échangeur à plaques. [3]

De tels échangeurs peuvent être très polyvalents et peuvent notamment permettre la circulation de liquides à très haute viscosité. De plus, une pression supérieure à 30 atm et une température supérieure à 150 °C ne peuvent pas être dépassées.

- Échangeur tubulaire :

Ils présentent plusieurs avantages : ils sont particulièrement faciles à fabriquer, relativement peu coûteux, faciles à entretenir, et surtout, ils peuvent être utilisés à des pressions et à des températures élevées. Leur durabilité et leur fiabilité compensent leur taille. [8]

On distingue le plus souvent les types suivants : [3]

- Échangeurs de chaleur monotubes dans lesquels le tube est placé dans un réservoir de stockage.
- Echangeur coaxial où le tube est le plus souvent plié.
- Les échangeurs à tubes et calandre existent sous 4 formes :

- 1- Echangeurs à tubes séparés : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant sont placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des plots.

- 2- L'échangeur comporte des tubes rapprochés : les tubes reposent les uns sur les autres par des rubans qui s'enroulent autour de certains d'entre eux.
- 3- Les échangeurs tubulaires à ailettes améliorent le facteur d'échange : lorsque l'un des fluides traversant l'échangeur s'avère moins caloporteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes autour du tube ou dans le tube est indispensable pour une résistance thermique totale incomplète car le fluide a le coefficient de transfert de chaleur le plus faible.
- 4- Les échangeurs de chaleur tubulaires et à calandre sont une calandre métallique entourant un faisceau de tubes : ils comportent une boîte de distribution, c'est-à-dire un dispositif qui distribue ou collecte le liquide aux extrémités des tubes.

Il peut s'agir de caissons fixes, de caissons flottants ou de tubes en U avec un caisson à chaque extrémité de l'échangeur. Les tubes peuvent être soutenus par des chicanes pour augmenter la vitesse du liquide dans le boîtier afin d'améliorer le taux de change. Pour cela, il faut trouver un compromis pour avoir simultanément un coefficient global de transfert de chaleur et une perte de charge acceptables.

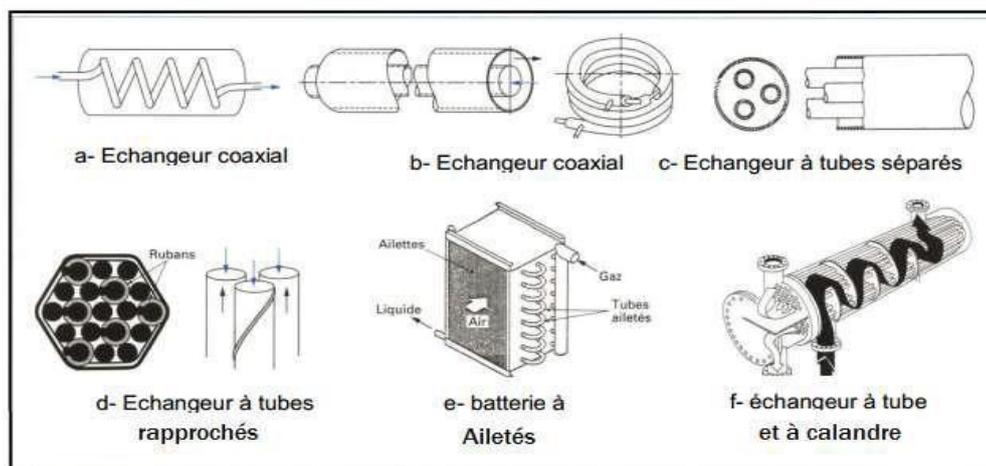


Figure I.9: Les différents types des échangeurs tubulaires. [1]

I.7. Etude d'un échangeur tubulaire

Les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On distingue trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée [9]:

- **Échangeur monotube:** Un tube général avec une forme d'une bobine est placé à l'intérieur d'un réservoir et à généralement la forme d'un serpent.

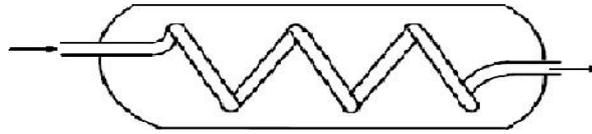


Figure I.10 : Échangeur monotube. [9]

- **Échangeur coaxial :** Dans cet échangeur de chaleur, les tubes doubles sont le plus souvent coudés, en général, du liquide chaud ou du liquide à haute pression circule à l'intérieur du tube.

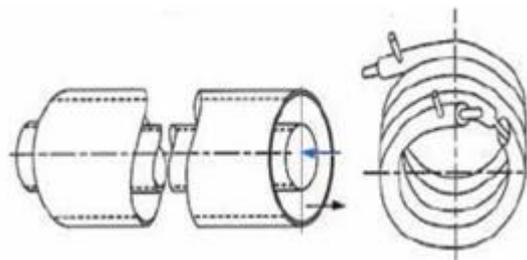


Figure I.11 : Échangeur coaxial cintré. [9]

- **Échangeur multitubulaire :** Peut exister sous trois formes:
 - 1- Échangeur à tubes séparés: À l'intérieur d'un grand tube est placé plusieurs petits tubes, maintenus écartés par des tampons, Aileron d'échange de tubes.
 - 2- Échangeur à tubes ailettes: Il comprend un faisceau de tuyaux, distribué dans des plaques, dans lesquelles la circulation liquide a un bon coefficient d'échange (liquide ou réfrigérant). Les liquides externes sont un gaz et des ailettes placées sur la surface extérieure des tubes pour améliorer l'échange.
 - 3- Tube échange et grille: Ils comprennent une poutre placée dans une enveloppe (calendrier). Les tubes maintenus par des plaques (perforées) agissent également comme cloisons pour le flux de circulation de liquide.

I.7.1. Le principe de l'échangeur tubulaire

L'échangeur tubulaire peut être considéré comme l'échangeur de chaleur le plus simple : il est constitué de deux tubes concentriques. Un fluide circule dans le tube tandis que le second fluide traverse l'espace entre les deux tubes. Facile à nettoyer ou à réparer, il est utilisé pour travailler avec des fluides à haute pression. Seul un échange de chaleur limité est autorisé et seulement une petite surface d'échange (jusqu'à 50 m²). [10]

Tableau I.1 :Avantages et inconvénients d'un échangeur tubulaire.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Grandes dimensions possibles. -Supporte des fluides avec une différence de température en entrée très importante. -Supporte des pressions très élevées. -Pertes de charge des fluides en circulation limitées. 	<ul style="list-style-type: none"> -L'échange thermique entre les deux fluides est correct mais les échanges à plaques offrent une meilleure efficacité énergétique. -Entretien difficile, notamment pour les échangeurs de très grandes dimensions.

I.7.2.Utilisation des échangeurs tubulaires

Les échangeurs de chaleur les plus simples que l'on puisse imaginer sont constitués de deux tubes coaxiaux : l'un des fluides circulant dans le tube central et l'autre dans l'espace annulaire, les deux fluides pouvant circuler dans le même sens ou en sens opposé. Il est très difficile d'obtenir de grandes surfaces d'échange avec cette configuration, même lors du soudage des tubes, sans aboutir à des dispositifs très encombrants. Il convient donc de disposer un faisceau de Tubes dans une enveloppe unique souvent cylindrique dite enveloppe, l'un des fluides circulant dans les tubes et l'autre à l'intérieur du logement autour des tubes. Dans ce type d'échangeur, des chicanes de formes diverses sont disposées principalement perpendiculairement à l'axe de la grille rendant le parcours du liquide à travers celle-ci plus long et plus tortueux, elles favorisent favorise les turbulences, ce qui a pour effet d'améliorer l'échange (mais aussi, malheureusement, pression croissante et décroissante).

Cette disposition est la plus couramment utilisée pour les échangeurs liquide-liquide. La compression maximale (surface d'échange par mètre cube) obtenue avec cette configuration est de l'ordre de $500\text{m}^2/\text{m}^3$. [11]

I.8. Étude d'un échangeur à plaques

L'échangeur à plaques est constitué d'un assemblage de plaques plissées indépendantes. Panneaux sont encastrés et serrés dans un cadre. Chaque paire de disques adjacents forme un canal, et deux fluides (produit et fluide caloporteur) alternent dans les canaux.

Des profils spéciaux sont utilisés pour augmenter la turbulence, augmentant ainsi le coefficient de convection. Les plaques sont équipées de joints pour éviter tout mélange de liquides. Un échangeur de chaleur à plaques est un dispositif qui permet de transférer de la chaleur entre deux fluides de températures différentes sans contact direct entre les fluides. Il s'agit de plaques en acier inoxydable qui assurent le transfert de chaleur d'un liquide à l'autre. [1]

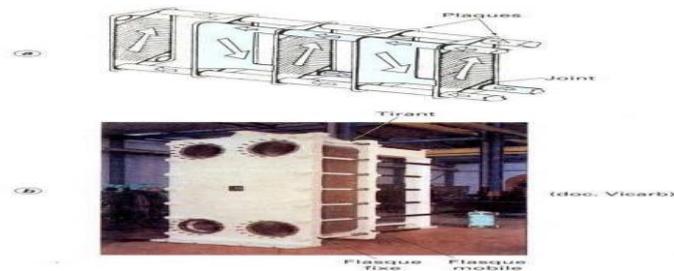


Figure I.12 : Échangeur à plaques. [1]

I.8.1. Principe de fonctionnement

Les échangeurs de chaleur à plaques sont constitués de plaques empilées et profilées qui ont des trous traversant et forment un groupe de fentes d'écoulement. Les canaux (créés par l'empilement des plaques) sont parcourus, à raison de moitié, par deux fluides participant à l'échange thermique.

Des canaux sont formés entre les plaques et les segments d'angle sont disposés de manière à ce que les deux supports passent par des canaux alternés. La chaleur est transférée à travers la plaque entre les canaux et un courant en amont est généré pour assurer une plus grande efficacité. Le sertissage des plaques crée un passage entre elles, soutenant chaque plaque contre les panneaux adjacents et augmentant la turbulence, résultant en un transfert de chaleur plus efficace. [1]

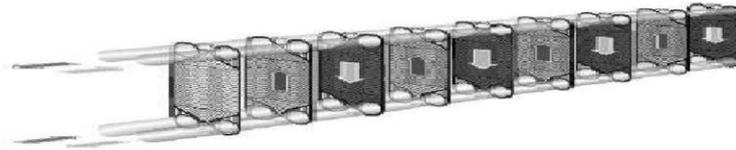


Figure I.13: Schéma d'un échangeur à plaques avec écoulement des fluides. [1]

I.8.2. Structure d'un échangeur à plaques

Le schéma ci-dessous illustre la structure de base d'un échangeur de chaleur à plaques. La réalisation finale est propre à chaque application [1] :

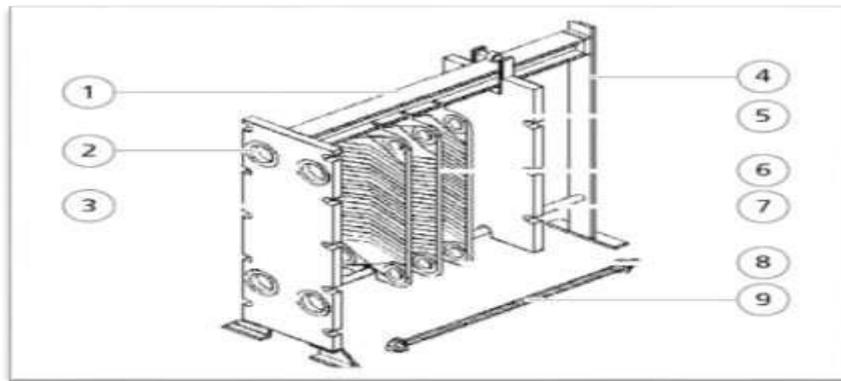


Figure I.14:Schéma de la structure d'un échangeur à plaques. [1]

Tableau I.2 :Composantes essentielles d'un échangeur de chaleur. [1]

N°	Pièce
1	Poutre de Support
2	Connexions
3	Plaque fixe
4	Colonne de Support
5	Plaque mobile
6	Plaques de l'échangeur
7	Barre de Guidage inférieure
8	Joints
9	Tirant

I.8.3. Types des échangeurs à plaques

a) Échangeurs à surface primaire :

L'échangeur de surface primaire est constitué de plaques ondulées, nervurées ou piquées. La conception du profil de la plaque peut être assez variée mais elle a toujours un double rôle puisque le favorise le transfert de chaleur et résiste à la pression en multipliant les points de contact. [1]



Figure I.15: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire. [1]

b) Échangeurs à plaques et joints :

La surface d'échange est alors constituée de plaques métalliques, munies de joints, maintenues entre elles par une entretoise entre les deux brides du, l'une fixe, l'autre mobile. [1]

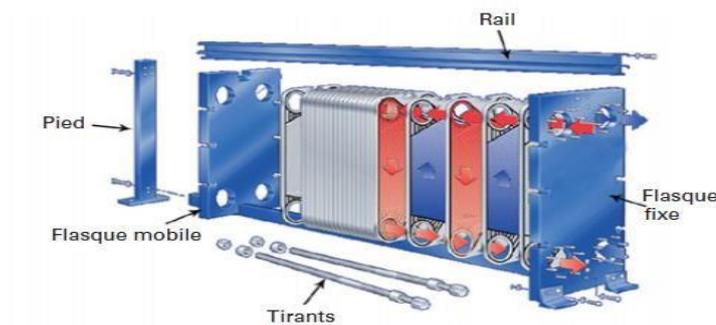


Figure I.16 : Échangeurs à plaques et joints. [12]

c) Échangeur Pack inox :

Il s'agit d'un grand échangeur de chaleur à plaques soudées. Le faisceau est constitué d'un empilement de plaques formées par l'explosion et introduites dans une plaque de calandre pouvant atteindre plus de 10 m de longueur. Cet échangeur peut fonctionner jusqu'à températures autour de 600°C et des pressions de 50 bars. [1]

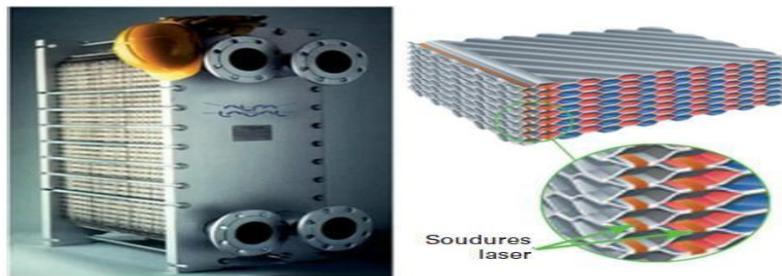


Figure I.17 : Échangeur Pack inox. [12]

I.8.4. Utilisations des échangeurs à plaques

- Ils sont largement utilisés pour certaines applications liquide-liquide (notamment dans les industries alimentaires). Dans le cas d'échangeurs gaz-liquide ou gaz-air, la faible densité de gaz conduit au maintien d'une perte de charge acceptable, le débit de transfert de gaz sera réduit par rapport à celui pratiqué pour du liquide.
- Diminuer, c'est aussi diminuer le coefficient de convection vers le liquide, ce qui nécessite, pour un même volume d'augmenter la surface d'échange.

Pour les échangeurs gaz-air, les surfaces d'échange très fréquemment utilisées sont constituées de plaques planes séparées par des ailettes sur celles-ci, les deux liquides circulant alternativement entre les plaques. Les ailettes permettent d'augmenter la surface d'échange et par leur disposition en une quelconque, créent une perturbation dans les écoulements qui favorise les turbulences et améliore ainsi les échanges thermiques.

Dans les échangeurs gaz-liquide, une surface d'échange avec différentes zones en contact avec les deux liquides est nécessaire. C'est pourquoi des batteries ou des radiateurs à tube à ailettes sont utilisés dans les voitures. [11]

I.9. Autres types d'échangeurs

Ce sont des échangeurs où le liquide chaud transfère une partie de son énergie au substrat. Mouvement discontinu, liquide chaud puis liquide froid, à travers un substrat permettant un échange de chaleur entre deux fluides. Ce type comprend un régénérateur, un échangeur matriciel rotatif et un échangeur statique ou à vannes. Ce sont des échangeurs compacts avec de grandes surfaces d'échange ; ils sont moins chers à surface égale et moins encombrés grâce au balayage entrelacé. D'autre part, le mouvement mécanique de la matrice ou du Jude vannes peut Provoquer un dysfonctionnement et un mélange partiel des liquides chauds et froids.

Nous distinguons [13]:

- Echangeurs régénérateurs rotatifs à matrice tournant.
- Echangeurs régénérateurs statiques (ou à valves).
- Echangeurs à caloducs.
- Echangeur liquide-liquide.
- Echangeurs lamellaires.
- Echangeurs à plaques brasées (liquide/gaz ou liquide/liquide).

I.10. Avantages et inconvénients d'un échangeur à plaques

I.10.1. Les avantages

- Coefficient de transfert de chaleur élevé.
- Facilité de l'adaption.
- Faible de coefficient d'encrassement.
- Faible à enlever, laver et réparer.
- Structure compacte, taille réduite et consommables réduits.
- Limite des pertes thermiques.

I.10.2. Les inconvénients

- Mauvaise étanchéité et facile à fuir.
- La pression d'utilisation est limitée.
- La résistance de l'écoulement est plus grande que la coque et le tube.
- La perte de charge du système peut être élevée.
- La voie d'écoulement est petite.

CHAPITRE II :

Matériels et méthodes

II.1. Introduction

Pour étudier les échangeurs en génie chimique, nous avons utilisé principalement du matériel de mesure de la température, des débits et des échangeurs. Nous avons également réalisé et étudié un échangeur tubulaire en cuivre ayant presque les mêmes dimensions que l'échangeur de verrerie de chimie.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le matériel utilisé et les méthodes de calcul dans les échangeurs tubulaires.

II.2. Matériels

Pour cette étude nous avons choisi :

- Un échangeur de chaleur tubulaire en verre borosilicate (40cm).
- Un échangeur de chaleur tubulaire en cuivre (40cm).
- Bain marie (20 à 100°C).
- Thermomètre digital (-50°C jusque à +300°C).
- Thermomètre infrarouge (-50°C jusque à +400°C).
- Tuyaux flexibles.
- Eprouvette gradué (1000 ml).
- Chronomètre.



Figure II.1. Thermomètre infrarouge.



Figure II.2. Thermomètre digital.



Figure II.3. Bain marie (20 à 100°C).

II.3. Mode opératoire

Pour réaliser une expérience sur le transfert de chaleur, nous avons besoin d'une source de chaleur fournie par un bain marie thermostat. Le bain recycle l'eau à une température constante réglable. Nous avons aussi besoin d'une source d'eau froide fournie par un robinet de paillasse. La source froide parvient à 18°C environ. La source chaude est réglable.

On commence par mesurer les débits des deux sources au moyen d'une éprouvette et un Chronomètre. On réalise l'échange de chaleur entre les deux fluides, le système se stabilise au bout de quelques minutes.

La source chaude passe par le tube interne et la source froide par le tube externe. Les mesures de température se font au moyen d'un thermomètre digital rapide aux entrées et aux sorties des deux fluides.

Les valeurs mesurées sont consignées dans des tableaux pour être exploitées après. Plusieurs essais sont nécessaires pour avoir des valeurs stables.

Nous avons également examiné des effets d'écoulement à l'entrée et à la sortie de l'échangeur en verre et nous avons également observé quelques phénomènes comme la formation des bulles ou des zones vides dans entre les parois.



Figure II.4. Schéma du montage expérimental de l'installation de l'échangeur en verre.

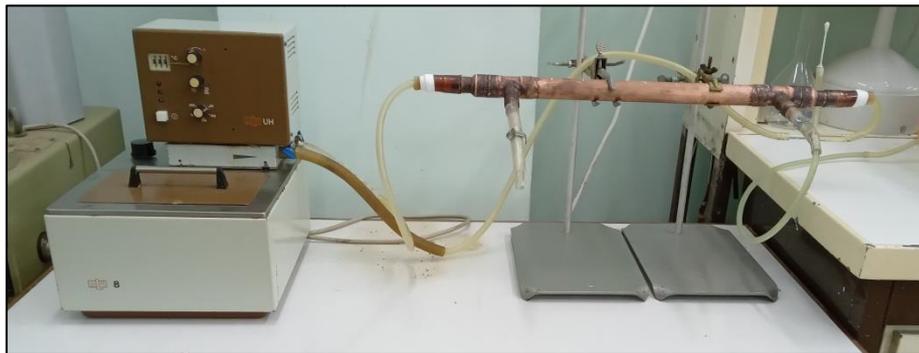


Figure II.5. Schéma de l'installation de l'échangeur en cuivre.

II.2. Méthodesde calcul des échangeurs

Un échangeur de chaleur est un dispositif qui permet le transfert de chaleur d'un liquide à un autre, ce transfert de chaleur s'effectuant par rayonnement, convection et conduction. Ils jouent un rôle très important dans les installations industrielles et augmentent l'efficacité. Pour cela, de bonnes procédures doivent être établies pour le calcul et le dimensionnement de cet appareil. Ce calcul nécessite l'utilisation de corrélations pour les calculs thermiques et hydrauliques. Dans ce chapitre, nous présenterons les calculs des échangeurs de chaleur.

II.2.2. Grandeurs thermiques

Pour bien expliquer le transfert de chaleur d'un milieu à un autre et, plus généralement, la conservation de la chaleur dans les systèmes isolés, il est nécessaire de définir certaines grandeurs physiques. Pour une quantité de matière donnée, l'apport d'une certaine quantité de chaleur provoque un changement de sa température ou un changement d'état de la matière. La température est une grandeur physique qui caractérise le niveau d'énergie de la matière. Ces différents concepts seront expliqués ci-dessous.

a) Flux de chaleur :

Le flux de chaleur qui traverse l'échangeur peut être calculé 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 lors de son passage dans l'échangeur.

$$\Phi = \dot{m}_c * C_{p_{eau}} (T_{1e} - T_{1s}) = \dot{m}_f * C_{p_{eau}} (T_{2s} - T_{2e}) \quad (II.1)$$

Où :

Φ : Le flux d'échange [J/h].

\dot{m}_c et \dot{m}_f : Les débits massiques de l'eau de côté chaud et côté froid [kg/h].

$C_{p_{eau}}$: La capacité calorifique de l'eau [J/Kg. °C].

T_{1s} , T_{1e} : Les températures à l'entrée et à la sortie de côté chaud [°C].

T_{2e} , T_{2s} : Les températures à l'entrée et à la sortie de côté froid [°C].

b) La chaleur :

La chaleur est une forme d'énergie (énergie de mouvement des molécules) qui va d'un point chaud (température plus élevée) à un point froid (température plus basse) [14].

c) Conductivité thermique :

La conductivité thermique (λ) est une caractéristique propre à chaque matériau, s'exprime en W/m.K. Il indique la quantité de chaleur transférée par conduction thermique :

- En 1 seconde.
- A travers $1m^2$ d'un matériau.
- Epais d'un 1m.
- Lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K ($1K = 1^\circ C$).

Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant.

$$\lambda = - 9,87.10^{-3} * T_{moy}^2 + 2,238.10^{-3} * T_{moy} + 0,5536 \quad (II.2)$$

II.2.3. Grandeurs physiques

a) Viscosité (μ) :

C'est la propriété d'un fluide qui tend à gêner son écoulement lorsqu'il est soumis à une force. Plus le fluide est visqueux (viscosité élevée), plus son mouvement est difficile [15].

$$V = 10^{-7} (-0,00360 * T_{\text{moy}} + 1,340) \quad (\text{II.3})$$

b) Débit :

C'est la quantité de liquide qui s'écoule ou s'écoule par unité de temps. Il existe deux types de débit, le débit massique [kg/s] et le débit volumique m [m³/s].

II.2.4. Nombre de Reynolds

Il caractérise le régime d'écoulement du fluide.

:

$$Re = \frac{V \cdot d_i}{\nu} \quad (\text{II.4})$$

Où :

V : La vitesse d'écoulement de l'eau [m/s].

$$V = \frac{m}{S} = \frac{m}{\pi \frac{d_{int}^2}{4}} \quad (m : \text{débit volumique [m}^3/\text{h}] ; S : \text{surface [m}^2])$$

d_i : Diamètre intérieur du tube intérieur [m].

ν : La viscosité cinématique de l'eau [(m²/s)].

$$V = 10^{-7} (-0,00360 * T_{\text{moy}} + 1,340)$$

- Pour le côté froid :

$$Re = \frac{V \cdot d_h}{\nu}$$

Où :

V : La vitesse d'écoulement de l'eau [m/s].

$$V = \frac{m}{s} = \frac{m}{(D_3^2 - D_2^2) \cdot \pi / 4}$$

d_h : Le diamètre hydraulique [m].

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{P} = \frac{4 (D_3^2 - D_2^2) \cdot \pi / 4}{(D_3 + D_2) \cdot \pi}$$

S : L'aire de la section de passage du fluide [m²].

P : Périmètre mouillé [m].

L'expérience REYNOLDS en fonction de l'écoulement dans un tube cylindrique met en évidence deux modes d'écoulement caractérisés par un paramètre (nombre de REYNOLDS).

Pour les faibles débits, ce mode est dit laminaire. Sinon, c'est turbulent.

- Régime laminaire :

Écoulements fluides parallèles, l'échange s'effectue entre couches d'origine moléculaire (conduction).

L'écoulement reste laminaire tant que le nombre de REYNOLDS reste inférieur à 5000.

- Régime turbulent :

L'écoulement est perturbé, le mouvement des particules fluides est aléatoire et tridimensionnel. Le mode d'écoulement est dit turbulent si le nombre de REYNOLDS atteint ou dépasse 5000. [16]

II.2.5. Prandtl :

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

$$Pr = 1,577 \cdot 10^{-3} * T_{moy}^2 - 0,261 * T_{moy} + 12,501 \quad (II.5)$$

II.2.6. Nombre de Nusselt

Ce nombre sans dimension indique l'importance relative du flux de chaleur réel par convection par rapport au flux de chaleur de conduction de référence pour le problème.

- Si le régime est turbulent :

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad \text{Avec : } n = 0,3 (T_{fluide} > T_{paroi}) \quad (II.6)$$

- Si le régime est laminaire :

$$Nu = 1,86 (Re \cdot Pr)^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{paroi}}\right)^{1/3} (II.7)$$

Où :

μ : La viscosité dynamique de l'eau calculé à $T_{\text{moy}} \text{ froid}$ [Pa.s].

μ_{Paroi} : La viscosité dynamique de l'eau calculé à $T_{\text{moy}} \text{ chaud}$ [Pa.s].

On suppose que le rapport $(\frac{\mu}{\mu_{\text{paroi}}})^{1/3} = 1$.

Le coefficient de transfert thermique coté chaud :

$$Nu = \frac{h_1 \cdot \text{dint}}{\lambda} h_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{\text{dint}}$$

Le coefficient de transfert thermique coté froid :

$$Nu = \frac{h_2 \cdot dh}{\lambda} h_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{dh}$$

II.2.7. L'étude des échangeurs

Dans l'étude des échangeurs, le but est toujours d'obtenir une certaine capacité d'échange, avec la plus petite surface d'échange possible et le moins de perte de charge possible, c'est-à-dire le coût de l'échangeur. Des contraintes de taille, de poids, de corrosion, de standardisation apparaissent, ce qui fait que les paramètres disponibles sont souvent bien plus que les équations, certaines exigences d'ordre technologique ou économique. L'étude complète d'un dispositif d'échange nécessite donc différents domaines (thermique, mécanique des fluides, technologie, etc.).

Dans notre cas, nous n'avons abordé que l'aspect thermique, c'est-à-dire l'évaluation de l'efficacité thermique des échangeurs de chaleur.

c) Calcul du coefficient global de transfert thermique U :

On considère deux fluides (chaud et froid) circulant de part et d'autre d'une paroi propre le flux de chaleur, s'écoulera en rencontrant trois diverses résistances en série :

- Résistance au transfert par convection entre le fluide chaud et la paroi.
- Résistance au transfert par conduction à travers la paroi.
- Résistance au transfert par convection entre la paroi et le fluide froid. [17]

On exprime alors la résistance globale au transfert thermique entre les deux fluides par la somme des trois diverses résistances en série :

$$U = \frac{1}{\frac{r_2}{h_1 \cdot r_1} + \frac{r_2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (\text{II.8})$$

Où :

U : Le coefficient global de transfert thermique [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$].

r_1, r_2 : Les rayons intérieurs et extérieurs de l'échangeur [m].

h_1, h_2 : Les coefficients de transfert thermique par convection de côté chaud et côté froid [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$].

λ : La conductivité thermique [$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$].

d) Calcul de ΔTLM :

La Différence de Température Moyenne Logarithmique représentant la moyenne logarithmique (ΔT) entre l'entrée et la sortie de l'échangeur ($^\circ\text{C}$).

$$\text{Co-courant : } \Delta\text{TLM} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln\left(\frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}\right)} = \frac{(T_{1e} - T_{2e}) - (T_{1s} - T_{2s})}{\ln\left(\frac{T_{1e} - T_{2e}}{T_{1s} - T_{2s}}\right)} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Contre- courant : } \Delta\text{TLM} = \frac{(T_{1e} - T_{2s}) - (T_{1s} - T_{2e})}{\ln\left(\frac{T_{1e} - T_{2s}}{T_{1s} - T_{2e}}\right)} \quad (\text{II.10})$$

Où :

ΔT_e : Différence de température entre les deux fluides (l'eau chaud et froid) à l'extrémité 1 de l'échangeur [$^\circ\text{C}$].

ΔT_s : Différence de température entre les deux fluides (l'eau chaud et froid) à l'extrémité 2 de l'échangeur [$^\circ\text{C}$].

II.2.8. Les modes d'écoulement

➤ Écoulement des deux fluides parallèles et de même sens :

Il s'agit d'échangeurs dits à **co-courants** où la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Les températures des fluides évoluent pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase, auquel cas sa température reste constante.

La Figure II.6 montre l'évolution qualitative de ces températures le long d'un échangeur de chaleur tubulaire à co-courants très simple. La longueur de l'échangeur a été portée en abscisse (4 - 5). Les températures sont repérées à l'aide d'indices «e» signifiant entrée et «s» sortie, «1» indiquant un fluide chaud et «2» le fluide froid. [18]

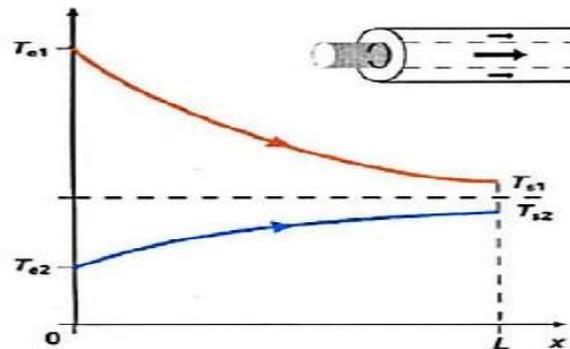


Figure II.6: Évolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à co-courant. [18]

➤ Écoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires :

Il s'agit d'échangeurs à **contre-courants** où la température de sortie du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est la plus favorable pour l'échange thermique.

L'avantage de l'échangeur à contre-courants sur l'échangeur à co-courants est l'exigence que pour un même flux de chaleur, la surface d'échange soit plus petite. [18]

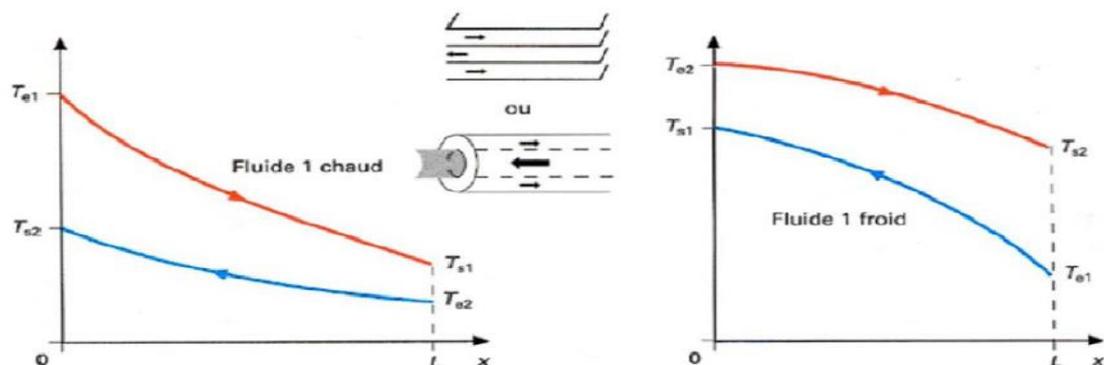


Figure II.7 : Évolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre-courants. [18]

II.2.9. Échangeur de chaleur tubulaire en verre

Exemple de calcul de l'échangeur en verre :

1) Estimation du coefficient de transfert thermique coté chaud h_1 :

- **Reynolds**

$$T_{\text{moy}} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{37 + 26}{2} = \mathbf{31,5^\circ\text{C}}.$$

$$V = \frac{m}{\pi \frac{d_{\text{int}}^2}{4}} = \frac{120 \cdot 10^{-3} / 3600}{\pi \frac{(20,9 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = \mathbf{0,097\text{m/s}}.$$

$$V = 10^{-7} (-0,00360 * 31,5 + 1,340) = \mathbf{8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}}.$$

D'après l'équation de « Reynolds », on trouve :

$$\text{Re} = \frac{0,097 (20,9 \cdot 10^{-3})}{8 \cdot 10^{-7}}$$

Re = 2538. < 5000 : Le régime est donc laminaire.

- **Prandtl**

$$\text{Pr} = 1,577 \cdot 10^{-3} * 31,5^2 - 0,261 * 31,5 + 12,501$$

$$\mathbf{\text{Pr} = 5,844.}$$

- **Nusselt**

$$\text{Nu} = 1,86 (2538 * 5,844)^{1/3} \left(\frac{2,55 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-2}} \right)^{1/3}$$

$$\mathbf{\text{Nu} = 17,086.}$$

On calcul λ pour déterminer h_1 :

$$\lambda = -9,87 \cdot 10^{-3} * 31,5^2 + 2,238 \cdot 10^{-3} * 31,5 + 0,5536 = \mathbf{0,624\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

$$h_1 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d_{\text{int}}} = \frac{17,086 * 0,624}{(20,9 \cdot 10^{-3})}$$

$$\mathbf{h_1 = 510,20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

2) Estimation du coefficient de transfert thermique coté froid h_2 :

- **Reynolds**

$$T_{\text{moy}} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{17 + 25}{2} = \mathbf{21^\circ\text{C}}.$$

$$V = \frac{m}{(D_3^2 - D_2^2) \cdot \pi / 4} = \frac{120 \cdot 10^{-3} / 3600}{(25,85^2 - 23,3^2) \cdot 10^{-6} \cdot \pi / 4} = \mathbf{0,339\text{m/s}}.$$

$$d_h = \frac{4(D_3^2 - D_2^2) \cdot \pi / 4}{(D_3 + D_2) \cdot \pi} = \frac{4(25,85^2 - 23,3^2) \cdot 10^{-6} \cdot \pi / 4}{(25,85 + 23,3) \cdot 10^{-3} \cdot \pi} = \mathbf{2,55 \cdot 10^{-3} m.}$$

$$V = 10^{-7} (-0,00360 \cdot 21 + 1,340) = \mathbf{9,63 \cdot 10^{-7} m^2/s.}$$

D'après l'équation de « Reynolds », on trouve :

$$Re = \frac{0,339 (2,55 \cdot 10^{-3})}{9,63 \cdot 10^{-7}}$$

Re = 897. < 5000 : Le régime est donc laminaire.

- **Prandtl**

$$Pr = 1,577 \cdot 10^{-3} \cdot 21^2 - 0,261 \cdot 21 + 12,501$$

$$\mathbf{Pr = 7,715.}$$

- **Nusselt**

$$Nu = 1,86 (897 \cdot 7,715)^{1/3} \left(\frac{2,55 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-2}} \right)^{1/3}$$

$$\mathbf{Nu = 6,572.}$$

Calcul λ pour déterminer h_2 :

$$\lambda = \mathbf{0,601 W/m \cdot ^\circ C.}$$

$$h_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h} = \frac{6,572 \cdot 0,601}{(2,55 \cdot 10^{-3})}$$

$$\mathbf{h_2 = 169,40 W/m^2 \cdot ^\circ C.}$$

3) Calcul de flux :

$$\Phi = \dot{m}_c \cdot C_{p_{eau}} (T_{1e} - T_{1s}) = \dot{m}_f \cdot C_{p_{eau}} (T_{2s} - T_{2e})$$

La masse volumique de l'eau : - chaud = 995,09 kg/m³.

- froid = 997,86 kg/m³.

La capacité calorifique de l'eau :- chaud = 4178 J/Kg. °C.

- froid = 4181 J/Kg. °C.

$$\Phi_C = \dot{m}_c * C_{p_{\text{eau}}} (T_{1c} - T_{1s}) = 120 \cdot 10^{-3} * 995,09 * 4178 \quad (37- 26)$$

$$\Phi_C = \mathbf{5487,88 \text{ kJ/h.}}$$

$$\Phi_f = \dot{m}_f * C_{p_{\text{eau}}} (T_{2s} - T_{2e}) = 120 \cdot 10^{-3} * 997,86 * 4181 (25 - 17)$$

$$\Phi_f = \mathbf{4005,17 \text{ kJ/h.}}$$

4) Calcul de Coefficient global :

$$U = \frac{1}{\frac{r_2}{h_1 \cdot r_1} + \frac{r_2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda_{\text{verre}}} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{\frac{23,3}{510,20 \cdot 20,9} + \frac{23,3/2}{1000} \cdot \ln\left(\frac{23,3}{20,9}\right) + \frac{1}{169,40}}$$

$$U = \mathbf{109,36 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C.}}$$

5) Calcul de ΔT_{LM} :

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{1e} - T_{2s}) - (T_{1s} - T_{2e})}{\ln\left(\frac{T_{1e} - T_{2s}}{T_{1s} - T_{2e}}\right)} = \frac{(37 - 25) - (26 - 17)}{\ln\left(\frac{37 - 25}{26 - 17}\right)}$$

$$\Delta T_{LM} = \mathbf{10,71 \text{ °C.}}$$

II.2.10. Échangeur de chaleur tubulaire en cuivre

On fait les mêmes étapes de calculs comme l'échangeur de verre, on trouve :

1) Estimation du coefficient de transfert thermique coté chaud h_1 :

- **Reynolds**

$$T_{\text{moy}} = 31^\circ\text{C}.$$

$$V = 0,099 \text{ m/s}.$$

$$V = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}.$$

D'après l'équation de « Reynolds », on trouve :

$$Re = \frac{0,099(18,9 \cdot 10^{-3})}{8 \cdot 10^{-7}}$$

Re = 2339. < 5000 : Le régime est donc laminaire.

- **Prandtl**

$$Pr = 1,577 \cdot 10^{-3} * 31^2 - 0,261 * 31 + 12,501$$

$$Pr = 5,925.$$

- **Nusselt**

$$Nu = 1,86 (2339 * 5,925)^{1/3} \left(\frac{18,9 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-2}} \right)^{1/3}$$

$$Nu = 16,153.$$

Calcul de λ pour déterminer h_1 :

$$\lambda = 0,63 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$h_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{int}} = \frac{16,153 * 0,623}{(18,9 \cdot 10^{-3})}$$

$$h_1 = 532,42 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

2) Estimation du coefficient de transfert thermique coté froid h_2 :

- **Reynolds**

$$T_{\text{moy}} = 24,75 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$V = 0,089 \text{ m/s}.$$

$$d_h = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

$$V = 9,63 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}.$$

D'après l'équation de « Reynolds », on trouve :

$$Re = \frac{0,089(7,65 \cdot 10^{-3})}{9,63 \cdot 10^{-7}}$$

Re = 708. < 5000 : Le régime est donc laminaire.

- **Prandtl**

$$Pr = 1,577 \cdot 10^{-3} * 24,75^2 - 0,261 * 24,75 + 12,501$$

$$Pr = 7,007.$$

- **Nusselt**

$$Nu = 1,86 (708 * 7,007)^{1/3} \left(\frac{7,65 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-2}} \right)^{1/3}$$

$$Nu = 8,485.$$

Calcul de λ pour déterminer h_2 :

$$\lambda = 0,609 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$h_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h} = \frac{8,485 * 0,609}{(7,65 \cdot 10^{-3})}$$

$$h_2 = 233,81 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

3) Calcul de flux :

$$\Phi_C = \dot{m}_c * C_{p\text{eau}} (T_{1e} - T_{1s}) = 100 \cdot 10^{-3} * 995,09 * 4178 (34 - 28)$$

$$\Phi_C = 2494,49 \text{ kJ/h}.$$

$$\Phi_f = \dot{m}_f * C_{p\text{eau}} (T_{2s} - T_{2e}) = 100 \cdot 10^{-3} * 997,86 * 4181 (27 - 22,5)$$

$$\Phi_f = 1877,42 \text{ kJ/h}.$$

4) Calcul de Coefficient global :

$$U = \frac{1}{\frac{r_2}{h_1 \cdot r_1} + \frac{r_2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda_{\text{cuivre}}} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{\frac{22,10}{532,42 \cdot 18,9} + \frac{\frac{22,10/2}{1000} \cdot \ln\left(\frac{22,10}{18,9}\right)}{360} + \frac{1}{233,81}}$$

U = 154,37 W/m². °C.

5) Calcul de ΔTLM :

$$\Delta TLM = \frac{(T_{1e} - T_{2e}) - (T_{1s} - T_{2s})}{\ln\left(\frac{T_{1e} - T_{2e}}{T_{1s} - T_{2s}}\right)} = \frac{(34 - 22,5) - (28 - 27)}{\ln\left(\frac{34 - 22,5}{28 - 27}\right)}$$

ΔTLM = 4,30 °C.

CHAPITRE III :

Résultats et discussions

III.1. Etude l'efficacité des échangeurs

L'efficacité, d'un échangeur de chaleur est la mesure de la puissance que peut avoir cette échangeur par rapport à ce qu'il pourrait transmettre s'il était à contre-courants et infiniment grand. Du point de vue économique, un échangeur est souvent dimensionné pour avoir une efficacité comprise entre 0,5 et 0,7.

Sa valeur est calculée de deux manières différentes selon plusieurs références :

-Efficacité par rapport au flux thermiques :

$$\varepsilon(\%) = \frac{\varphi_{Froid}}{\varphi_{Chaud}} \times 100$$

-Efficacité par rapport aux températures :

$$\varepsilon(\%) = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{T_{c1} - T_{f1}} \times 100$$

Ce paramètre est le plus souvent utilisé pour décrire la puissance des échangeurs dans le domaine du génie chimique.

III.1.1. Echangeur en verre à contre-courant

Pour étudier l'efficacité de l'échangeur en verre à contre-courant nous avons réalisé 3 essais à différents débits et différentes températures d'entrée côté chaud. Les mesures de températures ont été effectuées par un thermomètre digital aux entrées et aux sorties de l'échangeur. Les débits sont mesurés au moyen d'une éprouvette et un chronomètre digital.

A l'aide d'un programme élaboré sur une feuille de calcul Excel que nous présentons en annexe de ce mémoire nous avons calculé les flux de chaleurs, les coefficients d'échange par convection, l'efficacité données par les flux de chaleurs et l'efficacité données par les températures.

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau suivant.

Tableau III.1 : Résultats de l'étude de l'échangeur en verre à contre-courant.

Paramètres	Côté chaud			Côté froid		
	Débit (l/h)	120	105	95	120	115
T(°C) entrée	37,0	36,3	40,0	17,0	19,4	15,5
T(°C) sortie	26,0	26,0	25,5	25,0	25,7	25,0
Flux de chaleurs (kJ/h)	5.487,88	4.496,32	5.726,94	4.005,17	3.022,65	4.359,80
h (W/m ² °C)	510,20	488,95	468,64	169,40	165,78	165,13
Efficacité (Flux de chaleur)	0,73	0,67	0,76	-	-	-
Efficacité (ΔT_{LM})	0,55	0,61	0,59	-	-	-

-Commentaire :

Les mesures des débits aux entrées et sorties de l'échangeur en verre a montré des différences de l'ordre de 30% entre les flux de chaleurs. Notre échangeur à fonctionner sans isolation extérieur. L'efficacité calculée par rapport aux flux de chaleur échangée est de l'ordre de 72%. L'efficacité calculée par rapport aux températures d'entrée de sortie avoisine les 58%. En général les échangeurs tubulaires présente une efficacité moyenne de 75% ce qui est compatible avec notre étude.

III.1.2. Echangeur en verre co-courant

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau suivant.

Tableau III.2 : Résultats de l'étude de l'échangeur en verre à co-courant.

Paramètres	Côté chaud			Côté froid		
	Débit (l/h)	120	87	58	120	80
T(°C) entrée	31	38	43	21,5	22,5	22,5
T(°C) sortie	26	31	31	25	28	28
Flux de chaleurs (kJ/h)	2494,49	2531,91	2893,61	1752,26	1835,70	1950,43
h (W/m ² °C)	518,69	450,48	387,68	167,58	144,94	147,90
Efficacité (Flux de chaleur)	0,70	0,72	0,67	-	-	-
Efficacité (ΔT_{LM})	0,52	0,45	0,58	-	-	-

-Commentaire :

Pour un fonctionnement à co-courant nous avons trouvé une efficacité proche de la première c'est-à-dire 70%. Elle est légèrement inférieure à l'efficacité de l'échangeur à contre-courant car la longueur de l'échangeur n'est pas importante ; elle est égale à 40 cm.

Il est important de rappeler que l'efficacité dans les échangeurs à contre-courant plus grande que l'efficacité à co-courant.

Pour l'efficacité calculée par rapport aux températures d'entrée et de sortie, nous avons trouvé une valeur moyenne de 52%.

III.1.3. Echangeur en cuivre à contre-courant

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau suivant.

Tableau III.3 : Résultats de l'étude de l'échangeur en cuivre à contre-courant.

Paramètres	Côté chaud			Côté froid		
Débit (l/h)	100	80	40	60	130	82
T(°C) entrée	36	45	39,5	17	20	23
T(°C) sortie	28	29	28	27	27	27,5
Flux de chaleurs (kJ/h)	3.325,99	5.321,58	1.912,44	2.503,23	3.796,57	1.539,49
h (W/m ² °C)	529,43	477,21	386,18	199,88	256,77	218,29
Efficacité (Flux de chaleur)	0,75	0,71	0,80	-	-	-
Efficacité (ΔTLM)	0,53	0,64	0,69	-	-	-

-Commentaire :

La conductivité du cuivre est importante comparée par rapport au verre, son efficacité doit être aussi grande mais les pertes sur les côtés et aussi importante. Nous avons prouvé par cette étude que l'efficacité moyenne par rapport aux flux thermiques échangés ici est égale à 75%. Cette valeur se situe bien dans la gamme des échangeurs tubulaires.

L'efficacité par rapport aux températures d'entrée est de sortie est en moyenne égale à 62% supérieure à celle trouvée dans l'échangeur en verre.

III.1.4. Echangeur en cuivre co-courant

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau suivant.

Tableau III.4 : Résultats de l'étude de l'échangeur en cuivre à co-courant.

Paramètres	Côté chaud			Côté froid		
Débit (l/h)	60	100	105	70	100	145
T(°C) entrée	35	34	40	20	22,5	19,5
T(°C) sortie	26	28	28	26	27	25,5
Flux de chaleurs (kJ/h)	2.245,04	2.494,49	5.238,43	1.752,26	1.877,42	3.629,69
h (W/m ² °C)	450,31	532,42	531,94	244,86	233,81	267,58
Efficacité (Flux de chaleur)	0,78	0,75	0,69	-	-	-
Efficacité (ΔTLM)	0,60	0,52	0,58	-	-	-

-Commentaire :

Les mêmes remarques est constations on peut les faire dans la marche à co-courant, c'est-à-dire que l'efficacité d'un échangeur à contre-courant est plus grande que l'efficacité à co-courant. Nous l'avons trouvé égale à 74% pas très différente mais inférieur vu la longueur de l'échangeur étudié.

La même remarque on peut la faire l'efficacité calculée par rapport aux températures.

III.2. Etudes des coefficients d'échange global

III.2.1. Coefficient global de l'échangeur en verre

Nous avons calculé les coefficients globaux de l'échangeur pour les deux cas de figure. Le tableau suivant donne les valeurs de ces coefficients.

Tableau III.5 : Coefficient global de l'échangeur tubulaire en verre pour les deux modes d'écoulements.

	U (W/m ² . °C) Co-courant	U(W/m ² . °C) Contre-courant
1 ^{er} essai	109,03	109,36
2 ^{ème} essai	95,88	106,75
3 ^{ème} essai	93,52	105,37

-Commentaire :

Nous avons montré par ce calcul que le fonctionnement à contre-courant est plus efficace que celui à co-courant.

Durant le chauffage ou le refroidissement à contre-courant, le fluide de chauffage entrant donne plus de chaleur lorsque le fluide froid se déplace dans la direction opposée. Le fluide de chauffage se refroidit lorsqu'il traverse l'échangeur de chaleur, mais à mesure que de l'eau plus froide pénètre dans l'échangeur de chaleur, il absorbe plus de chaleur, réduisant la température beaucoup plus bas que ce qui pourrait être obtenu avec un écoulement à co-courant.

La différence de température moyenne entre le fluide de chaud et le fluide froid est également plus grande le long du tube en écoulement à contre-courant, ce qui augmente le transfert de chaleur.

III.2.1. Coefficient global de l'échangeur en cuivre

Tableau III.6 : Coefficient global de l'échangeur tubulaire en cuivre pour les deux modes d'écoulements.

	U (W/m ² . °C) Co-courant	U(W/m ² . °C) Contre-courant
1 ^{er} essai	149,58	138,57
2 ^{ème} essai	154,37	157,49
3 ^{ème} essai	168,34	131,34

-Commentaire :

Les mêmes constatations sont à formuler pour l'échangeur de cuivre. C'est-à-dire que le coefficient d'échange est plus grand dans le cas d'un écoulement à contre-courant que celui à co-courant.

Ce coefficient est également plus grand que celui du verre vu la valeur de la conductivité du cuivre par rapport au verre.

III.3. Etudes des pertes extérieures de l'échangeur

Pour déterminer les pertes au niveau de la paroi extérieure de l'échangeur, nous avons mesuré les températures sur la paroi au moyen d'un thermomètre infrarouge pour les deux échangeurs et pour les deux marches contre-courant et co-courant. Le schéma des mesures est le suivant.

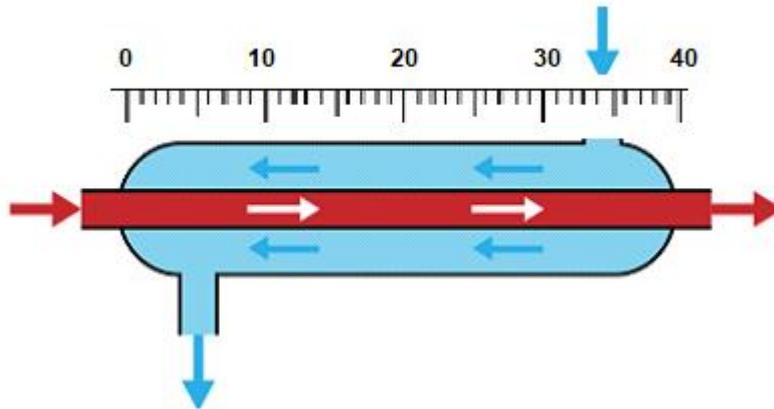


Figure III.1 : Schéma de mesure des températures à la paroi extérieure des échangeurs.

Les valeurs sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau III.7 : Variation de la température de la paroi en fonction de la longueur de l'échangeur.

L (cm)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Echangeur en verre co-courant									
T(°C)	23,3	20,8	20,0	19,3	18,5	18,3	18,0	17,8	19,4
Echangeur en verre contre-courant									
T(°C)	22,7	21,4	21,3	21,7	21,3	21,8	22,0	22,8	27,5
Echangeur en cuivre co-courant									
T(°C)	26,6	23,0	23,3	24,1	22,6	22,8	24,6	22,2	28,2
Echangeur en cuivre contre-courant									
T(°C)	26,3	26,8	24,6	25,5	23,7	23,5	24,2	23,3	23,7

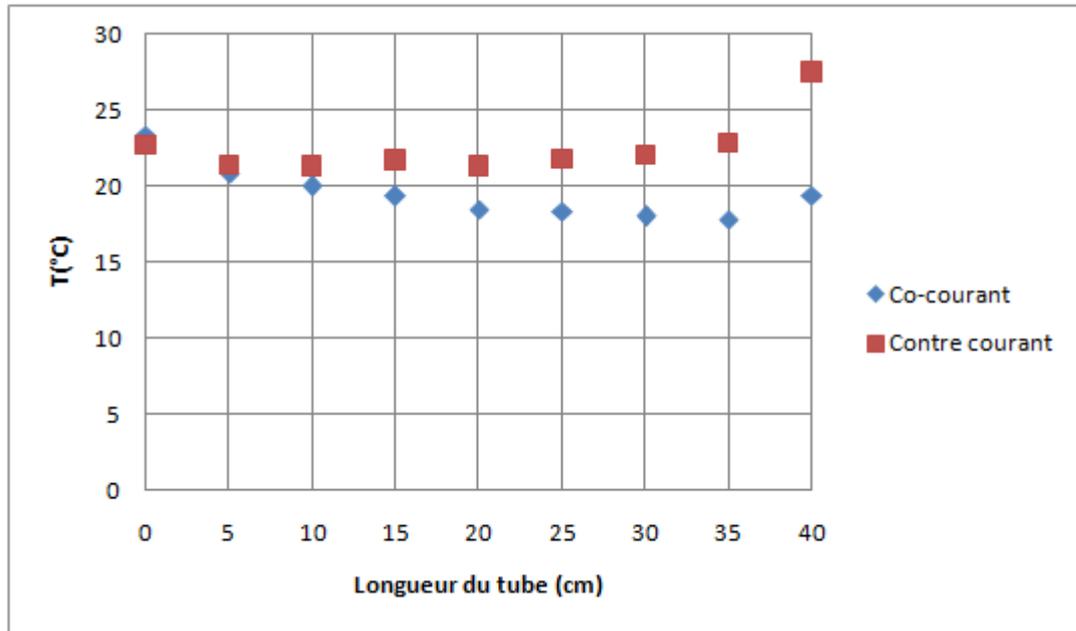


Figure III.2 : Variation de la température de la paroi externe sur la longueur de l'échangeur pour l'échangeur en verre.

-Commentaire :

Sur la figure ci-dessus on remarque que les températures à la paroi sont plus élevées dans le cas d'un écoulement contre courant que l'écoulement à co-courant. Cela est dû à l'efficacité de l'échangeur à contre courant, qui fait augmenter la température du liquide froid dans la paroi externe.

Les températures à la paroi externe dans le cas d'un écoulement co-courant sont plus faibles, elles reflètent l'efficacité de l'échangeur.

Cette analyse a montré la différence de l'efficacité dans les marche de l'échangeur.

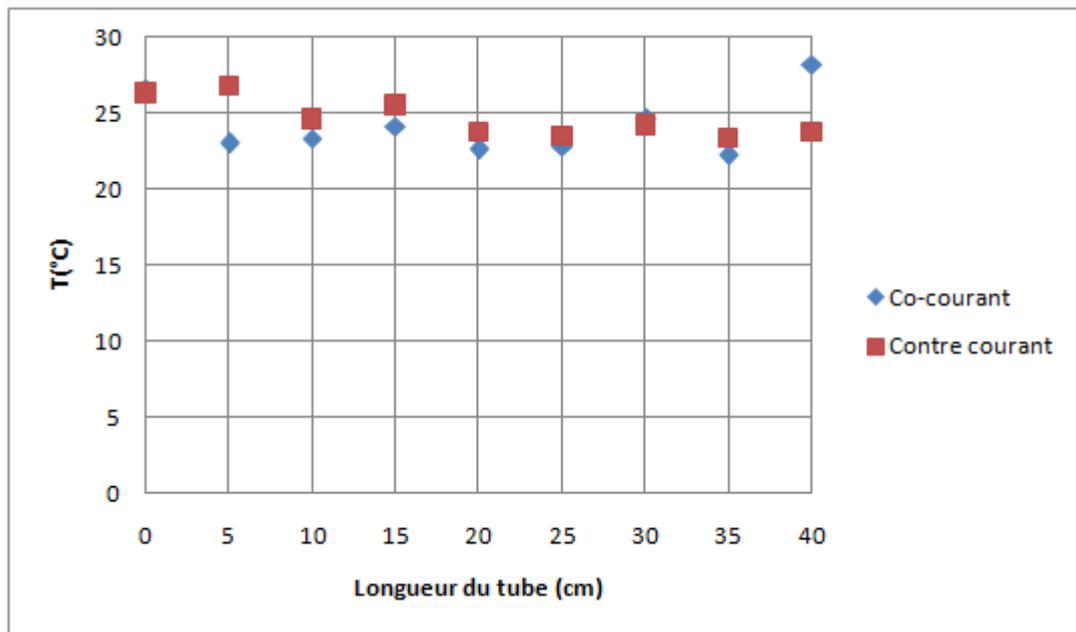


Figure III.3 : Variation de la température de la paroi externe sur la longueur de l'échangeur pour l'échangeur en cuivre.

-Commentaire :

La figure ci-dessus montre le même phénomène que dans l'échangeur en verre mais de moindre intensité. Les valeurs entre elles sont plus rapprochées vu la conductivité thermique du cuivre.

Les valeurs mesurées sont en moyenne supérieures à la température ambiante de l'air qui était durant nos expériences égale à $19 \pm 2^\circ\text{C}$, ce qui prouve qu'il y a un transfert avec le milieu extérieur sous forme de pertes.

III.4. Modélisation des échangeurs sur Excel

Afin de faciliter les calculs des flux de chaleur, de l'efficacité, des coefficients de transferts ainsi que les calculs intermédiaires (Re , Nu , Pr ...) nous avons élaborés une feuille de calcul sur le logiciel Microsoft Excel. Cette feuille est établie pour un échangeur à co-courant et un échangeur à contre courant.

Elle comporte :

- Les dimensions de l'échangeur (diamètres intérieurs et extérieurs).
- La nature du matériau (Cuivre, Verre...).
- La nature du fluide utilisé (eau, huile, alcool...).

- Le sens de l'écoulement (co-courant, contre courant).
- Les débits d'écoulement mesurés.
- Les températures entrées et sorties mesurées.

La feuille de calcul Excel donne :

- Les diamètres hydrauliques.
- La température moyenne.
- La vitesse moyenne.
- La viscosité.
- Le nombre de Reynolds Re et le régime d'écoulement.
- Le nombre de Nusselt Nu .
- Le nombre de Prandtl Pr .
- Le flux de chaleur.
- Le coefficient de transfert de chaleur par convection.
- Le coefficient global de transfert de chaleur.
- L'efficacité de l'échangeur.

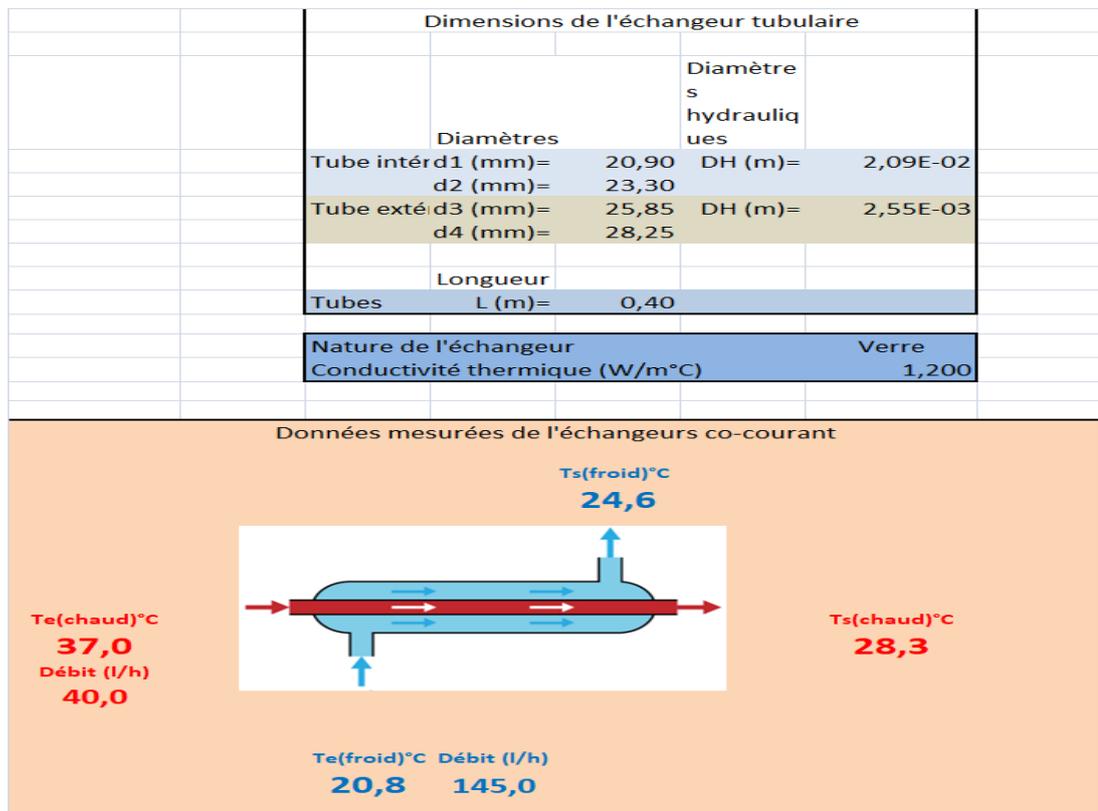


Figure III. 4 : Extrait de la feuille de calcul Excel pour le calcul de l'échangeur de chaleur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de travail, nous avons réalisé et étudié un échangeur de chaleur et nous l'avons comparé pour étudier son efficacité sur le transfert de chaleur. L'étude s'est déroulée sur un montage expérimental d'échange entre un fluide chaud généré par un bain mari et un fluide froid.

L'étude des échangeurs nous a confirmé les théories de transfert de chaleur dans les échangeurs tubulaires coaxiaux. Nous avons montré également la différence entre l'écoulement co-courant et l'écoulement à contre-courant.

Le calcul de l'efficacité entre l'échangeur en verre et l'échangeur en cuivre a également montré l'avantage du coefficient de conductivité thermique du cuivre sur le verre. Le sens de l'écoulement lui aussi est déterminant dans ce type d'écoulement. D'autres facteurs aussi comme le régime d'écoulement, les effets d'entrée et de sortie du fluide ou la formation de bulles d'air, sont déterminants sur l'efficacité de l'échange thermique.

L'étude des pertes sur la paroi externe des échangeurs a montré déjà que plus de 30 à 40% de la chaleur échangée se perd sur les extrémités et aux points de raccordement des tuyaux.

Enfin nous recommandons la poursuite de l'étude sur des facteurs comme l'utilisation d'autres fluides, l'utilisation d'autres matériaux comme l'acier ou l'aluminium et l'utilisation d'autres échangeurs de forme plus complexes.

Le choix actuel se développe autour des échangeurs à plaque et les échangeurs solaires.

Références Bibliographiques

- [1] : A. BONTEMPS, A. GAREIGUE, CH. GOUBIER, J. HUETZ, CH. MARVILLET et R. VIDIL « Description des échangeurs de chaleur », technique de l'ingénieur [B2 341].
- [2] : Technique de l'ingénieur: échangeurs de chaleur ; Description des échangeurs. En PDF.
- [3] : Documentation Total. Support de formation Exploration et production Cours des équipements. Total (EXP-PR-EQ120-FR). Révision 0.1 (16-04-2007).
- [4] : HARKAT YAMINA « Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur », Mémoire Magister, Université Mohammed Bougera -Boumerdas, 2007.
- [5] : Site web: la récupération de la chaleur dans l'industrie des aliments et boissons. Htm.
- [6] : W.TECHNID « Raffinage et génie chimique Tome 1 et 2 », 1965.
- [7] : P. TRAMBOUZE. « Le raffinage du pétrole ». Edition TECHNIP. Tome IV matériels et équipements. Paris. 1972. ISBN 2-7108-0685-1.
- [8] : IFP 2005 ENSPM training. MATERIEL THERMIQUE « rôle des échangeurs de chaleur », Edition TECHNIP. EN ECH-02359_A_F-Rév.1 (18/04/2005).
- [9] : BOUGRIOU C, BAADACHE K (2008) Shell-and-double concentric tube heat exchangers. WO2008089777A1, Patent PCT, DZ2008/000002.
- [10] : RAMESH. K, SAHL, ALFRED. C, MUELLER, « Heat Exchange » in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, DOI : 10.1002/14356007. b03_02, 15 juin 2000, 114 p.
- [11] : J.F. Saccadura. « Initiation aux transferts thermiques », 4^{ème} tirage paris, 1993.
- [12] : ZOÉ MINVELLE, NASIA CANEY, PATRICE CLEMENT, PHILIPPE BANDELIER, PHILIPPE MARTY, JEAN ANTONIE GRUSS ET CLAUDE ROUSSEL « Description des échangeurs de chaleur », technique de l'ingénieur [BE 9516].
- [13] : Technique de L'ingénieur, traité génie énergétique, volume [BE5].
- [14] : Techniques de froid technique général », CfmnLog YSH04054, 30 juin 1998.
- [15] : M. S. Mon and U. Gross, « Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers », International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp. 1953-1964, 2004.
- [16] : Collection Microsoft encarta, 2003.
- [17] : PIERRE WUITHIER, ANDRE Giraud, Raffinage et Génie chimique, (Tome II) « 2^{ème} édition », Paris : Editions Techniques, 1972.
- [18] : YVES JANNOT, « transferts thermiques », p7/p161, 2012.