

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Chimie Industrielle



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم: الكيمياء الصناعية

Mémoire présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de Master en : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

## Simulation Hysys D'un Echangeur De Chaleur Multi-Tubulaire

Présentée par :

Ferhat Nadjat

Devant le jury composé de :

Président : Mr. NEDJAR Zoheir

Encadreur : Mr. BENDJAOUAHDOU Chaouki

Examineur : Mr. FADEL Ammar

Promotion Juin 2017

*The aim of science is not to open the door to everlasting wisdom, but to set a limit on everlasting error.*

*Bertolt. Brecht*

### **REMERCIEMENT**

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

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire en particulier notre encadreur **Mr. Benjaouahdou Chaouki** pour ses conseils et l'aide qu'il nous a apportés.*

*Nous voudrions aussi exprimer toute notre gratitude à : Monsieur le président de jury **Mr. Nedjare Zohir** et l'examineur **Mr. Fadel Ammar** pour les orientations et les conseils.*

*Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.*

## *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents

A mes frères et ma sœur

A Mes grands-parents

A mes tantes et mes oncles

A mes cousins et cousines

A toutes ma famille

A mes camarades de la promotion (2016/2017) de génie chimique et génie de  
l'environnement à qui je dois ma profonde sympathie

A mes très chers amis

Ainsi qu'a tous mes professeurs, enseignants

Et tous mes amis du primaire

Jusqu'à l'université.

Nadjat

# *Table des Matières*

Table des Figures

Table des Tableaux

Nomenclatures

Introduction Générale.....01

## **Chapitre I Généralités Sur Le Transfert De Chaleur**

Introduction.....02

I.1 Modes de transfert thermique.....03

I.1.1 Conduction.....03

I.1.2 Convection.....04

I.1.3 Rayonnement.....06

I.1.4 Combinaisons des différents modes de transfert de chaleur.....07

I.2 Loi de transmission de la chaleur.....08

I.2.1 Loi de Fourier (conduction).....08

I.2.2 Loi de Newton (Convection).....10

I.2.3 Loi de Stefan Boltzmann (Rayonnement).....10

I.3 Grandeurs thermiques.....11

I.4 Nombre adimensionnel.....12

## **Chapitre II Les Echangeurs De Chaleur**

Introduction.....15

II.1 Principaux modes d'écoulement de deux fluides traversant un échangeur..16

II.1.1	Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens.....	16
II.1.2	Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires.....	17
II.1.3	Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage.....	17
II.2.	Principal but et fonctions d'un échangeur thermique.....	18
II.3.	Critères de classement des échangeurs.....	19
II.3.1	Classement technologique.....	19
II.3.2	Classement suivant le mode de transfert de chaleur.....	20
II.3.3	Classement suivant le procédé de transfert de chaleur.....	20
II.3.4	Classement fonctionnel.....	20
II.3.5	Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange...	20
II.3.6	Classification selon la compacité de la surface d'échange.....	21
II.3.7	Classification suivant la construction.....	21
II.4	Etude détaillée des différents types d'échangeurs de chaleur.....	21
II.4.1	Echangeurs tubulaires.....	21
II.4.2	Les échangeurs à plaques.....	24
II.4.3	Autres types d'échangeurs.....	25
II.5	L'encrassement des échangeurs.....	26
II.5.1	Encrassement particulaire.....	26
II.5.2	Corrosion .....	26
II.5.3	Entartrage .....	26
II.5.4	Encrassement biologique.....	27
II.5.5	Encrassement par réaction chimique.....	27
II.5.6	Encrassement par solidification.....	28
II.5.7	Modes combinés.....	28

## **Chapitre III     Conception De La Simulation Hysys De** **L'échangeur Etudié**

III.1 Introduction.....	29
III.2 Enoncé du problème.....	29
III.3 Principales étapes de la simulation.....	29
III.4 Elaboration de la simulation avec le logiciel Hysys.....	30
III.5 Ajout d'un échangeur de chaleur dans l'environnement de simulation.....	30

## **Chapitre IV     Résultats Et Discussion**

IV.1 Introduction.....	34
IV.2 Détermination de la valeur du débit du fluide chaud (vapeur surchauffée) provenant de la chaudière.....	34
IV.2.1 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de paramètres opératoires.....	35
IV.2.1.1 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ).....	35
IV.2.1.2 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ).....	36
IV.2.1.3 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la température d'entrée du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ).....	37

IV.2.1.4 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ).....	39
--	----

Conclusion Générale.....	40
--------------------------	----

Références bibliographiques

Résumé

## *Table des Figures*

<b>Figure</b>	<b>Titre de figure</b>	<b>Page</b>
Figure I.1	Différents modes de transmission de chaleur, conduction, convection et rayonnement	03
Figure I.2	Schéma servant à expliquer la conduction	04
Figure I.3	Schéma servant à expliquer la convection	05
Figure I.4	Schéma servant à expliquer le rayonnement	07
Figure I.5	Exemple illustrant les différents types de transferts de chaleur	08
Figure I.6	Schéma servant à expliquer la loi de Fourier	09
Figure I.7	Schéma servant à expliquer la loi de Newton	10
Figure I.8	Schéma servant à expliquer la loi de Stefan Boltzmann	11
Figure II.1	Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant	16
Figure II.2	Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre-courants	17
Figure II.3	Exemples d'échangeurs à courants croisés	18
Figure II.4	Différents types d'échangeurs tubulaires	22
Figure II.5	Ailettes continues ou indépendantes pour tubes	23
Figure II.6	Tubes avec différents types d'ailettes longitudinales	23
Figure II.7	Échangeur à tubes et calandre : principales technologies à boîte fixe, boîte flottante et à tubes en U	24

Figure III.1	Fenêtre de simulation de l'échangeur : spécifications des entrées et sorties des courants de matière	31
Figure III.2	Fenêtre de simulation de l'échangeur : spécification des valeurs des pertes de charge et des pertes de chaleur	32
Figure III.3	Tableau numérique des résultats de la simulation de l'échangeur multi-tubulaire	33
Figure IV.1	Schéma simplifié de l'échangeur multi-tubulaire étudié	34
Figure IV.2	Débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs des pressions d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ )	36
Figure IV.3	Débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs des pressions d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ )	37
Figure IV.4	Débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la température d'entrée du fluide du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ )	38
Figure IV.5	Débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la température d'entrée du fluide du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ )	39

## *Tables des Tableaux*

<b>Tableau</b>	<b>Titre de tableau</b>	<b>Page</b>
Tableau III.1	Informations relatives au courant de matière chaud (vapeur d'eau)	30
Tableau III.2	Informations relatives au courant de matière froid (Eau liquide)	30

## *Nomenclatures*

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
W	Vitesse relative de l'écoulement	m/s
$\dot{q}$	Flux surfacique de chaleur	W/m <sup>2</sup>
T	Température	°C, K
dQ	Energie élémentaire	J
dt	Temps élémentaire	s
$\lambda$	Conductivité thermique du matériau	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
S	Section	m <sup>2</sup>
$\Phi$	Flux de chaleur	W
$\varphi$	Densité de chaleur	W m <sup>-2</sup>
dT/dx	Gradient de température	K m <sup>-1</sup>
$h$	Coefficient d'échange convectif	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
$\varepsilon$	Emissivité du corps	-
$\sigma$	Constante de Stefan	W/m <sup>2</sup> /K <sup>4</sup>
$C_p$	Chaleur spécifique	J/Kg K
$m$	Masse	Kg
L	Coefficient de chaleur latente	J/Kg

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
$\Delta T$	L'écart de température	K
Re	Nombre de Reynolds	-
Nu	Nombre de Nusselt	-
Pr	Nombre de Prandtl	-
Ra	Nombre de Rayleigh	-
Gr	Nombre de Grashof	-
$Q_{HS}$	Débit de fluide chaud	Kg/h
$Q_{CS}$	Débit de fluide froid	Kg/h

# Introduction Générale

---

## Introduction Générale

L'une des branches importantes du génie des procédés est le génie des transferts thermiques qui s'intéresse aux méthodes de mise en œuvre rationnelles des transferts de chaleur et en particulier aux appareils dans lesquels sont conduites ces opérations : les échangeurs de chaleur. L'échangeur de chaleur a un rôle très important et incontournable dans l'industrie chimique. Il existe plusieurs types d'échangeur de chaleur, et le plus utilisé est l'échangeur multi-tubulaire.

Dans ce mémoire nous allons étudier par simulation au moyen du logiciel Aspen Hysys, l'influence d'importants paramètres opératoires sur le fonctionnement d'un échangeur de chaleur multi-tubulaire. Ces paramètres opératoires sont : la pression d'entrée du courant froid ( $P_{shin}$ ), la pression d'entrée du courant chaud ( $P_{twin}$ ), la température d'entrée du courant froid ( $T_{shin}$ ), ainsi que la température d'entrée du courant chaud ( $T_{twin}$ ). Les résultats trouvés devraient nous permettre de savoir comment devraient être ces paramètres pour avoir un débit du fluide chaud minimal afin de réduire la consommation énergétique au niveau de la chaudière.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- ❖ Chapitre I : Généralités Sur Le Transfert De Chaleur.
- ❖ Chapitre II : Les Echangeurs De Chaleur.
- ❖ Chapitre III : Conception De La Simulation Hysys De L'échangeur Étudié.
- ❖ Chapitre IV : Résultats Et Discussion.

# **Chapitre I**

## **Généralités Sur**

### **Le Transfert De Chaleur**

## **Introduction**

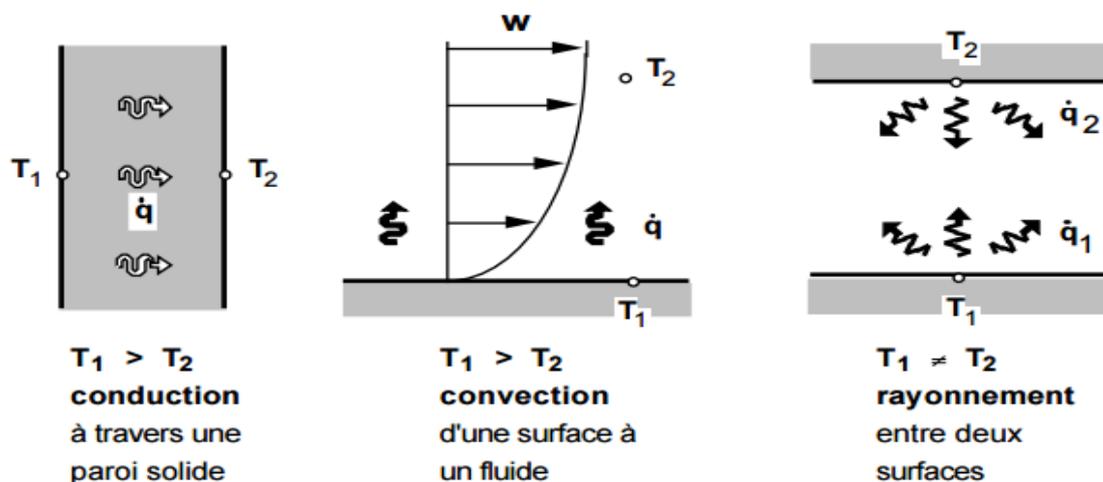
La chaleur est une forme d'énergie qui s'écoule sous l'effet d'une différence de température des hautes vers les basses températures. La chaleur pénètre, comme la gravité, toutes les substances de l'univers et concourt à tous ses phénomènes. L'unité de la chaleur dans le système international est le joule(J) [01].

Parmi les modes d'échanges d'énergie, le transfert de chaleur est certainement l'un des plus courants. Dès qu'une différence de température apparaît entre deux systèmes, le transfert de chaleur va intervenir. L'importance des phénomènes de transmission de chaleur résulte de leur intervention dans presque tous les procédés des différents secteurs d'activités : chimie, pharmacie, agroalimentaire, environnement, pétrole...Le rôle du transfert de chaleur devient souvent essentiel et même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées : échangeurs, calorifugeage... [02].

Dans ce chapitre, nous présentons un certain nombre de définitions et théories relatives aux différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).

## I.1 Modes de transfert thermique

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc...) ou domestique (chauffage de l'habitat). Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid. Comme on le verra par la suite, le flux de chaleur dont la densité locale est notée  $\vec{\varphi}$  est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur: la conduction, la convection et le rayonnement (Figure I.1) [03].



**Figure I.1** Différents modes de transmission de chaleur, conduction, convection et rayonnement [04].

### I.1.1 Conduction

La conduction est le moyen par lequel la chaleur circule de proche en proche dans un matériau ou passe d'un corps à un autre en contact physique direct, par simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines. Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones froides (Figure I.2).

Lorsque les molécules s'échauffent à la surface d'un corps sous l'effet du rayonnement solaire, elles transmettent cette chaleur aux molécules voisines ; et de proche en proche, la chaleur captée se répartit dans toute la masse du corps, jusqu'à atteindre à l'uniformité des températures.

La vitesse de progression du flux de chaleur à travers un corps, sa conductivité thermique, dépend de l'aptitude de ses molécules et de ses électrons à recevoir et à transmettre la chaleur. Par exemple, un métal paraîtra plus froid au toucher qu'un morceau de bois, pourtant à la même température. Cela tient au fait que le métal a une conductibilité plus élevée et que la chaleur s'écoule de la surface vers l'intérieur plus rapidement que dans le bois. La sensation de froid est d'autant plus intense que la chaleur retirée de la main vers le métal par conduction est plus importante.

Les gaz sont généralement de mauvais conducteurs. Aussi, les matériaux comportant de minuscules cellules d'air en grand nombre sont habituellement de mauvais conducteurs et donc de bons isolants. Les matériaux d'isolation utilisés dans la construction illustrent bien cela: ils renferment une multitude de petits espaces d'air et se caractérisent par leur légèreté [05].

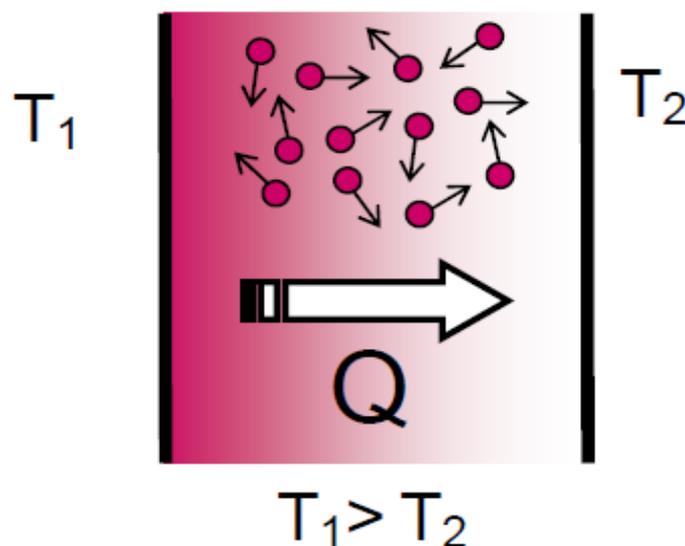


Figure I.2 Schéma servant à expliquer la conduction [06].

### I.1.2 Convection

Ce mode de transfert est spécifique aux fluides. En plus du transfert de chaleur par conduction toujours présent dans la matière, il y a dans les fluides un transfert de chaleur

provoqué par l'écoulement du fluide, c'est-à-dire par le mouvement d'ensemble des particules qui le composent (Figure I.3). Ce phénomène est appelé advection : une masse de fluide qui se déplace transporte avec elle son énergie interne. On peut donc définir la convection comme la réunion de deux modes de transfert de chaleur : la conduction, qui s'effectue à l'échelle microscopique, et l'advection, qui est de nature macroscopique. On classe généralement la convection en trois catégories : la convection naturelle, la convection forcée, et la convection mixte [07].

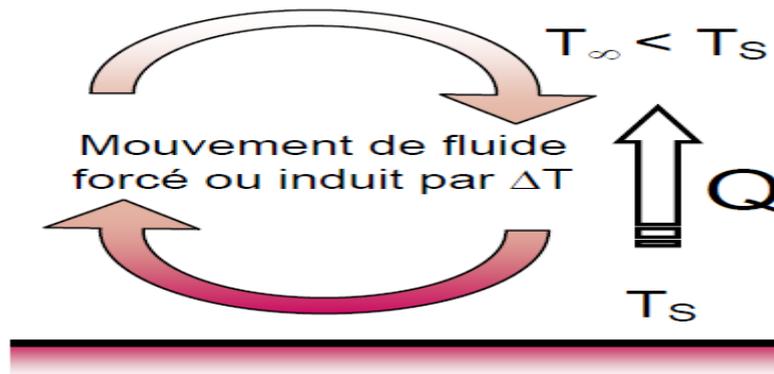


Figure I.3 Schéma servant à expliquer la convection [06].

- La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure au système : c'est le cas de nombreux échangeurs industriels. Comme les vitesses d'écoulement peuvent atteindre des valeurs très élevées, le transfert par convection forcée est souvent extrêmement efficace.
- La convection naturelle (ou convection libre) apparaît spontanément sous certaines conditions, dans un fluide au sein duquel existe un gradient de température imposé en général par le milieu extérieur.
- Un bon exemple de convection naturelle est la circulation de l'eau d'un chauffage central par thermosiphon. L'eau chauffée dans une chaudière placée en point bas d'un immeuble a une masse volumique plus faible que l'eau refroidie qui redescend des radiateurs des étages supérieurs. Cette différence de masse volumique entraîne, sous l'effet de la poussée d'Archimède, l'apparition d'un mouvement d'ensemble de l'eau de l'eau du circuit. Naturellement, ce mode de chauffage est très dépendant du diamètre des tuyaux utilisés, et on tend actuellement à le remplacer par une convection forcée, à l'aide de pompes qui s'accommodent mieux de tuyaux de petits diamètres. Les effets mécaniques ainsi engendrés sont le plus souvent faibles si bien que la

capacité de transport thermique de la convection naturelle est, en général, très inférieure à celle de la convection forcée. Il y a cependant des exceptions spectaculaires, les évaporateurs à thermosiphon par exemple.

- La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convections naturelle et forcée) quand les forces motrices dues aux deux types de convection sont du même ordre de grandeur [08].

Les domaines d'applications des transferts de chaleur par convection sont variés et à différentes échelles spatiales. Aux grandes échelles, par exemple, on peut citer la prédiction météorologiques, le climat et la circulation océanique. A plus petites échelles cela concerne de nombreuses applications industrielles comme le refroidissement dans les centrales nucléaires, des aubages de turbine ou des micro-processeurs, le dimensionnement des échangeurs de chaleur, le dégivrage des entrées d'air de réacteur. Des applications domestiques comme le confort thermiques, les déperditions d'un double vitrage, le conditionnement d'air ou le tirage d'une cheminée sont aussi concernées [09].

### **I.1.3 Rayonnement**

C'est l'échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent ou semi transparent (Figure I.4). Les matériaux ont la propriété d'absorber ou d'émettre des photons (ou des quantités d'énergie). L'énergie emportée par le photon est prélevée sur l'état d'énergie du corps et réciproquement l'énergie d'un photon absorbé est souvent transformée en chaleur. Cette propriété d'émission dépend donc de la température du milieu. Il s'agit d'un transfert à distance quasi-instantané sans nécessité de support matériel.

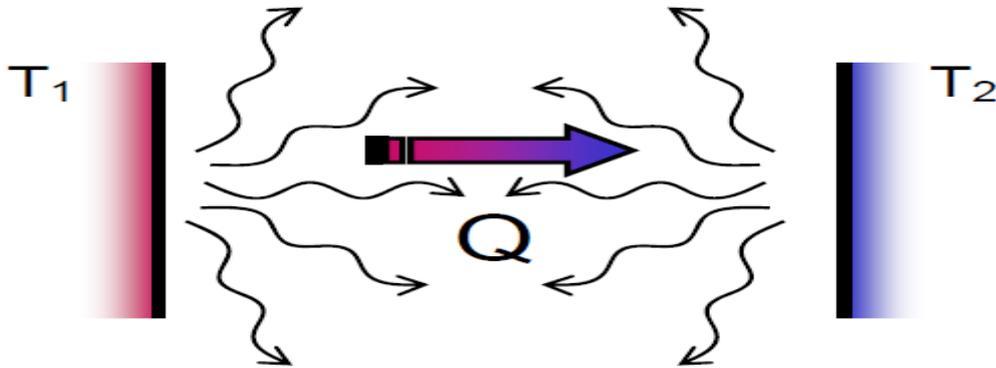
Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques entre deux surfaces (même dans le vide). Sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière. Finalement, on distingue dans ce mode de transfert trois phénomènes :

- Emission ;
- Propagation ;
- Absorption ;

Le rayonnement thermique concerne les longueurs d'ondes comprises entre  $100\mu m$  et  $0,01\mu m$  et va de l'infrarouge à l'ultraviolet en couvrant le visible [10].

**Exemple :**

- Le soleil chauffe la terre par rayonnement ;
- Chaleur émise par rayonnement par une flamme, un feu [02];



**Figure I.4** Schéma servant à expliquer le rayonnement [06].

Le rayonnement infrarouge est appliqué dans de très nombreux procédés industriels. Son action sur la matière est essentiellement thermique et les applications principales concernent :

- Le séchage (papiers, cartons, textiles, etc.) ;
- La cuisson (teintures, apprêts, enductions...)
- Le chauffage (avant formage de matériaux divers, traitements thermiques, soudage, chauffage de postes de travail...)
- Les polymérisations (encres, revêtements, emballages...)
- La stérilisation (flacons pharmaceutiques, produits alimentaires divers...).

Le rayonnement ultraviolet est constitué de photons dont l'énergie est de l'ordre de grandeur de l'énergie des liaisons atomiques. Ceux-ci agissent sur la matière par déplacement des électrons vers des niveaux énergétiques supérieurs. Lorsque la matière soumise au rayonnement y est sensible, il s'y produit des réactions chimiques [10].

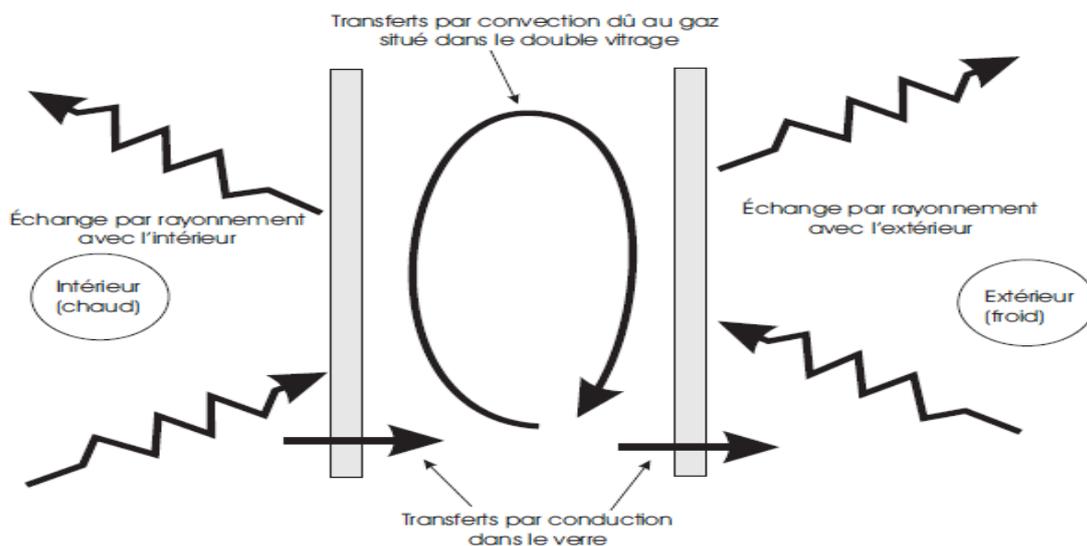
### I.1.4 Combinaisons des différents modes de transfert de chaleur

En pratique les trois modes de transfert de chaleur qui viennent d'être présentés interviennent simultanément ; dans tout problème de thermique le transfert de chaleur sera réalisé par convection, conduction et rayonnement.

Toutefois, pour simplifier l'étude, suivant l'importance relative de ces trois modes de transfert, on pourra considérer uniquement un ou deux modes prédominants et par suite on négligera évidemment ceux qui ont une faible influence.

En pratique, pour des températures inférieures à 300 °C, le rayonnement peut être considéré comme négligeable par rapport aux transferts de chaleur par convection et conduction [02].

Le dessin de la (Figure I.5) qui représente une fenêtre à double vitrage synthétise l'ensemble des exemples cités.



**Figure I.5** Exemple illustrant les différents types de transferts de chaleur [03].

## I.2 Loi de transmission de la chaleur

### I.2.1 Loi de Fourier (conduction)

Fourier apparente la conduction de chaleur à l'écoulement d'un fluide qui a lieu des régions chaudes vers les régions froides et dont les seules manifestations dans la matière se traduisent par des variations de températures (effet macroscopique). Les dilatations des dispositifs seront négligées.

Considérons un milieu cylindrique homogène de section  $S$  et de longueur  $L$  (Figure I.6). Les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température  $T_2$  (source chaude) et  $T_1$  (Source froide). Il se produit un transfert d'énergie orienté de la source chaude

vers la source froide. Le milieu étant homogène, en régime permanent, la température se répartit de manière uniforme.

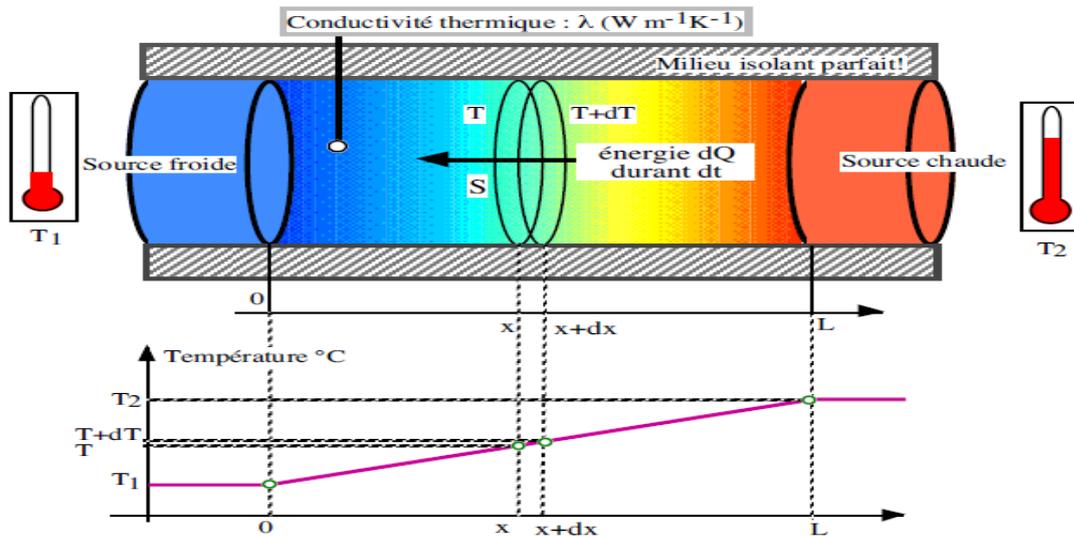


Figure I.6 Schéma servant à expliquer la loi de Fourier [11].

En régime permanent, la loi de Fourier exprime la quantité de chaleur élémentaire  $dQ$  qui traverse en  $x$  une surface  $S$  d'épaisseur  $dx$  durant le temps  $dt$  :

$$dQ = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dt \quad (01)$$

- $dQ$  : Energie élémentaire en Joule (J).
- $\lambda$  : Conductivité thermique du matériau en  $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ .
- $S$  : Section en  $(m^2)$ .
- $dt$  : Temps élémentaire en (s).
- $\frac{dT}{dx}$  : Gradient de température en  $x$  en  $(K \cdot m^{-1})$ .

La relation (1) permet de définir :

Le flux de chaleur  $\Phi$  en Watt qui circule en  $x$  :

$$\Phi(W) = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (02)$$

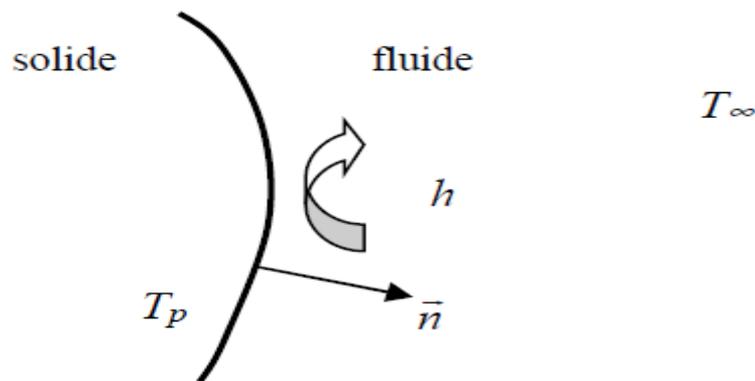
Ainsi que la densité de chaleur  $\varphi$  en  $(W \cdot m^{-2})$  :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (03)$$

Le signe  $(-)$  des relations précédentes indique que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température ( $dT/dx$  est positif sur la figure I.6) [11].

### I.2.2 Loi de Newton (Convection)

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton qui stipule que la densité de flux de chaleur échangé entre une paroi solide et un fluide en écoulement est proportionnelle à l'écart de température qui lui a donné naissance (Figure I.7).



**Figure I.7** Schéma servant à expliquer la loi de Newton.

- du point de vue du solide (flux entrant dans le fluide ou sortant du solide si  $T_p > T_\infty$ ) :

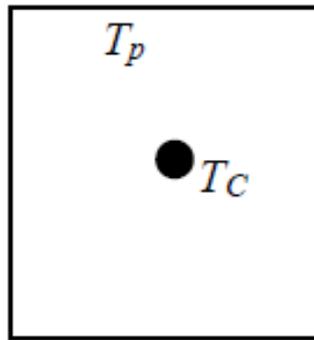
$$\vec{\varphi} = h(T_p - T_\infty) \vec{n} \quad (04)$$

$h$  est une grandeur positive appelée coefficient d'échange convectif, en  $(W.m^{-2}.K^{-1})$ . Ce coefficient dépend de nombreux paramètres (fluide, type d'écoulement, état de surface...) et est donc extrêmement difficile à quantifier précisément.

### I.2.3 Loi de Stefan Boltzmann (Rayonnement)

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps à des températures différentes séparés par du vide ou par un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Stefan.

**Exemple :** corps de petite dimension placé dans une enceinte fermée (Figure I.8)



**Figure I.8** Schéma servant à expliquer la loi de Stefan Boltzmann.

$$\varphi = \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_c^4) \quad (05)$$

$\varepsilon$  : Emissivité du corps ( $0 < \varepsilon \leq 1$ ).

$\sigma$  : Constante de Stefan =  $5.67 \cdot 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>) [12].

### I.3 Grandeurs thermiques

Ces définitions permettent d'expliquer avec succès les phénomènes de transfert de chaleur d'un corps à l'autre, et plus généralement de conservation de la chaleur dans des systèmes isolés. Pour une quantité de matière donnée, l'apport d'une quantité de chaleur (énergie) induit un changement de sa température ou un changement d'état de la matière. La distinction entre ces deux phénomènes permet de distinguer deux formes de chaleur, la chaleur sensible et la chaleur latente. La température quant à elle est une grandeur physique qui caractérise un niveau d'énergie de la matière. Ces différentes notions sont explicitées ci-après [10].

- **Température T**

Elle se définit en chaque point d'un corps liquide, solide ou gazeux. C'est une fonction scalaire de l'espace et du temps lorsque le problème en dépend (problème instationnaire). On le notera T. L'unité de température est le degré Kelvin (K) ou encore le degré Celsius (°C) [03].

- **Flux de chaleur à travers une surface  $\phi$**

C'est la quantité de chaleur qui traverse la surface considérée pendant l'unité de temps. Le symbole utilisé est la lettre  $\phi$ . L'unité dans le système international est le Watt.

$$d\phi = \frac{d^2Q}{dt} \quad (06)$$

- **Densité de flux de chaleur  $\phi$**

C'est la quantité de chaleur qui traverse l'unité de surface pendant l'unité de temps. C'est donc le flux de chaleur par unité de surface (ou densité de flux). On le notera  $\phi$ . L'unité dans le système international est le (Watt/m<sup>2</sup>) [13].

$$\phi = \frac{d\phi}{dS} \quad (07)$$

- **Chaleur sensible**

On parle de chaleur sensible lorsqu'un corps qui reçoit ou cède de la chaleur s'échauffe ou se refroidit sans changer d'état. La variation de température  $\Delta T = (T_2 - T_1)$  que va subir un corps de masse  $m$  est reliée à la quantité de chaleur  $Q$  par le coefficient de proportionnalité  $C_p$  appelé chaleur spécifique ou capacité calorifique.

$$Q = m C_p \Delta T \quad (08)$$

- **Chaleur latente**

On parle de chaleur latente lorsqu'un corps qui reçoit ou cède de la chaleur l'utilise pour changer d'état, sans que sa température ne varie. La quantité de chaleur qu'il faut fournir à un matériau de masse  $m$  donnée pour que, à température constante, celui-ci change d'état (solide-liquide-gaz) est donnée par :

$$Q = m L \quad (09)$$

Ou  $L$  représente le coefficient de chaleur latente.

La température reste constante pendant tout le processus de changement d'état, dans ce cas, on a une transformation isotherme [01].

#### I.4 Nombre adimensionnel

D'après la loi de Newton pour la convection on a le flux de chaleur qui se détermine par :

$$Q = h S \Delta T \quad (10)$$

$Q$ : Flux de chaleur.

$h$ : Coefficient d'échange global.

$S$ : Surface d'échange.

$\Delta T$ : L'écart de température.

Mais, en réalité cette équation est plus complexe, puisque le coefficient d'échange convective  $h$  est en fonction de plusieurs paramètres ; la géométrie, le profil, la vitesse, la température, l'écoulement,...etc. et qui implique beaucoup d'expérience pour déterminer l'influence de chacun de ces paramètres.

La complexité des phénomènes de convection rend nécessaire l'utilisation des techniques générales permettant de limiter le nombre des paramètres influents. Après analyse adimensionnelle et similitude faites, on est parvenu à minimiser ces paramètres en un plus petit nombre de groupement adimensionnel ci-dessous [10].

- **Nombre de Reynolds**

Rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité, caractérise l'écoulement dans une canalisation.

$$\text{Re} = \frac{\rho U_0 D}{\mu} \quad (11)$$

$\rho$ : Masse volumique du fluide ( $\text{kg/m}^3$ ).

$U_0$ : Vitesse moyenne du fluide (m/s).

$D$ : Plus petite dimension géométrique du problème, diamètre  $D_h$  pour une canalisation en (m), largeur  $L$  pour une plaque,

$\mu$ : Viscosité dynamique du fluide (Pa.s).

- **Nombre de Nusselt**

Rapport de la quantité de chaleur échangée par convection à la quantité de chaleur échangée par conduction.

$$Nu = \frac{h D}{\lambda} \quad (12)$$

$h$  : Coefficient d'échange convectif en (W/m<sup>2</sup>.K)

$\lambda$  : Conductivité thermique du fluide en (W/m.K).

- **Nombre de Prandtl**

Caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution des températures, c'est une caractéristique du fluide.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (13)$$

$C_p$  : Capacité thermique massique du fluide en (J/kg.K).

- **Nombre de Rayleigh**

Caractérise l'écoulement en convection naturelle.

$$Ra = \frac{\rho^2 C_p g \beta D^3 \Delta T}{\lambda \mu} = (Pr Gr) \quad (14)$$

$\alpha = \lambda / (\rho C_p)$  : Diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/s).

$\nu = \mu / \rho$  : Viscosité cinématique du fluide (m<sup>2</sup>/s).

$\beta$  : Dilatabilité du fluide en (K<sup>-1</sup>).

$\Delta T$  : Différence de température entre fluide et paroi :  $\Delta T = T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}}$ .

- **Nombre de Grashof :**

Caractérise l'écoulement en convection naturelle [06].

$$Gr = \frac{g \beta \rho^2 D^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (15)$$

# **Chapitre II**

## **Les Echangeurs**

### **De Chaleur**

### **Introduction**

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant un transfert d'énergie thermique entre deux corps (solides, liquides ou gaz). La plupart du temps, il s'agit de fluides. Ces fluides peuvent être en contact indirect ou direct, c'est-à-dire séparés ou non par une paroi. Cependant, cette définition n'est pas générale car il existe une multitude de types d'échangeurs, possédant des géométries, des configurations et même des modes de fonctionnement qui peuvent être très différents. Ainsi les échangeurs de chaleur sont classés selon plusieurs critères, par exemple le nombre et la nature des fluides qui les parcourent, le mode de transfert thermique, la compacité et bien d'autres [14].

Les échangeurs de chaleur constituent des appareils importants ayant un champ d'applications très large : la production d'énergie mécanique ou électrique à partir de l'énergie thermique ou nucléaire, le chauffage et le conditionnement d'air, la réfrigération etc [15].

## II.1 Principaux modes d'écoulement de deux fluides traversant un échangeur

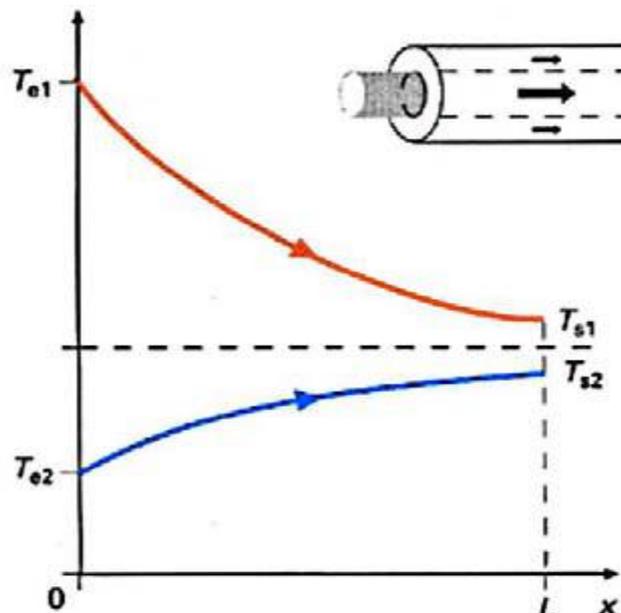
On peut distinguer trois modes d'écoulement différent :

- écoulement des deux fluides parallèles et de même sens.
- écoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires.
- écoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage.

### II.1.1 Ecoulement 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.

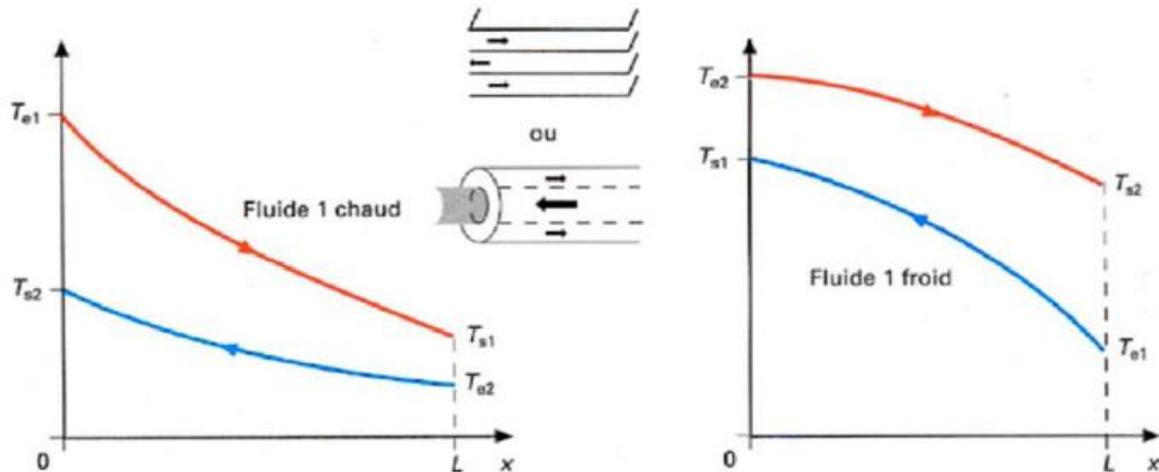
La (Figure II.1) donne l'évolution qualitative de ces températures le long d'un échangeur tubulaire à co-courants très simple. La longueur de l'échangeur a été portée en abscisse. Les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant entrée et s sortie, 1 désignant le fluide chaud et 2 le fluide froid.



**Figure II.1** Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant.

### II.1.2. Ecoulement 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 l'une des plus favorables pour l'échange thermique. De la même façon que précédemment, la longueur de l'échangeur considéré a été portée en abscisse (Figure II.2). Les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant entrée et s sortie.

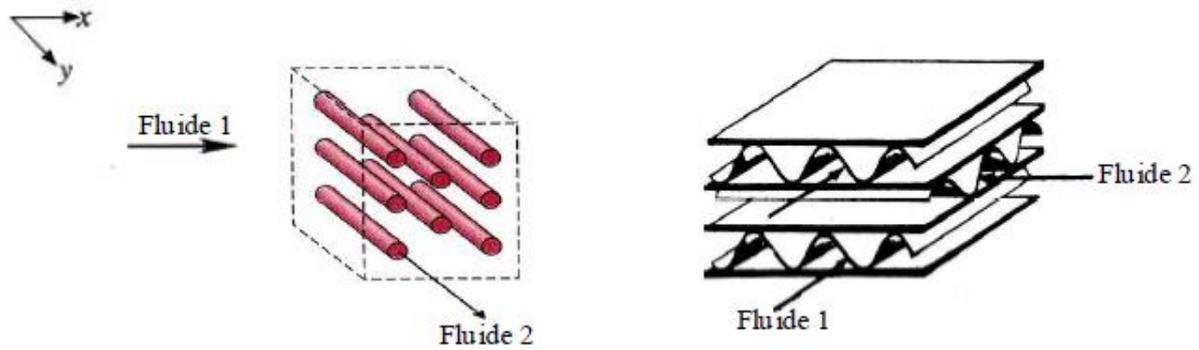


**Figure II.2** Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre-courants.

L'avantage de l'échangeur à contre-courants sur l'échangeur à co-courants est de nécessiter, pour un même flux de chaleur, des surfaces d'échanges plus faibles.

### II.1.3 Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre (Figure II.3). Le fluide non brassé est canalisé : c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section. L'autre fluide circule librement entre les veines et peut être considéré comme partiellement brassé du fait des tourbillons générés par les tubes. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide. Sans cela, les températures varient non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine. Une représentation schématique d'échangeurs à courants croisés est donnée figure II.3.



**Figure II.3** Exemples d'échangeurs à courants croisés.

Les trois écoulements précédemment décrits, à co-courants, à contre-courants, à courants croisés sont rarement utilisés dans toute leur simplicité. En effet, un échangeur se réduit rarement à un tube unique ou deux plaques ; néanmoins, l'étude de ces cas élémentaires, dans le cadre d'une première approche, est nécessaire : l'échangeur industriel étant en général constitué par un grand nombre de tubes ou de plaques créant ainsi des problèmes supplémentaires.

Par ailleurs, la conception des échangeurs de chaleur introduit le choix entre deux géométries élémentaires principales :

- les tubes qui fixent l'espace dévolu seulement à l'un des deux fluides.
- les plaques, plates ou ondulées, choisies pour un fluide qui imposent la même géométrie pour l'autre.

Souvent, le choix des combinaisons entre différents types d'échangeurs dans les installations industrielles résulte de contingences technologiques et économiques [16].

## II.2. Principal but et fonctions d'un échangeur thermique

La fonction principale de l'échangeur thermique est de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre à des niveaux de températures distincts. Les fonctionnalités des échangeurs thermiques sont extrêmement diverses et variées : les principales en sont les suivantes [17]:

\* Préchauffeur ou refroidisseur d'un liquide ou d'un gaz (air par exemple) pour lesquels de très nombreux exemples pourraient être rappelés et qui se caractérise par une fonction simple: le contrôle de la température du fluide en un point particulier du procédé.

\* Récupérateur thermique qui peut se confondre avec les deux cas précédemment cités mais dont la dénomination introduit une notion nouvelle : la valorisation de l'énergie thermique d'un procédé, cette énergie étant susceptible d'être perdue si un dispositif thermique n'est pas inséré dans le procédé. La récupération thermique est une des pratiques essentielles mise ou à mettre en œuvre pour tendre vers des efficacités énergétiques élevées dans les procédés industriels ou autres. La fonction de cet échangeur est alors d'assurer le transfert d'une capacité thermique maximale ou en tout état de cause permettre de valoriser au mieux le rejet thermique sur des critères énergétiques et économiques [18].

\*Réfrigérants (et aéro-réfrigérant) qui assure la dissipation de l'énergie thermique non valorisable d'un procédé vers le milieu extérieur – fonction essentielle dans de nombreux processus.

\*Capteurs ou émetteurs thermiques dont les équipements ont pour fonction, respectivement, d'associer réception d'énergie thermique et transmission vers l'utilisateur. Les exemples les plus courants sont les capteurs solaires thermiques ainsi que les radiateurs domestiques qui assurent le confort thermique dans un bâtiment.

\*Evaporateurs qui assurent l'évaporation complète ou partielle d'un liquide dans différents procédés notamment de production d'énergie mécanique (cycle moteur de Rankine, de Hirn) et de production frigorifique : cycle à compression (PAC), réfrigérateur. Condenseurs qui assurent la condensation complète ou partielle d'un gaz (vapeur) là encore par exemple pour la production d'énergie mécanique et frigorifique [17].

### **II.3.Critères de classement des échangeurs**

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. On cite les plus importants.

#### **II.3.1 Classement technologique**

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

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

**II.3.2 Classement suivant le mode de transfert de chaleur**

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

**II.3.3 Classement suivant le procédé de transfert de chaleur**

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement d'un échangeur en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :

- ✓ transfert sans stockage, donc fonctionnement en récupérateur, avec deux ou plusieurs passages et un écoulement en général continu ;
- ✓ transfert avec stockage, donc fonctionnement en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent.

**II.3.4 Classement fonctionnel**

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants :

- ✓ les deux fluides ont un écoulement monophasique.
- ✓ un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs.
- ✓ les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapocondenseurs.

**II.3.5 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange**

On retiendra deux types de paroi :

- ✓ les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- ✓ les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc [19].

### II.3.6 Classification selon la compacité de la surface d'échange

Cette autre classification, arbitraire, se base sur le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur et se divise en deux catégories : Échangeurs compacts et non-compacts.

### II.3.7 Classification suivant la construction

On distingue les échangeurs de chaleur tubulaires : double tubes coaxiaux, multitubulaire à tube et à calandre, échangeurs de chaleur à plaques-étanches, bobine de tôle en spirale, lamelles, etc [20].

## II.4 Etude détaillée des différents types d'échangeurs de chaleur

Les principaux types d'échangeurs de chaleur rencontrés dans l'industrie sont les suivants :

- les échangeurs tubulaires.
- les échangeurs à plaques.

### II.4.1 Echangeurs tubulaires

Les échangeurs tubulaires représentent encore près de la moitié des échangeurs thermiques les plus répandus. Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité contrebalancent leur encombrement. On distingue, le plus souvent, trois catégories [16]:

- **échangeur monotube** (Figure II.4.a), dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin.
- **échangeur coaxial** (ou "tube-in-tube") (Figure II.4.b), dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.
- **échangeur multitubulaire**, existant sous quatre formes :
  - **échangeur à tubes séparés** (Figure II.4.c) : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé,

• **échangeur à tubes rapprochés** (Figure II.4.d) : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans [19].

• **échangeur à tubes ailetés** (batteries à ailettes) (figure II.4.e) : ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique : 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 [16].

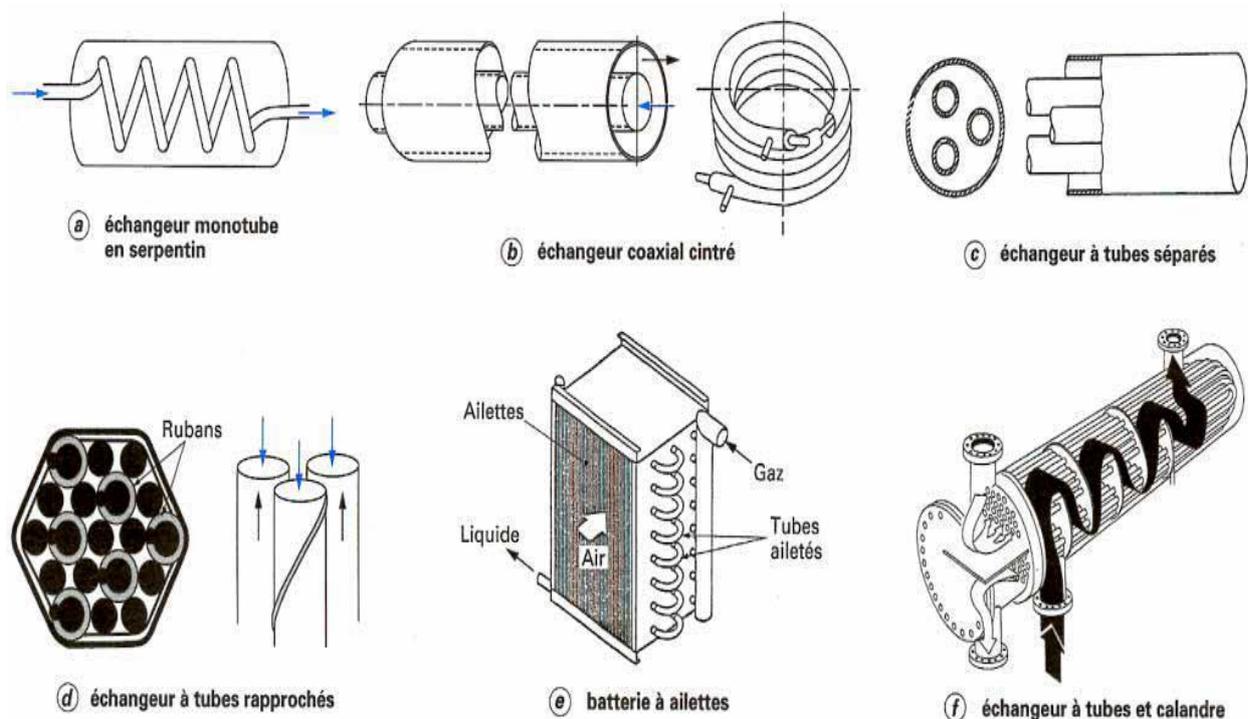
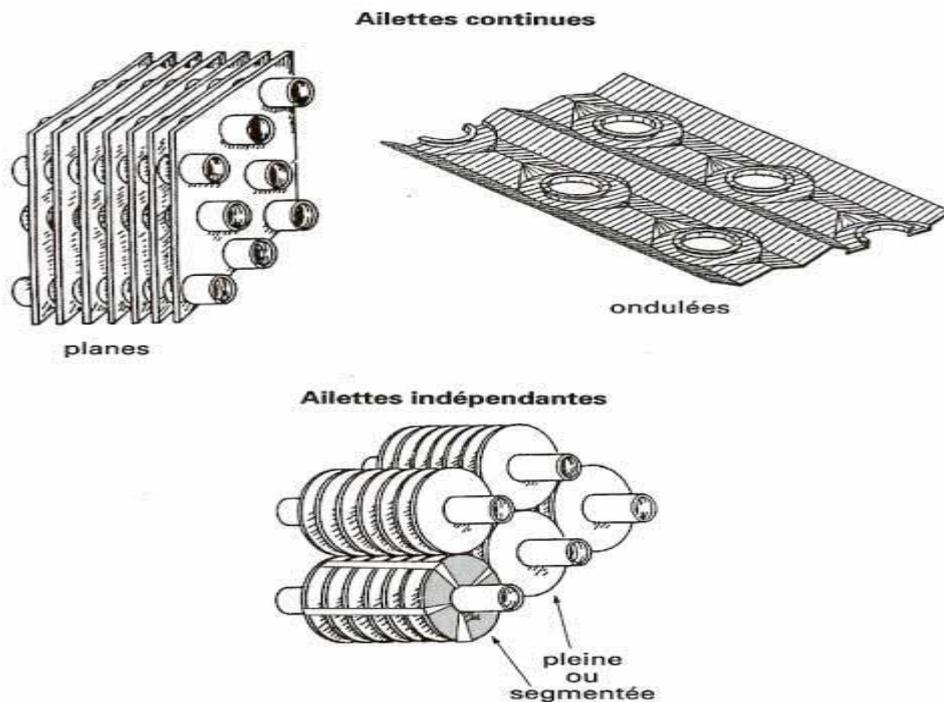


Figure II.4 Différents types d'échangeurs tubulaires [19].

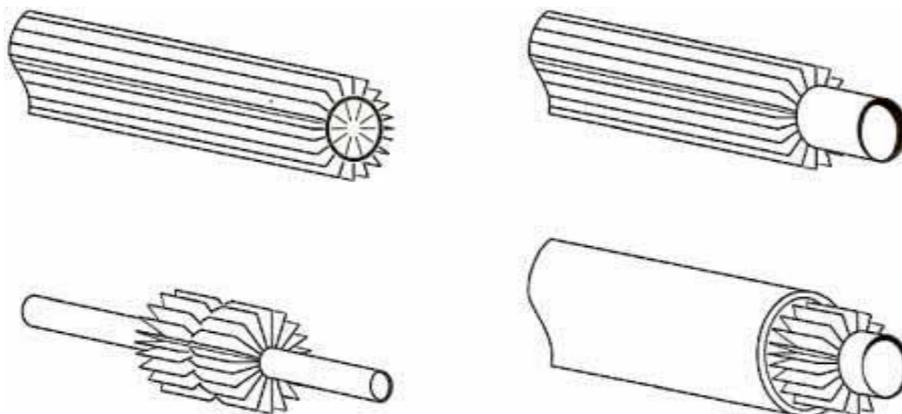
Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons :

- les ailettes transversales divisées en deux groupes (Figure II.5) : les ailettes continues qui sont traversées par plusieurs tubes et qui sont généralement de forme rectangulaire planes ou ondulées, et les ailettes indépendantes qui sont traversées par un seul tube et qui peuvent être annulaires ou hélicoïdales, pleines ou segmentées. Elles peuvent être aussi à fil préformé, poinçonnées ou en brosse [16].



**Figure II.5** Ailettes continues ou indépendantes pour tubes.

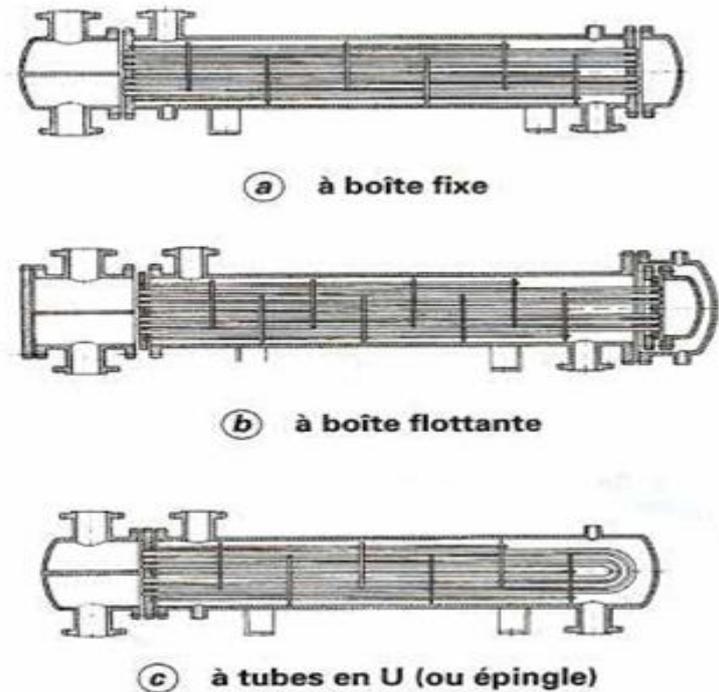
- les ailettes longitudinales qui sont disposées selon l'axe des tubes (Figure II.6) ; elles peuvent être situées à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes. Pour améliorer le transfert de chaleur, elles sont quelquefois localement torsadées.



**Figure II.6** Tubes avec différents types d'ailettes longitudinales [19].

• **échangeur à tubes et calandre** (Figure II.4.f) : où 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. Ils peuvent être à boîte fixe, à boîte flottante, ou à tubes en U avec une boîte à chaque extrémité de l'échangeur (Figure II.7). Les tubes peuvent être supportés par des chicanes afin d'augmenter la vitesse du

fluide dans la calandre dans le but d'améliorer le coefficient d'échange global thermique. Pour cela, un compromis doit être trouvé pour avoir simultanément un bon coefficient d'échange global et des pertes de charge acceptables [16].



**Figure II.7** Échangeur à tubes et calandre : principales technologies à boîte fixe, boîte flottante et à tubes en U [19].

#### II.4.2 Les échangeurs à plaques

Les échangeurs de la deuxième famille sont constitués par un empilement de plaques garnies de joints d'étanchéité à leur périphérie ; les fluides s'écoulent entre ces plaques dans des canaux plats ou la circulation peut être soit diagonale soit latérale. Il y a évidemment alternance du fluide froid et du fluide chaud d'un canal à l'autre. Les plaques peuvent être lisses ou corruguées (ondulées ou à cannelures en chevrons) afin d'intensifier l'échange de chaleur par l'augmentation de la turbulence et de la surface d'échange. La pression d'utilisation des échangeurs à plaques et joints est inférieure à 20 bars. La température usuelle maximale ne doit pas dépasser 250°C.

Les échangeurs à plaques se présentent sous diverses formes :

- les échangeurs à plaques hélicoïdales.
- les échangeurs à plaques planes.

- les échangeurs à plaques munies d'ailettes.
- les échangeurs à tubes munis d'ailettes.

Dans tous ces échangeurs, les surfaces d'échange sont très supérieures à celles des échangeurs à faisceau de tubes et calandre, pour un encombrement géométrique donné. En outre, les écoulements secondaires et les pertes de charge correspondantes sont éliminés ainsi que les problèmes de dilatation différentielle. Cependant leur réalisation est beaucoup plus délicate et onéreuse et ils ne sont généralement utilisés que pour des échanges ne nécessitant pas en valeur absolue de très grandes surfaces d'échange [10].

### **II.4.3 Autres types d'échangeurs**

Parmi les échangeurs thermiques, il convient également de citer les échangeurs où l'un des deux fluides change de phase. Il s'agit du cas particulier des évaporateurs – tubulaires ou à plaques – où le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, et des condenseurs – tubulaires ou à plaques – où le fluide chaud passe de l'état gazeux à l'état liquide. Ils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide ou produire de la vapeur.

Pour résoudre ses problèmes d'échanges thermiques, l'utilisateur se trouve devant une grande variété de produits, dont les principales catégories sont, rappelons-le, les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques. Toutefois, la technologie de ces types d'échangeurs porte surtout sur l'utilisation de nouveaux matériaux ainsi que sur les conditions d'amenée des fluides. Les matériaux les plus utilisés dans les échangeurs sont les aciers inoxydables et le titane, mais d'autres matériaux sont également employés, notamment pour limiter l'effet des phénomènes de corrosion, comme le graphite, la céramique, le verre et les plastiques. L'objectif est d'améliorer la résistance des échangeurs afin de les rendre plus fiables lorsqu'ils sont utilisés dans des cycles thermiques. Une autre technologie vise à diminuer l'encombrement des échangeurs par le développement d'échangeurs compacts ou même de micro échangeurs.

Sont encore des échangeurs, mais un peu moins courants, les appareils suivant :

- les échangeurs à lit fluidisé.
- les échangeurs à contact direct.
- les échangeurs à fluide complexe.

## II.5 L'encrassement des échangeurs

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte un grand nombre d'opérations industrielles [16].

Les types d'encrassement les plus rencontrés sont souvent classés en différentes catégories :

- l'encrassement particulaire.
- l'encrassement par corrosion.
- l'encrassement par entartrage.
- l'encrassement biologique.
- l'encrassement par réaction chimique.
- l'encrassement par solidification.

### II.5.1 Encrassement particulaire

Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation sur les surfaces d'échange de particules transportées par l'écoulement des fluides industriels tels que :

- l'eau des chaudières contenant des produits de corrosion, celle des tours de refroidissement, des particules transportées par l'air et des produits de corrosion (oxydes et hydroxydes de fer).
- les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- les fumées industrielles de résidus solides de combustion.

### II.5.2 Corrosion

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement. Les produits de la réaction qui se forment et restent sur la surface d'échange créent l'encrassement. Il s'agit là d'un mécanisme de corrosion in situ. Lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générés exemple situ, l'encrassement correspondant est du type particulaire.

### II.5.3 Entartrage

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc de la composition de l'eau industrielle.

Lorsque les sels dissous sont, comme le carbonate de calcium, à solubilité inverse, le liquide devient sursaturé au voisinage de la surface d'échange plus chaude ; la cristallisation se produit alors sur la surface et le dépôt est dur et adhérent ; dans le cas contraire d'une cristallisation se produisant au sein même d'un liquide plus chaud que la surface, le dépôt est plus mou et friable. L'encrassement par les sels à solubilité normale existe, même s'il est plus rare ; il faut signaler le cas des solutions salines géothermales à forte teneur en silice.

L'entartrage peut se produire dans les échangeurs refroidis à l'eau, dans les unités de dessalement d'eau de mer ou saumâtre, dans les chaudières et dans les échangeurs de l'industrie agroalimentaire.

#### **II.5.4 Encrassement biologique**

Il est dû au développement de micro-organismes (bactéries, algues ou champignons) qui créent un film au contact de la surface d'échange : il peut même, à l'échelle macroscopique, être caractérisé par le développement de coquillages.

Les actions de prévention consistent soit à détruire les micro-organismes, soit à empêcher leur développement. Les traitements correspondants utilisent des biocides et il est essentiel de maintenir la concentration du produit pendant le temps de réaction. Le biocide le plus utilisé est le chlore qui est toxique pour la plupart des micro-organismes et a une action rapide. Le choix final du traitement à adopter est en général un compromis entre les problèmes de toxicité, de pollution, de coût et de maintenance.

La tendance à l'encrassement biologique est naturelle puisque les bactéries sont omniprésentes dans l'eau ; en outre, les conditions physico-chimiques rencontrées dans les échangeurs sont le plus souvent favorables à son développement.

#### **II.5.5 Encrassement par réaction chimique**

On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation ; il en résulte la formation d'un dépôt.

Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (traitement thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques.

**II.5.6 Encrassement par solidification**

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace à l'intérieur des conduites forcées ou de givre) ou du dépôt d'un constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide (dépôt d'hydrocarbures paraffiniques). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation du givre).

**II.5.7 Modes combinés**

La plupart des dépôts réels sont le résultat de la combinaison d'au moins deux des types précédemment décrits. Dans les échangeurs refroidis à l'eau par exemple, les dépôts peuvent provenir de l'entartrage, de l'encrassement particulaire, de la corrosion in situ et de l'encrassement biologique. Au stade initial de la formation du dépôt, un type peut prédominer et accélérer ainsi la contribution des autres. Si quelques progrès ont été réalisés dans la compréhension du mode d'action des types élémentaires, leurs interactions restent encore bien souvent difficiles à préciser [21].

# **Chapitre III**

## **Conception De La Simulation**

### **Hysys De L'échangeur**

#### **Étudié**

### **III.1 Introduction**

Le but de cette étude est de simuler le fonctionnement d'un échangeur de chaleur multi-tubulaire opérant à contre-courant au moyen du logiciel Aspen Hysys. Le problème s'agit, en premier lieu, de trouver le débit massique nécessaire de vapeur d'eau, surchauffée à 250 °C, passant coté tubes dans l'échangeur pour chauffer un débit d'eau liquide de 55.21 kg/h à 25 °C, entrant dans l'échangeur, à contre-courant, coté calandre, et devant être chauffé jusqu'à une température de 150 °C.

Avant de concevoir la simulation avec le logiciel Hysys, l'utilisateur doit savoir effectuer les étapes suivantes :

- démarrer Hysys.
- sélectionner les composants.
- sélectionner le modèle thermodynamique à utiliser.
- ajouter et spécifier des flux de matière entrant et quittant l'échangeur de chaleur.

### **III.2 Enoncé du problème**

Un débit de vapeur d'eau à 250°C et 1000 psig est utilisé pour chauffer un courant d'eau froide dans un échangeur de chaleur à tube et calandre. La température et la pression d'entrée du courant froid est respectivement de 25°C et 130 psig. Les températures de sortie des courants froid et chaud sont respectivement de 150°C et 190°C. Si le débit du courant froid est de 55.21 kg/h, on cherche en premier lieu à déterminer le débit de la vapeur d'eau (courant chaud) à utiliser et passant à travers l'échangeur coté tubes. En deuxième lieu, le but de cette étude serait aussi de chercher les moyens à mettre en œuvre pour minimiser le débit de vapeur d'eau afin de minimiser la consommation énergétique au niveau de la chaudière au niveau de laquelle est généré le débit de vapeur d'eau.

### **III.3 Principales étapes de la simulation**

1. Utiliser l'échangeur de chaleur à tube et calandre du logiciel Hysys.
2. Définir les conditions d'entrée et de sortie pour les courants indiqués dans l'énoncé du problème.
3. Obtenir le débit massique du courant chaud.
4. Chercher les moyens à mettre en œuvre pour minimiser le débit de vapeur d'eau.

### III.4 Elaboration de la simulation avec le logiciel Hysys

On active le logiciel Hysys et on effectue les opérations suivantes :

1. Définition de la liste des composants (Eau : H<sub>2</sub>O).
2. Spécification du modèle thermodynamique à utiliser (Peng-Robinson).
3. On clique sur le bouton **Enter Simulation Environment** afin de spécifier les courants de matière représentatif des courants chaud et froid.
4. On ajoute les informations relatives au courant de matière chaud avec les valeurs indiquées au niveau du tableau III.1.

**Tableau III.1** Informations relatives au courant de matière chaud (vapeur d'eau).

Nom	Tube in
Température	250°C
Pression	1000 psig
Débit massique	--
Composition	H <sub>2</sub> O (100%)

5. On ajoute un courant de matière froid avec les informations indiquées au niveau du tableau III.2

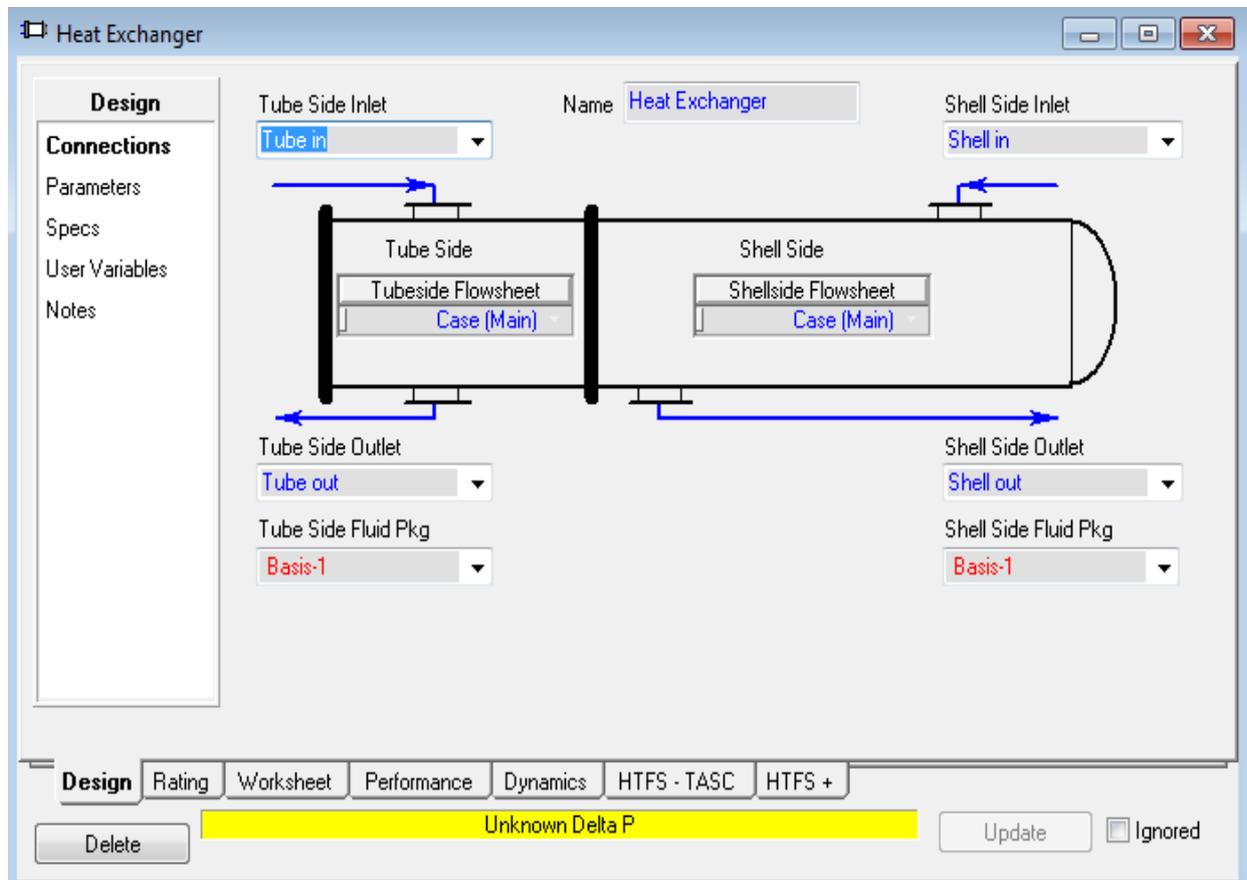
**Tableau III.2** Informations relatives au courant de matière froid (Eau liquide)

Nom	Shell in
Température	25°C
Pression	130psig
Débit massique	55.21 kg/h
Composition	H <sub>2</sub> O (100%)

### III.5 Ajout d'un échangeur de chaleur dans l'environnement de simulation

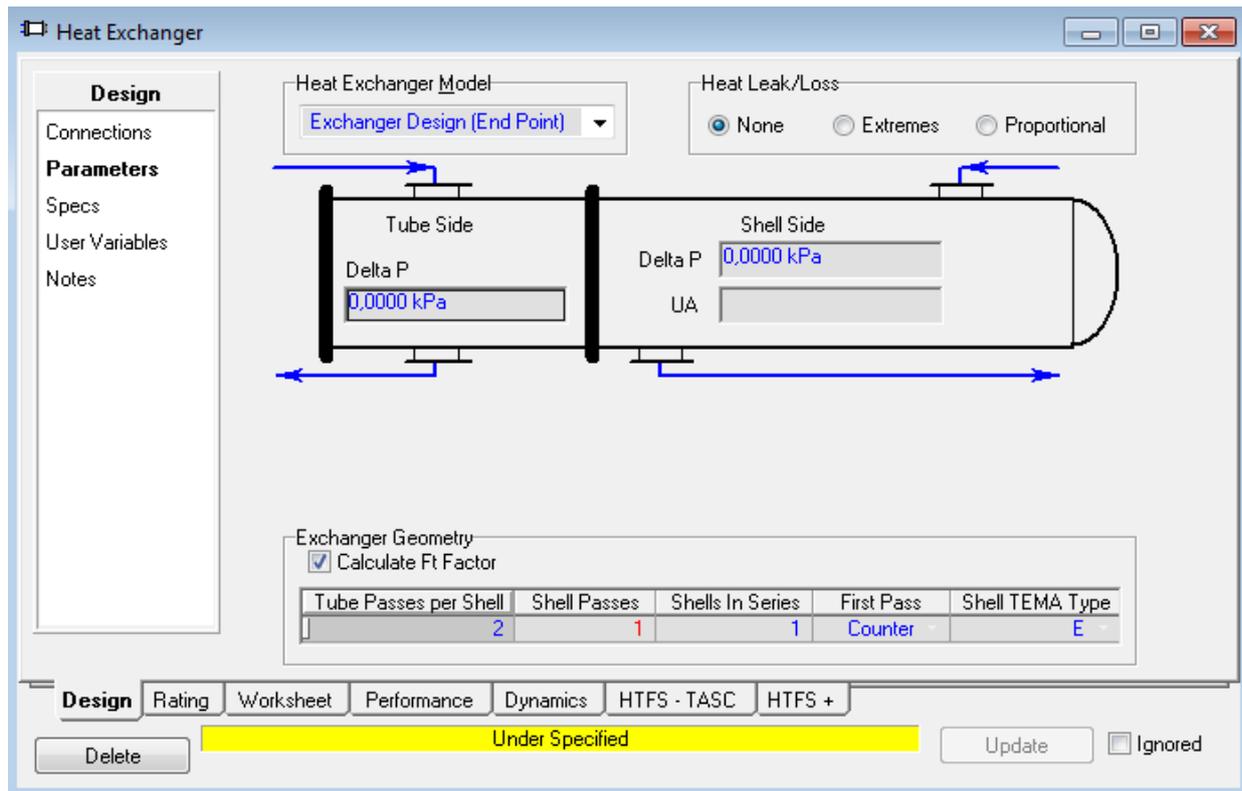
La simulation de l'échangeur de chaleur effectue des calculs de bilans d'énergie et de matière. La simulation de l'échangeur de chaleur est capable de déterminer les températures, les pressions, les flux de chaleur (y compris les pertes de charge et la déperdition de chaleur), ainsi que les débits des courants de matières. Pour créer la fenêtre de l'échangeur, on procède comme suit :

1. On double-clique sur le bouton de **Heat Exchanger** sur **Object Palette**.
2. Sur la page des **Connexions**, on fait entrer les informations suivantes comme le montre la (Figure III.1).



**Figure III.1** Fenêtre de simulation de l'échangeur : spécifications des entrées et sorties des courants de matière.

3. Ensuite on passe à la page des **Paramètres**, et on fait entrer les informations comme indiqué sur la (Figure III.2). Les chutes de pression pour les côtés tube et calandre seront d'abord négligées ainsi que les déperditions de chaleur.



**Figure III.2** Fenêtre de simulation de l'échangeur : spécification des valeurs des pertes de charge et des pertes de chaleur.

- On passe à l'onglet **Worksheet**. Dans la page des **Conditions**, on fait entrer les informations comme indiqué dans la (Figure III.3). Les températures de sortie des courants de matière coté calandre et coté tubes seront, respectivement, spécifiées à 150 °C et 190 °C.

La figure III.3 montre que la simulation de l'échangeur a été effectuée avec succès comme le confirme la barre horizontale verte et le débit du courant chaud (vapeur d'eau) cherché a été trouvé égal à 100 kg/h. Par la suite, on va utiliser le tableau numérique des résultats de la simulation pour chercher les dispositions à prendre pour minimiser le débit de la vapeur d'eau afin de minimiser la consommation énergétique dans la chaudière.

Worksheet	Name	Tube in	Tube out	Shell in	Shell out
Conditions	Vapour	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Properties	Temperature [C]	250,0	190,0	25,00	150,0
Composition	Pressure [kPa]	6996	6996	997,6	997,6
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	5,551	5,551	3,065	3,065
	Mass Flow [kg/h]	100,0	100,0	55,21	55,21
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	0,1002	0,1002	5,532e-002	5,532e-002
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,674e+005	-2,729e+005	-2,862e+005	-2,763e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	99,82	88,74	53,69	81,35
	Heat Flow [kJ/h]	-1,485e+006	-1,515e+006	-8,771e+005	-8,468e+005

Figure III.3 Tableau numérique des résultats de la simulation de l'échangeur multi-tubulaire

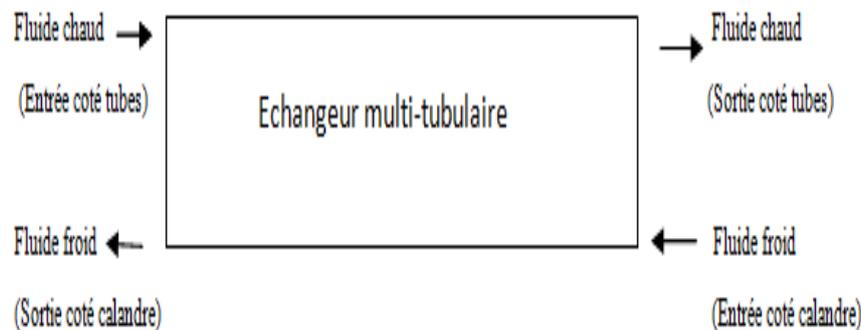
**Chapitre IV**

**Résultats Et**

**Discussion**

## IV.1 Introduction

Dans le présent chapitre, on va présenter les résultats donnés par le logiciel Aspen Hysys relatifs à la simulation de l'échangeur multi-tubulaire. On a effectué une simulation de l'échangeur pour obtenir la valeur du débit du fluide chaud (vapeur d'eau surchauffée) nécessaire pour chauffer un débit de 55 kg/h d'eau liquide de 25 à 150 ° C. Par la suite, on a étudié la variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de paramètres opératoires. Les courants de fluide chaud et de fluide froid circulent dans l'échangeur à contre-courant, le fluide chaud entre coté tubes et le fluide froid entre coté calandre (Figure IV.1).



**Figure IV.1** Schéma simplifié de l'échangeur multi-tubulaire étudié.

## IV.2 Détermination de la valeur du débit du fluide chaud (vapeur surchauffée) provenant de la chaudière

On a effectué la simulation de l'échangeur multi-tubulaire au moyen du logiciel Hysys pour déterminer la valeur du débit du fluide chaud (vapeur d'eau surchauffée) nécessaire pour chauffer un débit de 55 kg/h d'eau liquide de 25 à 150 ° C. On donc fait entrer dans le logiciel les données suivantes :

$P_{Shell\ in} = 10$  Bars (pression d'entrée du fluide froid).

$P_{tube\ in} = 70$  Bars (pression d'entrée du fluide chaud).

$T_{tube\ in} = 250$  °C (température d'entrée du fluide chaud).

$T_{Shell\ in} = 25$  °C (température d'entrée du fluide froid).

Le logiciel Hysys utilise automatiquement les données suivantes :

$n = 160$  (nombre de tubes).

$L = 6$  mètres (longueur des tubes).

$T_p = 5$  cm (pas des tubes).

$e_T = 2$  mm (épaisseur des tubes).

$B_s = 80$  cm (espacement des chicanes dans la calandre).

$T_L = 30^\circ$  (disposition des tubes).

$S_d = 73.9$  cm (diamètre de la calandre).

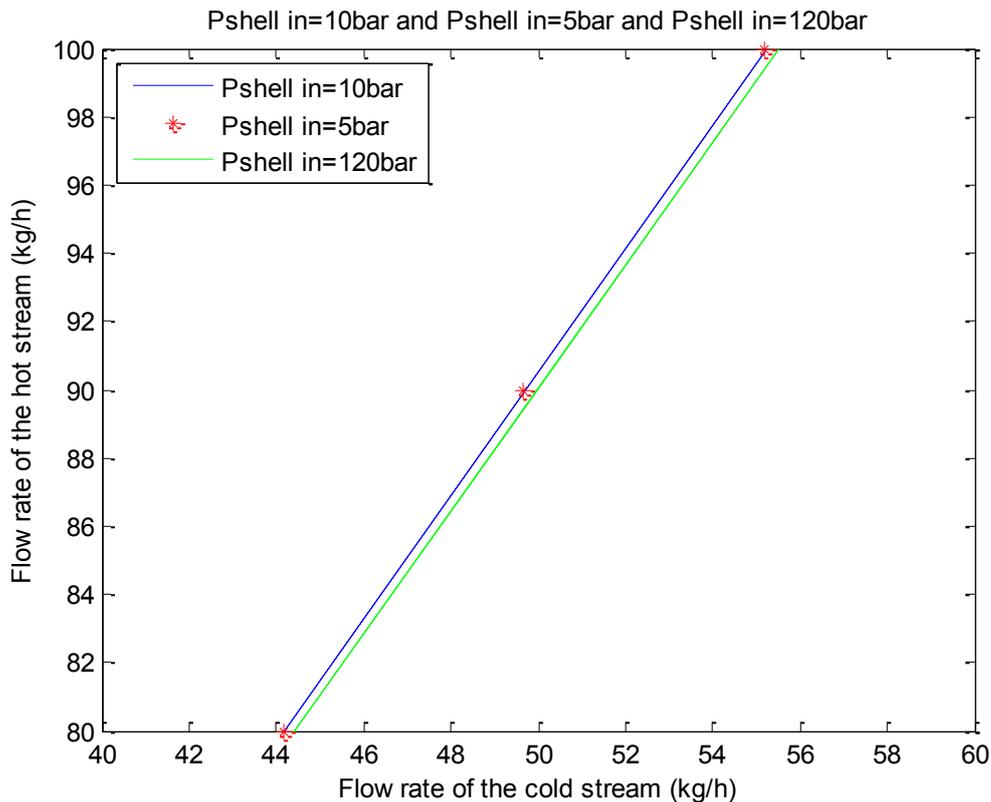
Après avoir fait la simulation de l'échangeur, le logiciel donne une valeur du débit du fluide chaud égale à 100 kg/h ( $Q_{HS} = 100$  kg/h).

#### **IV.2.1 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de paramètres opératoires**

Dans ce qui suit, on va étudier la variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de paramètres opératoires. Tel que la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ), la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ), la température d'entrée du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ) ainsi que la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ).

##### **IV.2.1.1 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ )**

La (Figure IV.2) montre la variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour des pressions d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ) égales à 5, 10 et 120 Bars.

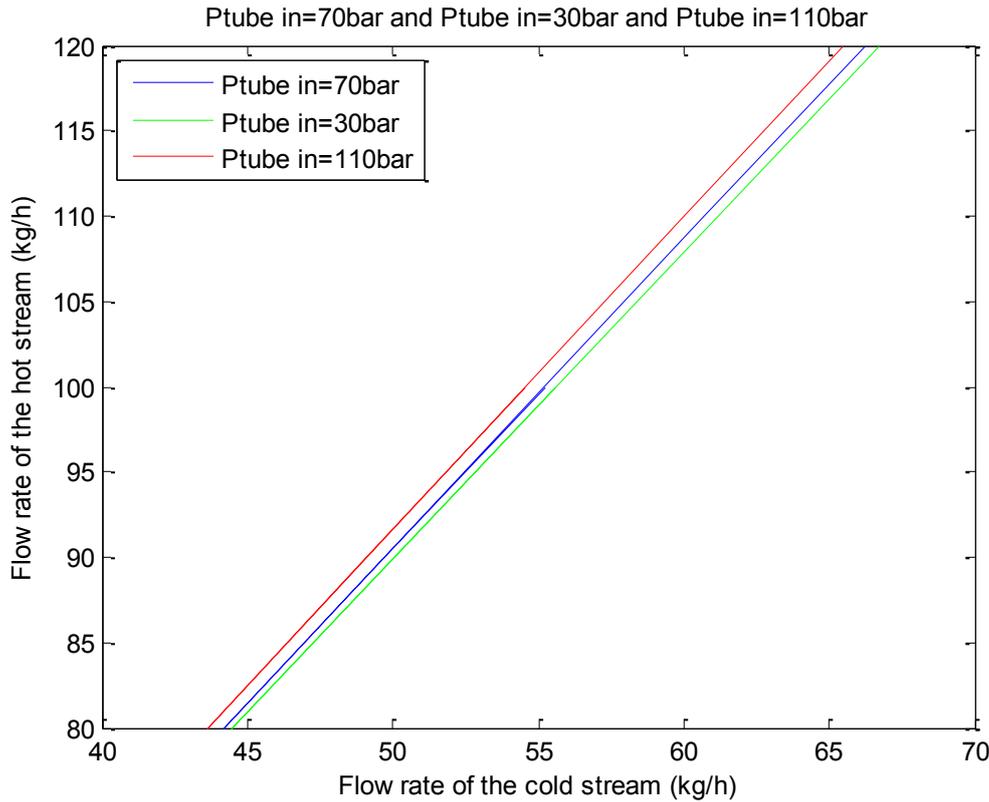


**Figure IV.2** Débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs des pressions d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ).

La figure IV.2 montre que pour une valeur donnée de la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ), le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) augmente quand le débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) augmente. La figure IV.2 montre aussi que pour un débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) donné, le débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) nécessaire diminue si la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ) diminue. Enfin, il ressort également de la figure IV.2 que pour un débit du fluide froid ( $Q_{CS}$ ) donné, le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) diminue quand la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ) augmente. Par conséquent, si on cherche à diminuer le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ), afin de minimiser la consommation énergétique au niveau de la chaudière, il faudrait augmenter autant que possible la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ).

#### IV.2.1.2 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ )

La (Figure IV.3) montre la variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour des pressions d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ) égales à 30, 70 et 110 Bars.



**Figure IV.3** Débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs des pressions d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ).

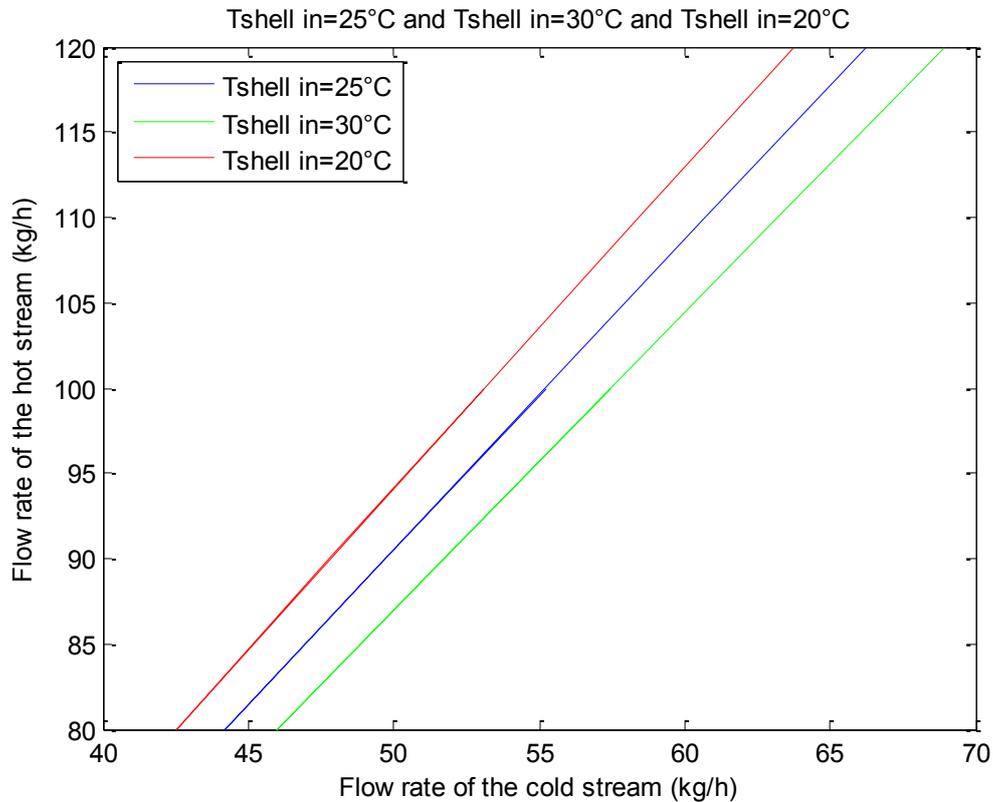
La figure IV.3 montre que pour une valeur donnée de la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ), le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) augmente quand le débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) augmente. La figure IV.3 montre aussi que pour un débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) fixé, le débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) nécessaire diminue si la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ) augmente.

Enfin, il apparaît également de la figure IV.3 que pour un débit du fluide froid ( $Q_{CS}$ ) donné ou fixé, le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) diminue quand la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ) diminue. Par conséquent, si on cherche à diminuer le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ), afin de minimiser la consommation énergétique, il faudrait diminuer autant que possible la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ).

#### IV.2.1.3 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la température d'entrée du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ )

La (Figure IV.4) montre la variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du

débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour des température d'entrée du fluide du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ) égales à 20, 25 et 30 °C.



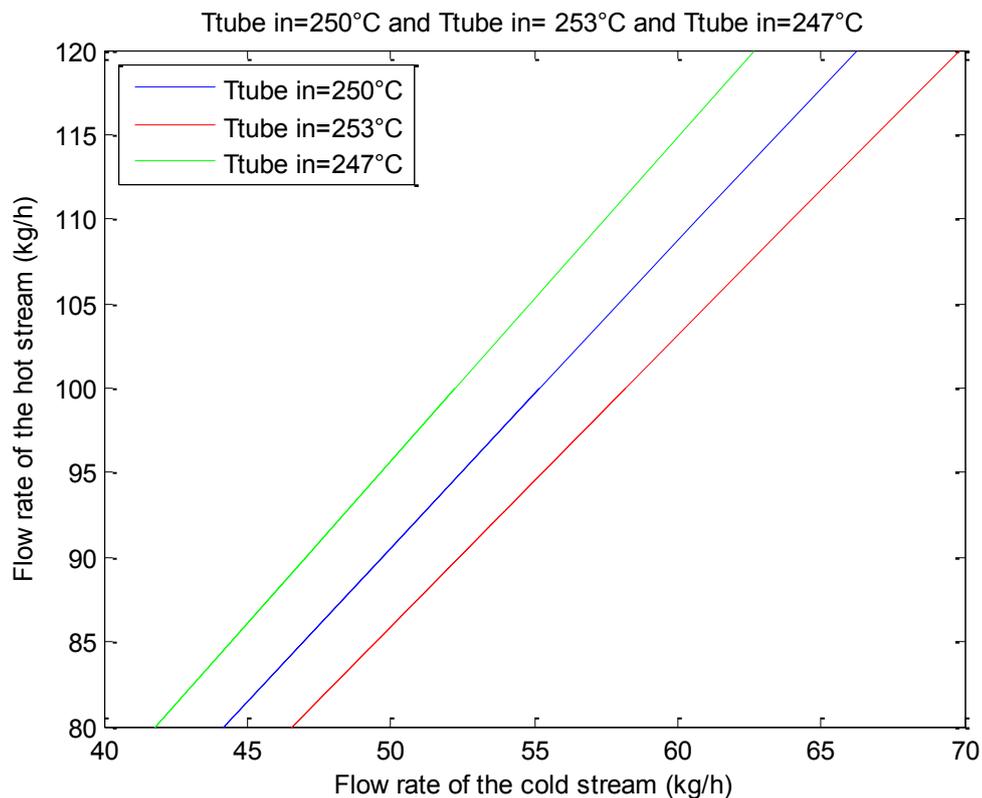
**Figure IV.4** Débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la température d'entrée du fluide du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ).

La figure IV.4 montre que pour une valeur donnée de la température d'entrée du fluide du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ), le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) augmente quand le débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) augmente. La figure IV.4 montre aussi que pour un débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) fixé ou précisé, le débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) nécessaire diminue si la température d'entrée du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ) diminue.

Enfin, il apparaît de la figure IV.4 que pour un débit du fluide froid ( $Q_{CS}$ ) donné ou fixé, le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) diminue quand la température d'entrée du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ) augmente. Par conséquent, si on cherche à diminuer le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ), afin bien sûr de minimiser la consommation énergétique, il faudrait augmenter modérément la température d'entrée du fluide froid ( $T_{shin}$ ).

#### IV.2.1.4 Variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ )

La (Figure IV.5) montre la variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour des température d'entrée du fluide du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ) égales à 247, 250 et 253 °C.



**Figure IV.5** Débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de la température d'entrée du fluide du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ).

La figure IV.5 montre que pour une valeur donnée de la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ), le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) augmente quand le débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) augmente. La figure IV.5 montre aussi que pour un débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) fixé, le débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) nécessaire diminue si la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ) diminue. Enfin, il apparaît aussi de cette figure que pour un débit du fluide froid ( $Q_{CS}$ ) fixé, le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) diminue quand la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ) augmente. Par conséquent, si on cherche à diminuer le débit du fluide chaud ( $Q_{HS}$ ), afin de minimiser la consommation énergétique, il faudrait augmenter modérément la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ).

## Conclusion Générale

---

### Conclusion Générale

Dans ce travail on a utilisé un logiciel de simulation bien connu (Aspen Hysys) pour simuler le fonctionnement d'un échangeur de chaleur multi-tubulaire de type 2-1 (deux entrées coté tubes et une entrée coté calandre). Le cas que nous avons simulé correspond à une situation dans laquelle il faut déterminer, par simulation, la valeur du débit du fluide chaud (vapeur surchauffée) nécessaire pour chauffer et vaporiser un courant de fluide froid (courant d'eau liquide). En second lieu, nous avons utilisé le logiciel de simulation (Hysys) pour étudier la variation du débit de fluide chaud ( $Q_{HS}$ ) en fonction du débit de fluide froid ( $Q_{CS}$ ) pour différentes valeurs de paramètres opératoires, en l'occurrence : la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ), la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ), la température d'entrée du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ) ainsi que la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ) ; et cela pour déterminer dans quels cas le débit de fluide chaud serait minimal en vue de minimiser la consommation énergétique au niveau du générateur de vapeurs (chaudière).

Les principaux résultats obtenus montrent que le débit de fluide chaud serait minimal et donc la consommation énergétique serait aussi minimale si on prenait les dispositions suivantes :

- Une augmentation de la pression d'entrée du fluide froid ( $P_{Shell\ in}$ ).
- Une diminution de la pression d'entrée du fluide chaud ( $P_{tube\ in}$ ).
- Une augmentation modérée de la température d'entrée du fluide froid ( $T_{Shell\ in}$ ).
- Une augmentation modérée de la température d'entrée du fluide chaud ( $T_{tube\ in}$ ).

## *Références Bibliographiques*

- [01]: S. Boughali; Transfert de chaleur par conduction; Université Kasdi Merbah Ouargla; (2013/2014).
- [02]: D. Ronze; Introduction au génie des procédés; (2008).
- [03]: P. Marty; Cours de transferts thermiques (Conduction et rayonnement); Université Joseph Fourier Grenoble; (2012).
- [04]: A. Bölscs; Transmission de chaleur (volume I); Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne; (1997).
- [05]: E. Mazria; The passive solar energy book; (1979).
- [06]: J. Fourier; Transfert thermique "théorie analytique de la chaleur"; IUP Génie civil, (1822).
- [07]: F. Doumenc; Eléments de thermodynamique et thermique (version 1.2); Paris VI; (2009/2010).
- [08]: J. P. Moulin; Génie des procédés, génie chimique (Tome 2); Ecole centrale Paris; (2004/2005).
- [09]: A. Giovannini, B. Bédard; Transfert de chaleur; (2012).
- [10]: N. Benayad; Etude et optimisation des échangeurs de chaleur; Mémoire de Magister en Physique; Université Mentouri Constantine; (2008).
- [11]: P. Roux; Cours de thermique; (2006).
- [12]: S. Mergui; Transferts thermiques [[www.fast.upsud.fr/~mergui/2A101/cours\\_thermique\\_L.pdf](http://www.fast.upsud.fr/~mergui/2A101/cours_thermique_L.pdf)] (20/02/2017).
- [13]: J. Brau; Conduction; INSA de Lyon; (2006).

**[14]:** M. Legay; Intensification des processus de transfert de chaleur par ultrasons, vers un nouveau type d'échangeur de chaleur : l'échangeur vibrant ; Thèse de Doctorat; Université de Grenoble; (2012).

**[15]:** F. Tahrouz; Modélisation et optimisation des échangeurs de chaleur à ailettes indépendantes; Thèse de Doctorat; Université El Hadj Lakhder Batna; (2016).

**[16]:** L. Perez; Développement; Etude de performances et intégration de sondes thermiques pour la caractérisation de l'encrassement d'échangeurs tubulaires à courants croisés; Thèse Doctorat école nationale supérieure d'arts et métier, Bordeaux; (2003).

**[17]:** C. Weber, A. Magnificat; Les échangeurs de chaleur; (2016).

**[18]:** C. Marvillet, C. Weber, A. Manificat; Echangeurs thermiques: Technologies, Conception et dimensionnement (e. Book Tome 1); (2014).

**[19]:** A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier, R. Vidil; Description des échangeurs; Technique de l'ingénieur [B 2 341].

**[20]:** K. Baadache; Etude des performances des échangeurs de chaleur à doubles tubes concentriques et calandre; Thèse de Doctorat; Université de Batna; (2015).

**[21]:** A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier, R. Vidil; Problèmes de fonctionnement; Technique de l'ingénieur [B 2 344].

## Résumé

Dans ce mémoire on a étudié par le logiciel de simulation Aspen Hysys, l'influence d'importants paramètres opératoires sur le fonctionnement d'un échangeur de chaleur multi-tubulaire. Les paramètres sont : la pression d'entrée du courant froid ( $P_{\text{Shell in}}$ ), la pression d'entrée du courant chaud ( $P_{\text{tube in}}$ ), la température d'entrée du courant froid ( $T_{\text{Shell in}}$ ), ainsi que la température d'entrée du courant chaud ( $T_{\text{tube in}}$ ). Les résultats trouvés ont montré comment devraient être ces paramètres pour avoir un débit du fluide chaud minimal afin de réduire la consommation énergétique dans la chaudière.

**Mots clés:** échangeur multi-tubulaire, Aspen Hysys, simulation, consommation énergétique, chaudière.

## Abstract

In this thesis we studied, by Aspen Hysys simulation software, the influence of important operating parameters on the functioning of a multi-tubular exchanger. The parameters were : the cold stream inlet pressure ( $P_{\text{tube in}}$ ), the hot stream inlet pressure ( $P_{\text{Shell in}}$ ), the cold stream inlet temperature ( $T_{\text{Shell in}}$ ) and the hot stream inlet temperature ( $T_{\text{tube in}}$ ). The obtained results showed how must be these parameters to obtain a minimal hot stream flow rate in order to reduce the energy consumption in the boiler.

**Keywords:** multi-tubular exchanger, Aspen Hysys, simulation, energy consumption, boiler.

## ملخص

في هذه الأطروحة درسنا بواسطة برنامج المحاكاة Aspen Hysys تأثير إعدادات مهمة على تشغيل مبادل حراري متعدد الأنابيب. الإعدادات هي : ضغط دخول التيار البارد ( $P_{\text{tube in}}$ )، ضغط دخول التيار الساخن ( $P_{\text{Shell in}}$ )، درجة حرارة دخول التيار البارد ( $T_{\text{Shell in}}$ ) و درجة حرارة دخول التيار الساخن ( $T_{\text{tube in}}$ ). النتائج المتحصل عليها تشير كيف يجب أن تكون هذه الإعدادات للحصول على أدنى تدفق التيار الساخن قصد تخفيض استهلاك الطاقة داخل الغلاية.

**الكلمات المفتاحية:** مبادل حراري متعدد الأنابيب، Aspen Hysys، محاكاة، استهلاك الطاقة، غلاية.