



Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

CONTRIBUTION A L'ETUDE ET AU DIMENSIONNEMENT D'UN ECHANGEUR  
DE CHALEUR A FAISCEAU TUBULAIRE ET CALANDRE

Présenté par : TIRECHE ANIS

Encadreur : Pr MZAD H.

Université Badji Mokhtar Annaba

### Jury de Soutenance:

ADJABI Rachid	Professeur	U.B.M.A.	Président
MZAD Hocine	Professeur	U.B.M.A.	Encadrant
DJEMILI Abdelwahab	Maitre de Conférences	U.B.M.A.	Examinateur

Année Universitaire :2022/2023

## Remerciements

*En préambule à ce projet, je remercie ALLAH qui m'aide et m'a donné la patience et le courage durant ces longues années d'études.*

*J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur le docteur MZAD Hocine, à qui j'exprime toutes ma reconnaissance, de m'avoir encadré et encouragé tout le long de mon stage. Merci pour sa bonne volonté, sa patience et ses précieux conseils ainsi que pour la pertinence de ses remarques.*

*J'exprime aussi mes vifs remerciements aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs remarques.*

*Je ne saurai jamais assez remercier la lumière de ma vie, mes parents ainsi que ma chère femme et ma belle-mère, qui, grâce à leurs prières et leurs encouragements, m'ont permis de surmonter tous les obstacles et de mener à bien mes études universitaires.*

*Pour conclure, je souhaite adresser mes remerciements à tout l'ensemble du personnel du département et de la faculté des sciences, ainsi que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

## Dédicaces

*A mes très chers parents « Azzedine Tireche » et « Sihem Dendani », source de vie et d'affection*

*A ma femme « Laura Tireche » et ma belle-mère « Sandrine Durand », source d'amour et d'espoir.*

*A mon frère « Hamza Tireche » et ma chère sœur « Zahia Abdelaoui » et son enfant « Youssef Abdelaoui », source de joie et de bonheur*

*A toute ma famille, source d'espoir et de motivation*

*A tous mes amis*

*A vous chers lecteurs*

## Résumé

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre sans les mélanger. Le flux thermique y traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. L'intérêt du dispositif réside dans la séparation des deux circuits et dans l'absence d'autres échanges que la chaleur, qui maintient les caractéristiques physico-chimiques (pression, concentration en éléments chimiques...) de chaque fluide inchangé hormis leur température ou leur état. Un échangeur se caractérise par les fluides en présence, le but recherché et la puissance à mettre en œuvre ; ces critères déterminent sa forme et ses dimensions optimales. Dans le contexte de ce travail, nous avons présenté quelques types d'échangeurs de chaleur avec leurs classifications selon le principe d'action, d'écoulement et de construction. L'objectif de ce mémoire est de connaître généralement tous les types des échangeurs de chaleurs et leurs classifications et spécialement les composants et le comportement d'un échangeur de chaleur à tube et calandre et son fonctionnement ainsi que la méthode de calcul « DTLM et NUT »

## ملخص

المبادل الحراري هو جهاز لنقل الطاقة الحرارية من مائع إلى آخر دون خلطها. يمر التدفق الحراري هناك عبر سطح التبادل الذي يفصل السوائل. تكمن ميزة الجهاز في فصل الدائرتين وفي حالة عدم وجود تبادلات أخرى غير الحرارة، مما يحافظ على الخصائص الفيزيائية والكيميائية (الضغط، تركيز العناصر الكيميائية، إلخ) لكل مائع دون تغيير باستثناء درجة حرارتها. أو حالتهم. يتميز المبادل بالسوائل الموجودة والغرض المطلوب والقوة المطلوب تنفيذها؛ تحدد هذه المعايير شكلها وأبعادها الأمثل. في سياق هذا العمل، قدمنا بعض أنواع المبادلات الحرارية مع تصنيفاتها وفقاً لمبدأ العمل والتدفق والبناء. الهدف من هذه الرسالة هو التعرف بشكل عام على جميع أنواع المبادلات الحرارية وتصنيفاتها وخاصة مكونات وسلوك المبادل الحراري للقذيفة والأنبوب وتشغيله وكذلك طريقة الحساب "DTLM" و "NUT"

## **Summary**

A heat exchanger is a device for transferring thermal energy from one fluid to another without mixing them. The heat flux there passes through the exchange surface which separates the fluids. The advantage of the device lies in the separation of the two circuits and in the absence of other exchanges than heat, which maintains the physico-chemical characteristics (pressure, concentration of chemical elements, etc.) of each fluid unchanged except for their temperature. or their condition. An exchanger is characterized by the fluids present, the purpose sought and the power to be implemented; these criteria determine its optimal shape and dimensions. In the context of this work, we have presented some types of heat exchangers with their classifications according to the principle of action, flow and construction. The objective of this thesis is to know generally all the types of heat exchangers and their classifications and especially the components and the behavior of a shell and tube heat exchanger and its operation as well as the calculation method "DTLM and NUT »

# Sommaire

---

## Introduction Générale

<b>I. Chapitre I :</b>	1
I.1 Introduction :	3
I.2 Mode de transmission de chaleur :	3
I.2.1 La conduction :	3
I.2.1.1 La conductivité thermique :	4
I.2.1.2 Notion de résistance thermique :	5
I.2.2 La convection :	6
I.2.3 Le rayonnement :	7
I.3 Notion de flux thermique :	7
I.3.1 Le débit de chaleur échangée $Q$ :	7
I.3.2 Le rendement thermique :	8
I.3.3 Facteurs influençant le rendement :	8
<b>II. Chapitre II :</b>	9
II.1 Introduction :	10
II.2 Définition :	10
II.3 Classification des échangeurs de chaleur :	10
II.3.1 Classification selon leur destination :	10
II.3.1.1 Les échangeurs et réfrigérants :	10
II.3.1.2 Les condenseurs :	10
II.3.1.3 Les rebouilleurs :	11
II.3.2 Classification selon l'écoulement :	11
II.3.2.1 Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens (Co-courant) :	11
II.3.2.2 Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraire (Contrecourant) :	12
II.3.2.3 Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage :	12
II.3.3 Classification selon le principe d'action :	13
II.3.3.1 Les échangeurs de surface :	13
II.3.3.2 Les échangeurs à mélange :	13
II.3.4 Classification selon la construction :	13
II.3.4.1 Les échangeurs tubulaires :	13
II.3.4.1.1 Les échangeurs à tubes séparés :	14
II.3.4.1.2 Les échangeurs à tubes rapprochés :	14
II.3.4.1.3 Les échangeurs à tubes ailetés :	14
II.3.4.1.4 Les échangeurs à tube et calandre :	14
II.3.4.1.5 Échangeur double tube :	14
II.3.4.2 Les échangeurs à plaques :	15

# Sommaire

---

II.3.4.3	Différents types des échangeurs à plaques : .....	15
II.3.4.3.1	Les échangeurs à plaques et joints : .....	15
II.3.4.3.2	Les échangeurs à plaques serties : .....	16
II.3.4.3.3	Les échangeurs à plaques soudée : .....	16
II.4	Conception des échangeurs de chaleurs : .....	16
II.4.1	À Plaque Tubulaire fixe : .....	16
II.4.2	À plaque tubulaire flottante : .....	17
II.4.3	Avec tube en U : .....	18
II.5	Constitutions des échangeurs à faisceau tubulaire et à calandre : .....	18
II.6	Descriptions des composantes de l'échangeur tubulaires et à calandre : .....	19
II.6.1	Le côté calandre : .....	20
II.6.2	Les tubes : .....	20
II.6.3	Plaque tubulaire : .....	21
II.6.4	Plaques support (les chicanes) : .....	21
II.6.5	Tirants et entretoises.....	22
II.6.6	Les déflecteurs.....	22
II.6.7	Les boîtes de distribution.....	23
II.7	Le principe de fonctionnement de l'échangeur tubulaire : .....	24
II.8	Principaux problèmes des échangeurs de chaleur .....	25
II.8.1	L'encrassement des tubes de l'échangeur .....	25
II.8.2	Vibrations dans les échangeurs : .....	26
II.8.3	Corrosion des entrées des tubes.....	27
II.9	La maintenance de l'échangeur de chaleur : .....	27
II.9.1	Control normal de l'échangeur et suivi des performances : .....	27
II.9.2	Nettoyage des échangeurs : .....	28
II.9.2.1	Nettoyage en marche : .....	28
II.9.2.2	Nettoyage pendant les phases d'arrêts : .....	28
II.9.2.2.1	Nettoyage mécanique : .....	29
II.9.2.2.1.1	Nettoyage à l'eau sous pression : .....	29
II.9.2.2.1.2	Nettoyage à l'aide d'outils : .....	29
II.9.2.2.2	Nettoyage chimique.....	30
II.10	Vérification d'étanchéité : .....	30
II.10.1	Fuites externes : .....	30
II.10.2	Fuites internes : .....	30
II.11	Sécurité technique de l'échangeur : .....	31
<b>III.</b>	<b>Chapitre III : .....</b>	<b>33</b>

# Sommaire

---

III.1	La distribution de température dans un échangeur de chaleur : .....	34
III.2	Le coefficient global d'échange (U) ou (K) : .....	34
III.3	Evaluation des performances thermiques d'un échangeur en régime permanent : .....	35
III.4	Méthode de la moyenne logarithmique $\Delta T_{LM}$ : .....	36
III.4.1	Cas d'un échangeur à courant parallèle : .....	36
III.4.2	Cas d'un échangeur à contre-courant : .....	37
III.4.3	Cas d'un condenseur : .....	38
III.4.4	Cas d'un évaporateur : .....	38
III.4.5	Cas d'autre configuration : Courants croisés, configuration mixte, etc.... : .....	38
III.5	La méthode NUT (Efficacité d'un échangeur) : .....	38
III.5.1	L'efficacité d'un échangeur de chaleur : .....	39
III.5.2	NUT : .....	39
III.6	Avantages et inconvénients de l'échangeur de chaleur à tube et à calandre : .....	40
III.6.1	Avantages : .....	40
III.6.2	Inconvénients : .....	40
<b>IV.</b>	<b>Chapitre IV :</b> .....	<b>41</b>
IV.1	Historique de COMSOL .....	42
IV.2	Présentation de COMSOL multiphysics : .....	42
IV.3	Simulation d'un échangeur de chaleur à tubes et calandre à contre-courant : .....	42
IV.4	Discussion des résultats : .....	53
IV.4.1	Effet de la température : .....	53
IV.4.2	Effet de la pression : .....	53
IV.4.3	Effets de la vitesse et de la masse volumique .....	54
IV.4.4	Etude d'enthalpie : .....	54
IV.4.5	Etude des transferts thermiques : .....	54
IV.4.6	Effet de la viscosité : .....	55
	<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>56</b>

## Table des figures

---

Figure 1 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant.....	11
Figure 2 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire contre-courant.....	12
Figure 3 : Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage.....	13
Figure 4 : Faisceau tubulaire avec plaque tubulaire fixe.....	17
Figure 5 : Faisceau tubulaire avec plaque tubulaire flottante.....	18
Figure 6 : Echangeur de chaleur tube en U.....	18
Figure 7 : Constitutions d'un échangeur à faisceau tubulaire et à calandre.....	19
Figure 8 : Constitutions d'un échangeur à faisceau tubulaire et à calandre (à plaque fixe).....	20
Figure 9 : Les dispositions des tubes.....	21
Figure 10 : Les différentes formes des chicanes .....	22
Figure 11 : Chicane en forme fenêtre .....	23
Figure 12 : Les boîtes de distribution.....	24
Figure 13 : Nombre de passe dans les boîtes de distribution .....	24
Figure 14 : Les processus physiques des échangeurs de chaleur .....	25
Figure 15 : Echangeur tubes et calandre (co et à contre-courant).....	26
Figure 16 : L'encrassement des tubes dans un échangeur.....	27
Figure 17 : Corrosion dans les tubes.....	28
Figure 18 : Nettoyage des échangeurs.....	30
Figure 19 : Le KIT LD 2X2.....	32
Figure 20 : Démonstration générale de l'échangeur avec deux passage coté tubes et calandre.....	44
Figure 21 : L'eau qui circule dans le coté tubes .....	44
Figure 22 : L'air qui circule dans la calandre .....	44
Figure 23 : La variation de température de l'air dans la calandre .....	45
Figure 24 : Variation de température de l'eau dans les tubes.....	45
Figure 25 : Variation de température à la paroi extérieur de la calandre.....	46
Figure 26 : Variation de pression de l'air dans la calandre.....	46
Figure 27 : Variation de la pression de l'eau dans les tubes.....	47
Figure 28 : Variation de la vitesse de l'air dans la calandre.....	47

## Table des figures

---

Figure 29 : Variation de la vitesse d'eau dans les tubes.....	48
Figure 30 : Variation de l'enthalpie d'air dans la calandre.....	48
Figure 31 : Variation de l'enthalpie d'eau dans les tubes.....	49
Figure 32 : flux de chaleur par conduction.....	49
Figure 33 : Flux de chaleur par convection.....	50
Figure 34 : flux de chaleur par rayonnement.....	50
Figure 35 : présentation de la viscosité dynamique dans l'échangeur.....	51
Figure 36 : la viscosité dynamique coté calandre.....	51
Figure 37 : la viscosité dynamique coté tubes.....	51
Figure 38 : Présentation de la viscosité cinématique dans l'échangeur.....	52
Figure 39 : la masse volumique Coté calandre.....	52
Figure 40 : la masse volumique coté tubes.....	52
Figure 41 : présentation de la masse volumique dans l'échangeur.....	53

## Nomenclature

Symboles	Significations	Unités
<b>S</b>	La surface d'échange	[m <sup>2</sup> ]
<b>S<sub>i</sub></b>	La surface interne des tubes	[m <sup>2</sup> ]
<b>S<sub>e</sub></b>	La surface externe des tubes	[m <sup>2</sup> ]
<b>ΔTLM</b>	La moyenne logarithmique de différence de température	[K]
<b>NUT</b>	Nombre d'unité de transfert	
<b>T<sub>ce</sub></b>	Température du fluide chaud à l'entrée	[K]
<b>T<sub>cs</sub></b>	Température de fluide chaud à la sortie	[K]
<b>T<sub>fe</sub></b>	Température de fluide froid à l'entrée	[K]
<b>T<sub>fs</sub></b>	Température de fluide froid à la sortie	[K]
<b>T<sub>i</sub></b>	Température interne des tubes	[K]
<b>T<sub>e</sub></b>	Température externe des tubes	[K]
<b>dφ<sub>c</sub></b>	Le flux de chaleur perdu par le fluide chaud	[W]
<b>dΦ<sub>f</sub></b>	Le flux de chaleur gagner par le fluide froid	[W]
<b>C<sub>pc</sub></b>	La chaleur spécifique du fluide chaud	[J/kg.K]
<b>C<sub>pf</sub></b>	La chaleur spécifique du fluide froid	[J/kg.K]
<b>e</b>	L'épaisseur de la paroi	[m]
<b>L</b>	La largeur	[m]
<b>r<sub>i</sub></b>	Le rayon intérieur des tubes	[m]
<b>r<sub>e</sub></b>	Le rayon extérieur des tubes	[m]
<b>K ou U</b>	Coefficient d'échange global	[W/m <sup>2</sup> .K]
<b>m</b>	La masse	[kg]
<b>m<sub>c</sub></b>	La masse du fluide chaud	[kg]
<b>m<sub>f</sub></b>	La masse du fluide froid	[kg]
<b>h</b>	Coefficient de convection	[W/m <sup>2</sup> .K]
<b>h<sub>i</sub></b>	Coefficient de convection interne	[W/m <sup>2</sup> .K]
<b>h<sub>e</sub></b>	Coefficient de convection externe	[W /m <sup>2</sup> .K]

## Nomenclature

<b>R</b>	Resistance thermique	[m <sup>2</sup> .K/W]
<b>Q</b>	Le débit de chaleur échangé	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>F</b>	Facteur de correction	
<b>c</b>	Chaleur massique	[J/kg.K]
<b>P</b>	Densité de la source	[kg/m <sup>3</sup> ]
<b>ρ</b>	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
<b>λ</b>	Conductivité thermique	[W/m.K]
<b>E</b>	Efficacité de l'échangeur	
<b>φ</b>	Flux de chaleur	[W]
<b>Q<sub>c</sub></b>	La chaleur massique du fluide chaud	[J/kg.K]
<b>σ</b>	Constante de Steven-Boltzmann	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
<b>ε</b>	L'émissivité de la surface.	
<b>C<sub>min</sub></b>	Valeur minimum de (m.C <sub>p</sub> ) du fluide chaud ou du fluide froid qui contrôle l'échange thermique.	[J/K.s]
<b>C<sub>max</sub></b>	Valeur maximum de (m.C <sub>p</sub> ) du fluide chaud ou du fluide froid qui contrôle l'échange thermique.	[J/K.s]
<b>Ø<sub>réel</sub></b>	La puissance thermique réelle	[W]
<b>Ø<sub>max</sub></b>	La puissance thermique maximum	[W]
<b>α</b>	Diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]

## Introduction Générale

Les propriétés physico-chimiques, l'état (liquide, gazeux ou solide) et la corrosivité des fluides impliqués dans les procédés industriels sont extrêmement variés. Le chauffage ou le refroidissement de tels fluides nécessite une technologie d'échangeur à la fois souple et efficace. L'échangeur thermique est un équipement qui prend une place importante dans les installations industrielles. Il sert à transférer de la chaleur entre deux fluides sans les mélanger. Les échangeurs de chaleur sont conçus et fabriqués pour faciliter le transfert indirect de chaleur entre les deux fluides.

Un échangeur tubulaire est un type d'échangeur thermique qui utilise des tubes pour échanger de la chaleur entre deux fluides qui circulent à l'intérieur et à l'extérieur de ces tubes. Les fluides peuvent être des liquides, des gaz ou une combinaison des deux. En effet, l'objectif principal de cet échangeur est la récupération de chaleur sur liquides ou gaz.

L'objectif de ce mémoire est de connaître les composants et le comportement d'un échangeur de chaleur à tubes et calandre ainsi que son fonctionnement. Aussi, on exposera les méthodes de calcul bien connues des échangeurs de chaleur à savoir : la méthode de la différence logarithmique moyenne « DTLM » et la méthode du nombre d'unités de transfert « NUT ». Enfin, une simulation thermique sous le code commercial COMSOL MULTIPHYSICS de cet échangeur à des variations de paramètres (température, pression, viscosité, etc.) a été effectuée en vue d'une optimisation des performances. Evidemment, le choix de la méthode de calcul de l'échangeur thermique dépendra des données de départ qu'on se fixera. Notre mémoire est organisé succinctement :

- Chapitre Premier : Rappels thermiques.
- Chapitre Deux : Généralités sur les échangeurs thermiques.
- Chapitre Trois : Méthodes de calcul des échangeurs thermiques.
- Chapitre Quatre : Simulation par le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

**Chapitre I**  
**Rappels thermiques**

## I.1 Introduction :

L'échangeur thermique est un élément essentiel des systèmes de chauffage, de climatisation, mais aussi de réfrigération. Il permet d'assurer le transfert de chaleur entre deux fluides ou plus. Généralement les deux fluides sont séparés par une paroi solide.

Ce transfert se fait par 3 modes de transmission d'énergie thermique : la conduction, la convection et le rayonnement.

## I.2 Mode de transmission de chaleur :

Il existe 3 modes de transmission de la chaleur :

### I.2.1 La conduction :

Transfert d'énergie dans un corps solide (paroi de l'échangeur) par agitation moléculaire. Dans ce mode de transfert, la matière se comporte véritablement comme un conducteur de chaleur.

Equations générales de la chaleur dans la conduction :

Le bilan énergétique d'un volume élémentaire " dV ", de surface " dS " dans le temps " dt " , donne :

$$\text{Div} (\lambda \text{grad}T) + p = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I.1})$$

Tel que :

$\lambda$  : Conductivité thermique.

$p$  : Source interne.

$\rho$  : Masse volumique.

$c$  : Chaleur massique.

### Cas particuliers :

*1er cas :*

La conductivité ne dépend que de la température (milieu homogène) :

$$\lambda \cdot \Delta T + \frac{d\lambda}{dT} \cdot (\text{grad}T)^2 + p = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I.2})$$

*2ème cas :*

Le milieu est homogène, la conductivité est indépendante de la température :

$$\lambda \cdot \Delta T + p = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I.3})$$

*3ème cas :*

Le milieu est homogène, la conductivité est indépendante de la température et il n'y a pas de source interne :

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Équation de Fourier}). \quad (\text{I.4})$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (\text{Diffusivité thermique en } m^2/s)$$

*4eme cas :*

Le milieu est homogène, la conductivité est indépendante de la température et le régime est permanent :

$$\lambda \cdot \Delta T + p = 0 \quad (\text{Equation de poisson}) \quad (\text{I.5})$$

*5eme cas :*

Le milieu est homogène, la conductivité est indépendante de la température et le régime est permanent et il n'a pas de source interne :

$$\Delta T = 0 \quad (\text{Équation de Laplace}) \quad (\text{I.6})$$

### **Loi de Fourier :**

Fourier a supposé qu'il existe une relation linéaire entre la densité de flux et le gradient de température. Dans le cas d'un milieu isotrope, la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{I.7})$$

Cas particulier :

Dans le cas de transfert de chaleur en régime permanent unidirectionnel, on peut écrire la loi de Fourier sous forme très simple :

$$\phi = \frac{-\lambda \cdot s}{e} (T_1 - T_2) \quad (\text{I.8})$$

On remarque que le flux de chaleur est proportionnel à l'écart de température existant entre deux points.

S : surface d'échange.

$\lambda$  : conductivité thermique.

e : distance entre les deux points (épaisseur).

### **I.2.1.1 La conductivité thermique :**

La conductivité thermique est une caractéristique du milieu, elle dépend généralement de la température et du point considéré, elle dépend aussi à la phase dans laquelle se trouve le matériau (solide, liquide ou gaz) et la pression pour les gaz, dans le cas de milieu homogène la conductivité thermique ( $\lambda$ ) dépend que de la température.

Les matériaux ont des comportements différents vis-à-vis de la température T, le fer, l'argent et le cuivre, par exemple, voient leurs  $\lambda$  diminuer lorsque la température augmente, par contre,

le cobalt, le béryllium et le magnésium par exemple  $\lambda$  décroît avec la température  $T$ , comme il y a des matériaux dont  $\lambda$  passe par un extremum, c'est le cas du plomb et de l'aluminium.

En pratique, si l'écart de température est très faible, et que l'application ne demande pas une grande précision, on peut prendre  $\lambda$  comme constante.

### I.2.1.2 Notion de résistance thermique

Dans le cas d'une paroi infinie plane séparant deux milieux 1 et 2 de températures constantes ( $T_1, T_2$ ), avec  $T_1 > T_2$ , le flux de chaleur spécifique, qui est la quantité de chaleur transportée en une seconde à travers l'unité de surface à température constante dans la direction de la normale à cette surface, à travers la paroi est :

$$q = \frac{\lambda}{e}(T_i - T_e) \quad (\text{I.9})$$

Ou bien :

$$q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{I.10})$$

Où :

$T_e, T_i$  : Les températures des surfaces extérieures et intérieurs de la paroi.

$e$  : l'épaisseur de la paroi.

$\lambda$  : est le coefficient de conductibilité thermique du matériau.

$h_i, h_e$  : Les coefficients de transmission de chaleur par convection du premier milieu à la paroi et de la paroi au second milieu.

La grandeur :  $R = \frac{1}{h_i} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}$  est appelée résistance thermique,  $\frac{1}{R}$  est le coefficient d'échange de chaleur.

Pour plusieurs systèmes de résistance thermique  $R_1, R_2, \dots R_n$  placés en série, on a :

$$R_T = \sum_1^N \frac{1}{R_n}$$

Il est le même pour les conditions aux limites du type Fourier :

$R = \frac{1}{h_s} \dots$  Résistance d'échange entre la paroi et le fluide.

Donc le coefficient global d'échange  $U$  écrit :  $U = \frac{1}{R_T}$  Tel que  $R_T$  est la résistance totale de l'ensemble des composantes du mur. Pour les surfaces cylindriques creuses, la résistance de paroi égale :

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

$r_i$  : Le rayon intérieur.

$r_e$  : Le rayon extérieur.

$L$  : Longueur du cylindre.

$\lambda$  : La conductivité thermique.

Alors la résistance globale d'un tube creux est :

$$R_T = \frac{1}{h_1 S_1} \quad (\text{I.12})$$

Dans l'étude des échangeurs, on préfère la forme :

$$q = K S \Delta T \quad (\text{I.13})$$

$K_0$  : le coefficient global d'échange de chaleur.

### I.2.2 La convection :

La convection est le mode le plus important de transfert thermique entre une paroi d'un solide et un fluide. On désigne le type de convection selon le type d'écoulement, on dit que la convection libre (naturelle) si l'écoulement du fluide est naturel, c'est-à-dire le déplacement du fluide est dû uniquement aux différences de densités, ou la différence de températures entre paliers du même fluide, ou au champ de forces extérieures comme la gravité et le vent. En revanche, on peut créer un mouvement à n'importe quel fluide soit par des moyens mécaniques, comme les pompes, les ventilateurs, et les compresseurs, soit par le déplacement des parois du contact dans le fluide, en outre, ce type de convection s'appelle convection forcée. Le flux de chaleur transmise par convection est donné par la deuxième (2ième) loi de Newton :

$$\phi = h \cdot S \cdot \Delta T \quad (\text{I.14})$$

$\phi$  : Flux de chaleur transporté.

$h$  : Coefficient de convection.

$S$  : Surface d'échange.

$\Delta T$  : représente la chute de température entre la paroi et le fluide égal à la valeur absolue de la différence entre les températures du fluide et de la paroi du corps.

La transmission de la chaleur par convection met en jeu le mouvement des fluides (gaz, liquides), ce mouvement permet l'échange de chaleur entre le fluide et une paroi et facilite la

diffusion de la chaleur au sein de l'ensemble du fluide grâce à l'agitation produite. Dans le transfert de chaleur par convection le fluide se comporte comme un véhicule de la chaleur. La convection est dite naturelle ou libre lorsque le mouvement du fluide est créé par la différence de masse volumique existant au sein de fluide du fait des différences de température. Lorsque le mouvement est communiqué par une machine-agitateur, pompe, compresseur ou ventilateur, la convection est dite forcée.

### I.2.3 Le rayonnement :

Le rayonnement est le seul mode de transfert de chaleur qui ne nécessite pas de support matériel, il peut avoir lieu entre deux corps placés dans le vide. Des ondes électromagnétiques véhiculent la chaleur, cette puissance est évaluée par la loi de Stephan Boltzmann :

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{I.15})$$

Où

$\varepsilon$  est l'émissivité de la surface.

$\sigma$  est la constante de Stephan Boltzmann et vaut  $5,67.10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$ .

Après avoir défini les modes de transfert de chaleur, nous allons passer à un cas pratique (les échangeurs de chaleur), où ces différents modes de transfert de chaleur peuvent coexister à la fois. Cependant les échangeurs radiatifs n'interviennent que très rarement dans les échangeurs de chaleur.

## I.3 Notion de flux thermique :

Les échanges de chaleur dans les procédés industriels sont réalisés le plus souvent dans des appareils tubulaires.

### I.3.1 Le débit de chaleur échangée Q :

Qui exprime la quantité de chaleur transmise par unité de temps, Il s'agit donc d'une puissance thermique dont l'unité dans le système international est le Watt. Le débit de chaleur échangée est aussi appelé "charge thermique" de l'appareil d'échange thermique. La surface d'échange qui correspond à la surface extérieure totale des tubes constitue l'appareil. On la note habituellement "S" et elles s'expriment dans le système international en " m<sup>2</sup> ".

Pour caractériser la mise en œuvre de l'échange de chaleur, on utilise habituellement la notion de flux thermique ( $\phi$ ) qui mesure le débit de chaleur échangé.

$$\phi = \frac{Q}{S} \quad (\text{I.16})$$

Selon l'unité choisie, le débit de chaleur, le flux thermique s'exprime en " $\text{W/m}^2$ " (dans le système international).

### **I.3.2 Le rendement thermique :**

C'est le rapport du transfert réel de chaleur sur le transfert maximum possible. En général, le rendement est rapporté au débit d'écoulement neuf. Le rendement est dit total parce qu'il concerne l'énergie sensible et latente.

### **I.3.3 Facteurs influençant le rendement :**

Les paramètres qui caractérisent un récupérateur sont :

- La nature du récupérateur et de ses composants (matériaux mis en œuvre, géométrie de l'échangeur (surface, ailettes, ...)).
- La vitesse de passage de l'écoulement.
- Les débits respectifs de l'écoulement. Ces paramètres influencent le rendement dont la valeur est généralement donnée par le constructeur.
- On notera que d'une manière générale, le rendement d'un échangeur augmente avec :  
L'augmentation de la surface d'échange : Ce paramètre augmente cependant le coût du système et a aussi tendance à augmenter les pertes de charge.
- La diminution de la vitesse de passage des fluides.
- L'augmentation de la différence de température entre les deux fluides.

## **Chapitre II**

### **Généralités sur les échangeurs de chaleur**

### **II.1 Introduction :**

Les procédés utilisés dans l'industrie demandent souvent que les fluides traités soient réchauffés ou refroidis avec ou sans changement de phase au cours des opérations auxquelles ils sont soumis. La chaleur mise en œuvre représente une importante dépense d'énergie dont il est nécessaire de récupérer la plus grande quantité possible. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur. De ce fait les échangeurs de chaleur constituent des appareillages importants.

### **II.2 Définition :**

Un échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contact directe entre les deux fluides.

### **II.3 Classification des échangeurs de chaleur :**

Il existe plusieurs critères de classement, parmi eux on a :

#### **II.3.1 Classification selon leur destination :**

On distingue trois classes d'appareils :

##### **II.3.1.1 Les échangeurs et réfrigérants :**

Dans lesquels la chaleur est cédée par un fluide de procédé à un autre fluide de procédé sans aucun d'entre eux ne subissent de changement dans son état physique. Dans cet appareil par conséquent, l'échange de chaleur pourra s'effectuer d'un liquide à un autre, d'un gaz à un autre ou bien entre un liquide et un gaz. Les réfrigérants fonctionnent comme les précédents mais qui ont pour but de refroidir le fluide chaud du procédé au moyen d'un fluide réfrigérant, qui peut être indifféremment l'eau ou l'air. Dans ces appareils ne se produit aucun changement de phase.

##### **II.3.1.2 Les condenseurs :**

Lorsque le fluide passe, totalement ou partiellement, de la phase vapeur à la phase liquide, le fluide froid peut être soit l'eau de refroidissement, soit l'air. Ils permettent la condensation et le refroidissement des produits de tête de colonne.

### II.3.1.3 Les rebouilleurs :

Lorsqu'un fluide de procédé se vaporise partiellement, le fluide chaud peut être de la vapeur d'eau ou bien un fluide chaud quelconque. Ils assurent une vaporisation partielle des produits de fond de colonne grâce à un produit chaud (gasoil de recyclage, vapeur d'eau).

### II.3.2 Classification selon l'écoulement

On peut distinguer 3 modes d'écoulements :

#### II.3.2.1 Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens (Co-courant) :

Il s'agit d'échangeurs dits à Co-courants ou la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie de 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. La figure (I-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 signifiant entrée et sortie, 1 désignant le fluide chaud et 2 le fluide froid.

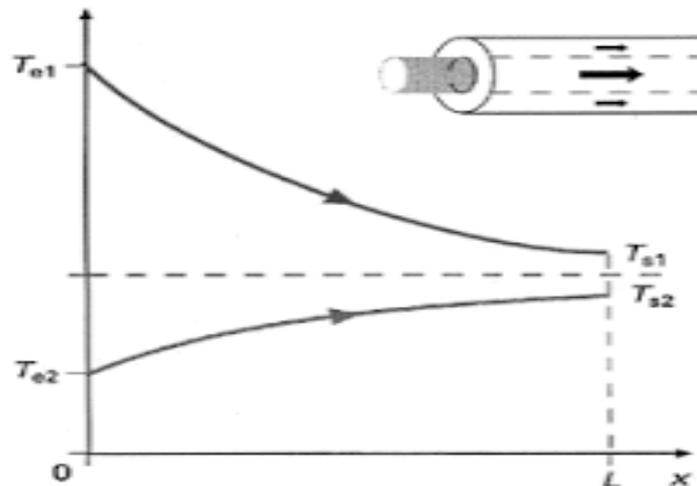
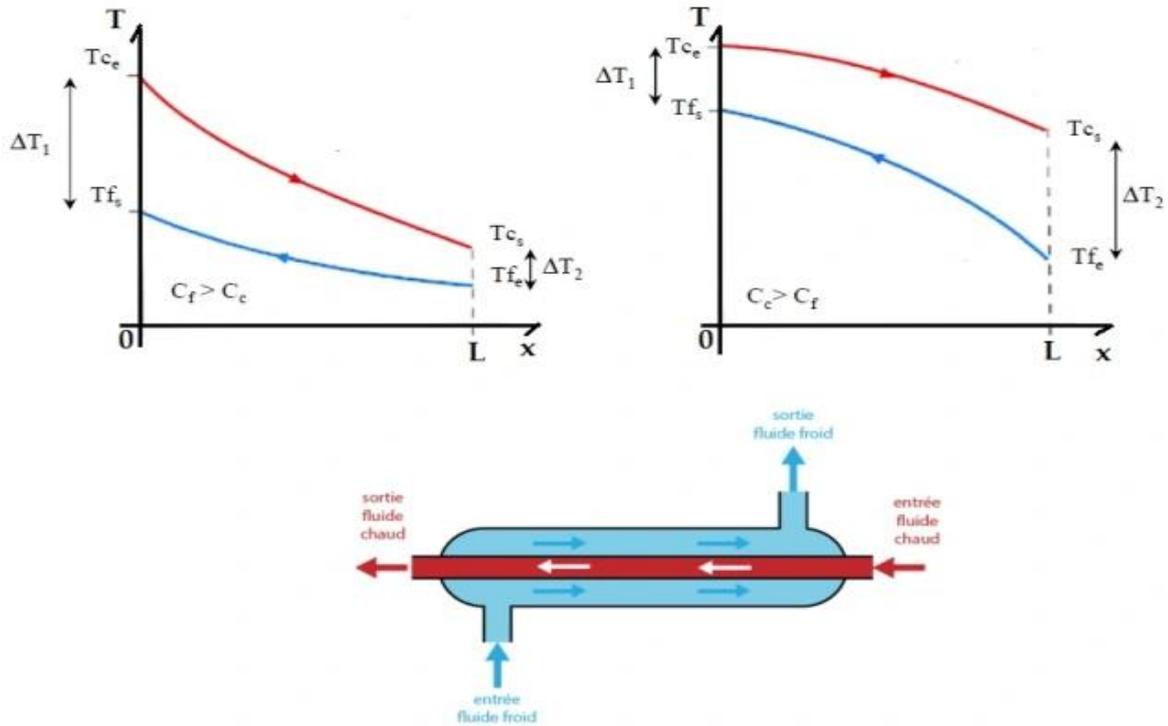


Figure 1 : évolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire Co-Courant.

**II.3.2.2 Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraire (Contrecourant) :**

Il s'agit d'échangeurs à contre courants ou la température de la sortie du fluide froid peut dépasser la température de sortie de 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 (I-2). Les températures sont réparties à l'aide d'indice e signifiant entrée et s sortie.



**Figure 2** : évolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire Contre-Courant

**II.3.2.3 Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage :**

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre figure (I-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.

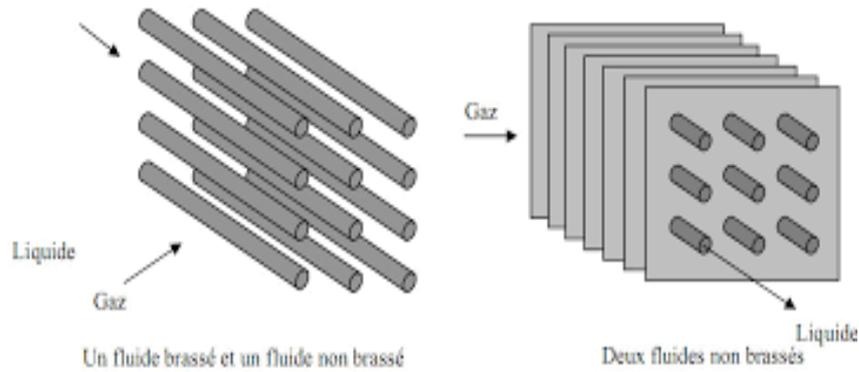


Figure 3 : Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage

### II.3.3 Classification selon le principe d'action :

On distingue deux types :

#### II.3.3.1 Les échangeurs de surface :

Ce type d'échangeurs est très répandu, l'échange de chaleur entre les produits se fait à travers les parois (surface d'échange).

#### II.3.3.2 Les échangeurs à mélange :

Aucune paroi ne sépare les deux fluides qui sont alors mélangés, les applications dans le domaine du raffinage s'en trouvant en conséquence limitées. Toutefois, lorsque les deux fluides peuvent être séparés facilement et que la contamination n'est pas un problème majeur, les échangeurs à mélange peuvent être utilisés ; c'est en particulier le cas de l'échange entre une phase liquide et une phase gazeuse, le transfert de chaleur étant lié au phénomène de transfert de masse entre phases.

### II.3.4 Classification selon la construction :

Les principaux types d'échangeur de chaleur rencontrés sont les suivants :

- Les échangeurs tubulaires.
- Les échangeurs à plaques.

#### II.3.4.1 Echangeurs tubulaires :

Les échangeurs multitubulaires qui existent sous 4 formes :

#### **II.3.4.1.1 Les échangeurs à tubes séparés :**

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.

#### **II.3.4.1.2 Les échangeurs à tubes rapprochés :**

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.

#### **II.3.4.1.3 Les échangeurs à tubes ailetés :**

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique ; lorsque l'un des fluides transit dans l'échangeur il 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.

Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons :

Les ailettes transversales divisées en deux groupes : les ailettes continues qui sont traversées par plusieurs tubes et qui sont généralement de forme rectangulaire plane ou ondulées, et les ailettes indépendantes qui sont traversées par un seul tube et qui peuvent être annulaire ou hélicoïdales, pleines ou segmentées. Elles peuvent être aussi à fil performé, poinçonné ou en brosse. Les ailettes longitudinales qui sont disposées selon l'axe des tubes et qui peuvent être localement torsadées.

#### **II.3.4.1.4 Les échangeurs à tubes et calandre :**

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 tube en U avec une boîte à chaque extrémité de l'échangeur. Les tubes peuvent être supportés par des chicanes afin d'augmenter la vitesse massique du fluide dans le but d'améliorer le coefficient d'échange. Pour cela, un compromis doit être trouvé pour avoir simultanément un coefficient d'échange global et des pertes de charge acceptables.

#### **II.3.4.1.5 Échangeur double tubes :**

Ces échangeurs sont constitués par des éléments rectilignes de deux tubes concentriques raccordés à leurs extrémités par des coudes. Les divers éléments sont tous assemblés par des raccords à démontage rapide, et le remplacement des tubes est possible. Les problèmes de dilatation thermique et d'étanchéité entre le tube intérieur et le tube extérieur sont résolus par

l'utilisation de presse étoupe ou de joint torique. Les tubes sont généralement en acier et les longueurs courantes sont de 3,6 - 4.5 m ou 6m. On utilise également des tubes en verre et en graphite dans des applications particulières

Ces appareils sont intéressants pour les facilités qu'ils offrent pour le démontage et l'entretien. Ils peuvent fonctionner en contre-courant pur, ce qui permet d'obtenir de bons rendements. Par contre, ils présentent les inconvénients suivants :

- Risque de fuites aux raccords.
- Flexion du tube intérieur si la longueur est importante.
- Surface d'échange faible pour le volume global de l'appareil par suite du rayon minimal des coudes reliant les longueurs droites des tubes.

### **II.3.4.2 Echangeurs à plaques :**

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques formées dont les alvéoles constituent les chemins empruntés par les fluides. Les plaques sont assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soient envoyés alternativement entre deux espaces inter plaques successifs. Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers les plaques, l'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité. En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité. Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) ou l'industrie nucléaire. Les plaques sont généralement en acier inoxydable en particulier dans l'agroalimentaire pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique. A noter que l'utilisation de joints en matières organiques réduit la gamme de températures de fonctionnement.

### **II.3.4.3 Différents types des échangeurs à plaques :**

#### **II.3.4.3.1 Les échangeurs à plaques et joints :**

Dont la surface d'échangeur est composée de série de plaques métalliques, équipés de joints, serrés les uns contre les autres à l'aide des tirons entre deux flasques, l'un fixe et l'autre mobile. Les plaques définissent un ensemble de canaux dans lesquelles circulent respectivement chacun des fluides. Les échangeurs à plaques et joints sont surtout utilisés pour le transfert de chaleur monophasique, mais de plus en plus l'application existe en double phases condensation ou évaporation.

#### **II.3.4.3.2 Les échangeurs à plaques serties :**

Les échangeurs sont constitués par des tôles planes parallèles entre lesquelles sont disposées des ailettes. Ces échangeurs sont en générale fabriqués en tôleries légère (acier galvanisé, inoxydable, aluminium, ...). Les fluides peuvent circuler soit à contre-courant soit à courant croisé. Les ailettes sont de types très variés. Ces échangeurs sont en générales utilisées en récupération de l'air.

#### **II.3.4.3.3 Les échangeurs à plaques soudée :**

Ces échangeurs sont en général fabriqués à l'aide des matériaux plus noble tel que l'acier inoxydable, le titane, le nickel, ...

### **II.4 Conception des échangeurs de chaleurs :**

L'échangeur à faisceau et calandre est le plus répandu au niveau des unités de traitement des hydrocarbures. Le principe du faisceau logé à l'intérieur d'une calandre a été également retenue dans la construction de condenseur et rebouilleur.

L'appareil est constitué par un faisceau de tubes monté sur deux plaques tubulaires et portant un certain nombre de chicanes.

D'après la construction on distingue les trois grandes familles d'échangeur à faisceau tubulaire et calandre :

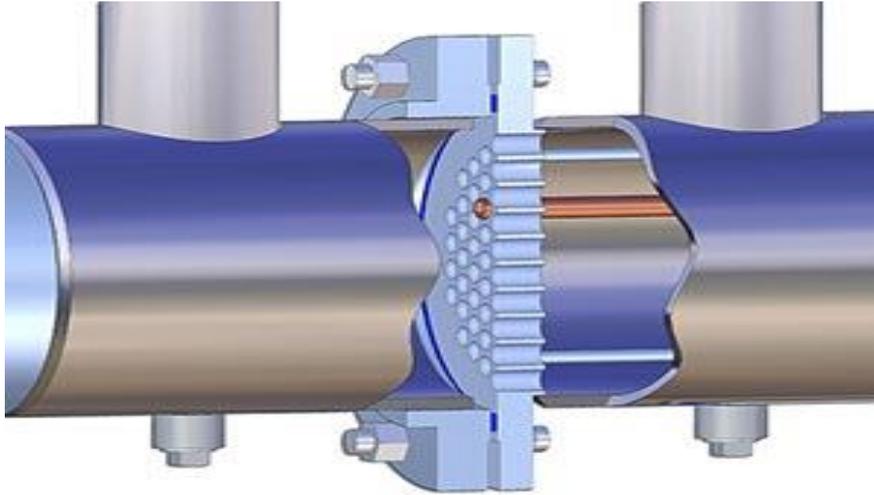
- À plaque tubulaire fixe (construction rigide).
- À tête flottante.
- À tube en U.

#### **II.4.1 À Plaque tubulaire fixe :**

Ce sont des échangeurs avec des tubes droits et un faisceau fixe non extractible dont les plaques tubulaires sont soudées à la calandre. Compte-tenu de sa conception, cet échangeur pourra être équipé du maximum possible de tubes dans la calandre. Afin d'éviter un risque de corrosion, les tubes sont à nouveau mandrinés après soudage sur la plaque tubulaire.

En fonction des conditions opératoires, la contrainte thermique sur le tube de calandre peut être supprimée par l'installation d'un soufflet de dilatation.

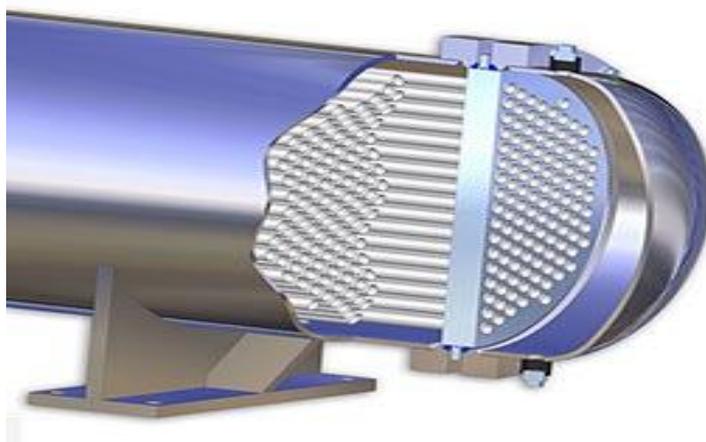
Les boîtes de distribution sont disponibles en différentes versions permettant de proposer des échangeurs mono-passes ou multipasses côté tubes.



**Figure 4** : Faisceau tubulaire avec plaque tubulaire fixe

Des tubes droits sont reliés à leurs extrémités aux plaques tubulaires qui sont soudées à la calandre. Cette configuration est très compétitive et offre la possibilité de nettoyer mécaniquement l'intérieur des tubes étant donné que les couvercles des boîtes d'eau sont démontables. En revanche, étant donné que les plaques tubulaires sont soudées à la calandre, il n'est pas possible d'accéder aux tubes pour les nettoyer, seul un nettoyage chimique en place (CIP) est possible. Par ailleurs, si l'échangeur est soumis à des variations importantes en température, il devra être équipé d'un joint d'expansion pour absorber la dilatation thermique des tubes.

#### **II.4.2 À plaque tubulaire flottante :**



**Figure 5** : Faisceau tubulaire avec plaque tubulaire flottante

Cette technologie ne nécessite pas de joint d'expansion étant donné qu'une des plaques tubulaires est libre de mouvement. La plupart du temps, le faisceau de tubes peut être sorti de la calandre ce qui permet un nettoyage mécanique de la surface externe des tubes ainsi que l'intérieur de la calandre. De plus, le faisceau peut être remplacé plus facilement.

### II.4.3 Avec tube en U :



**Figure 6 :** Echangeur de chaleur tube en U

L'utilisation de tubes en U évite aussi le recours à des joints d'expansion étant donné que la partie pliée du tube est libre de mouvement (non relié à une plaque tubulaire). Par contre, le nettoyage mécanique de l'intérieur des tubes devient difficile à cause du coude de retournement en U. Cette configuration est toutefois relativement peu onéreuse, car elle évite d'utiliser une seconde plaque tubulaire.

### II.5 Constitutions des échangeurs à faisceau tubulaire et à calandre :

Un schéma typique d'un échangeur à faisceau tubulaire, aussi appelé échangeur multitubulaire ou échangeur tubes et calandre, est présenté ci-dessous. L'appareil est constitué d'un faisceau de tubes, disposés à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre. L'un des fluides circule à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre, autour des tubes. Le nombre de chicanes ainsi que leurs formes sont optimisés afin d'améliorer le transfert de chaleur. À chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur des tubes.

Leur configuration peut être à une seule ou à plusieurs passes. La calandre est elle aussi munie de tubulures d'entrée et de sortie (connexions) pour le fluide qui circule à l'extérieur des tubes suivant le chemin imposé par les chicanes. Le choix du diamètre des tubes est aussi optimisé en fonction de la nature du fluide qui y circule.

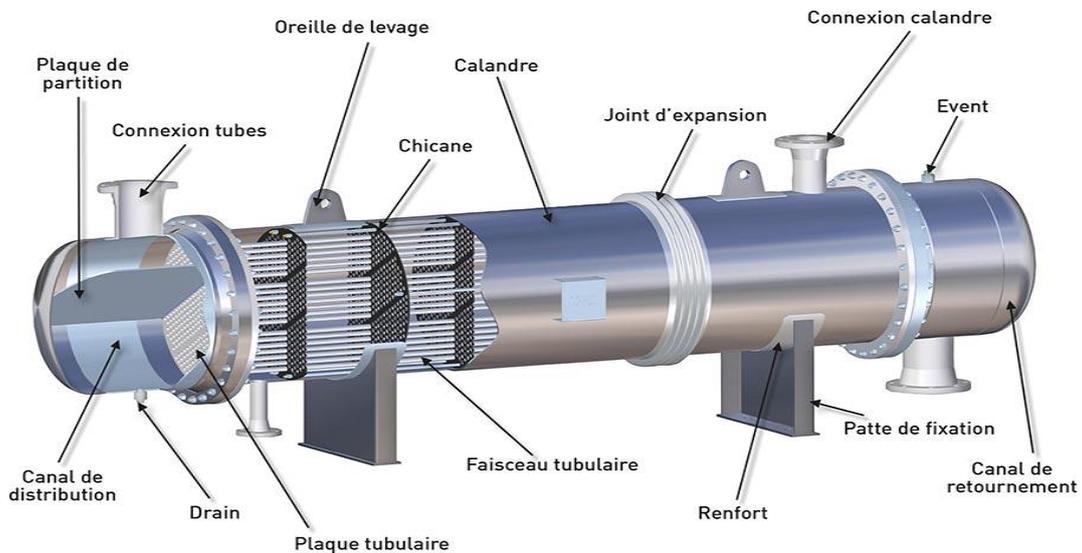


Figure 7 : Composants d'un échangeur à faisceau tubulaire et à calandre

### II.6 Descriptions des parties de l'échangeur tubulaires et à calandre :

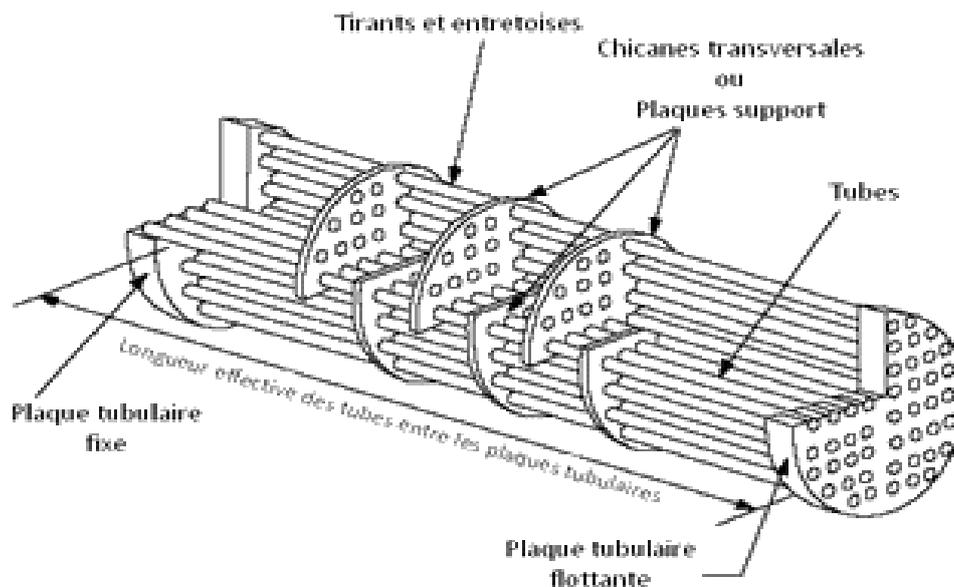


Figure 8 : Constitution d'un échangeur à faisceau tubulaire et à calandre

### II.6.1 Le côté calandre :

La calandre cylindrique peut être fabriquée à partir de tôles laminées ou de tubes.

### II.6.2 Les tubes :

Les tubes peuvent être des tubes lisses. Ou alors la surface de transfert de chaleur des tubes peut être augmentée en utilisant des tubes à ailettes ou des tubes ondulés. Les échangeurs de chaleur à tubes à ailettes sont connus sous le nom d'échangeurs de chaleur à ailettes et les échangeurs de chaleur à tubes ondulés sont connus sous le nom d'échangeurs de chaleur à tubes ondulés. Les tubes des échangeurs de chaleur proviennent d'un fabricant réputé.

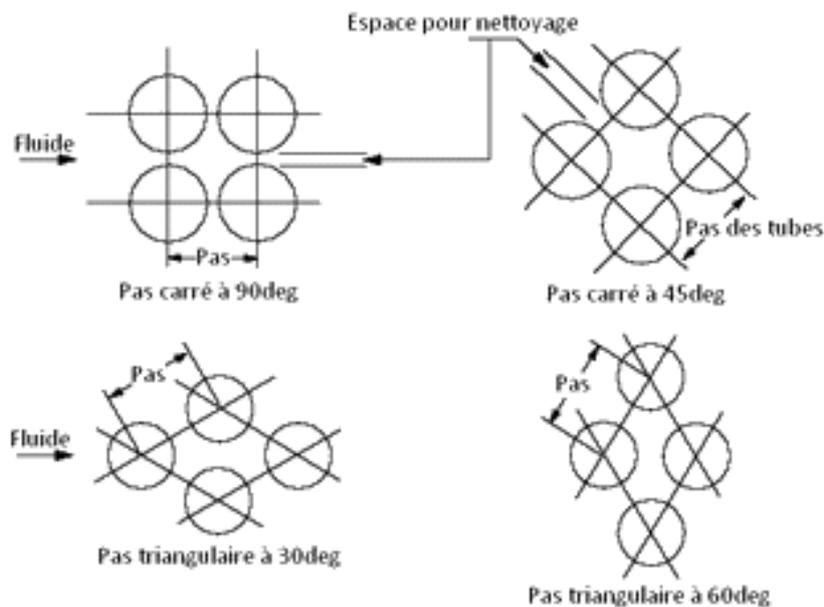


Figure 9 : les dispositions des tubes

Les tubes peuvent être disposés selon :

- Un pas carré,
- À 90 degrés par rapport à l'écoulement du fluide côté calandre,
- À 45 degrés par rapport à l'écoulement du fluide côté calandre,
- Un pas triangulaire,
- À 30 degrés par rapport à l'écoulement du fluide côté calandre,
- À 60 degrés par rapport à l'écoulement du fluide côté calandre.

La disposition en pas carré, contrairement au pas triangulaire, laisse un espace libre rectiligne permettant le passage d'un jet ou d'une brosse pour le nettoyage de l'échangeur entre les tubes. Il sera donc préféré sur les services encrassant. La disposition en pas triangulaire est plus dense et conduit donc à des échangeurs plus compacts. De plus il offre au fluide moins de cheminement hors de la surface des tubes que le pas carré, il est donc plus efficace pour le transfert thermique. Il sera préféré pour les services où un nettoyage mécanique n'est pas requis.

### II.6.3 Plaque tubulaire :

Les tubes de l'échangeur de chaleur sont maintenus des deux côtés par des plaques tubulaires. Les tubes seront insérés dans les trous prévus à cet effet sur les plaques tubulaires. Les tubes sont solidement fixés dans la plaque tubulaire soit par soudage, soit par dilatation mécanique ou hydraulique.

### II.6.4 Plaques support (chicanes) :

Des plaques support sont prévues pour maintenir les tubes, pour maintenir l'espace entre les tubes et pour canaliser l'écoulement du fluide à travers le côté calandre de l'échangeur de chaleur, conformément à la conception.

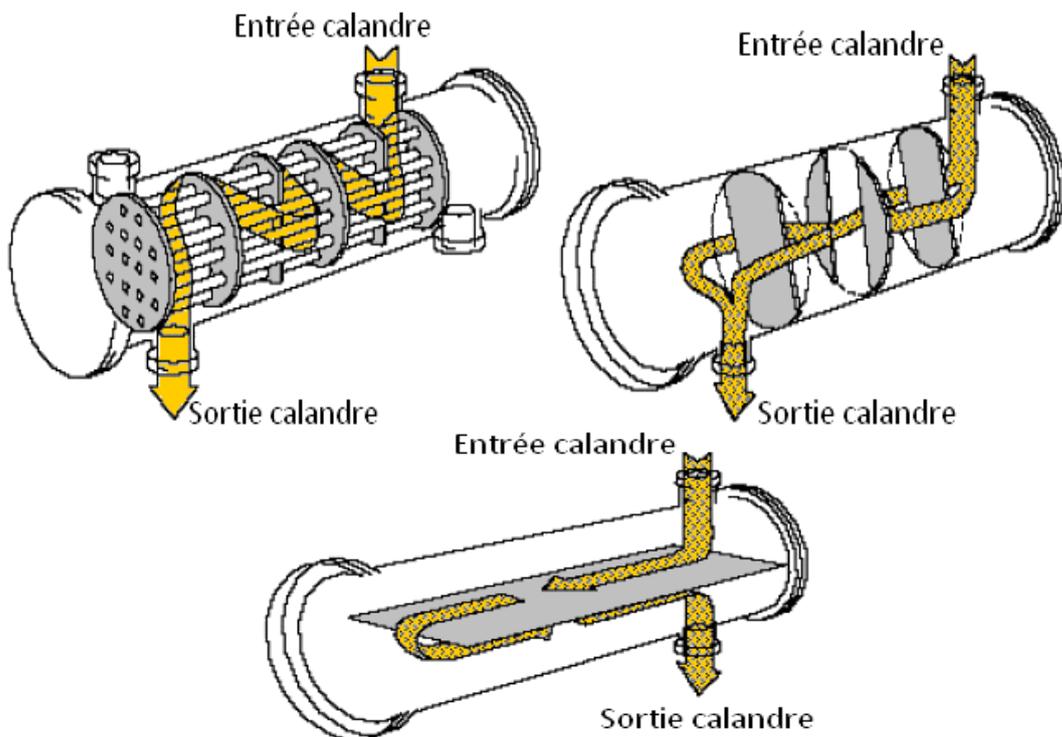
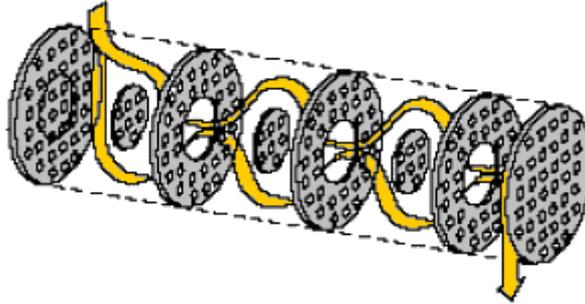


Figure 10 : Différentes formes de chicanes

Des chicanes sont installées côté calandre pour orienter le cheminement du fluide, et forcer son contact avec la totalité de la surface des tubes. Ces chicanes peuvent être orientées perpendiculairement ou parallèlement à l'axe de l'échangeur. Leur fenêtre de passage peut prendre la forme de secteur de cercle simple ou double, ou encore de disques. La coupure de la chicane peut être disposée horizontalement ou verticalement.



**Figure 11** : Chicane en forme fenêtre

Les chicanes contribuent au supportage des tubes. La forme des fenêtres des chicanes fait que certains tubes seront plus supportés que d'autres. Les tubes les moins supportés seront plus sujets aux vibrations que les tubes mieux supportés. Dans certains cas où ce phénomène peut être critique, on peut choisir de ne pas mettre de tube dans les ouvertures de chicanes. L'échangeur sera alors plus volumineux puisqu'une partie de la calandre sera vide.

### **II.6.5 Tirants et entretoises**

Les tirants et les entretoises maintiennent les plaques supports en position et également l'espacement entre les plaques. Une extrémité des tirants est fixée à la plaque tubulaire et les autres extrémités sont fixées dans la dernière plaque support.

### **II.6.6 Les déflecteurs**

Pour éviter ou du moins minimiser l'érosion de tube du faisceau, des déflecteurs de protection peuvent être installés faces aux tubulures d'entrée du fluide, l'obligation de leur mise en place est définie dans les standards (TEMA) en fonction de la nature, de l'état du fluide et du produit ( $\rho$  : masse volumique, ( $u$ ) vitesse du fluide). Ces déflecteurs, d'une épaisseur de l'ordre de 12 mm, sont circulaires, soudés sur des tirants ou entretoise.

II.6.7 Boîtes de distribution

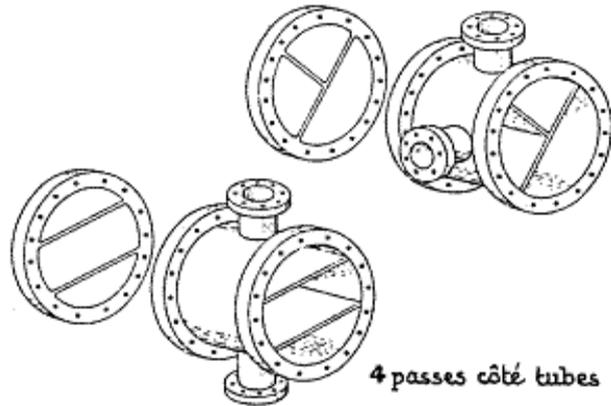


Figure 12 : Boîtes de distribution

Les boîtes de distribution du fluide côté tubes sont munies de parois étanches pour orienter le fluide vers les tubes appropriés. Les boîtes de tête et de fond ne sont pas identiques. La règle la plus importante est de consacrer un nombre quasiment identique de tubes pour chaque passe.

Le tableau ci-dessous représente quelques configurations possibles :

Nombre de passes côté tubes	Partition des boîtes de distribution de tête et de fond		
2 passes			
3 passes			
4 passes			
4 passes			
6 passes			

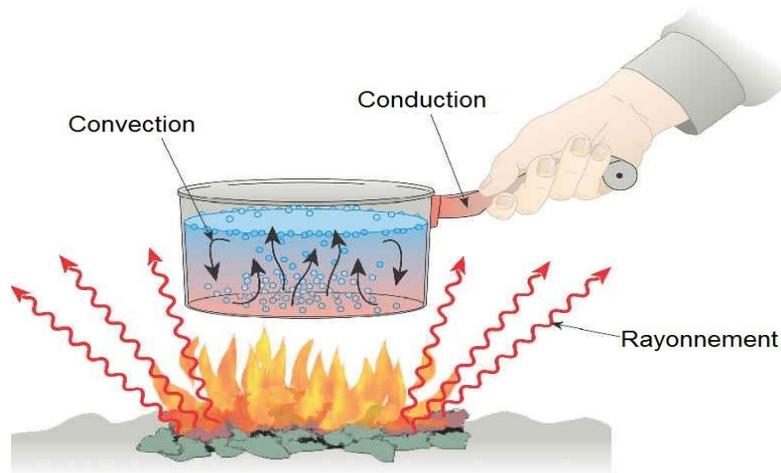
Figure 13 : Nombre de passes dans les boîtes de distribution

### II.7 Le principe de fonctionnement de l'échangeur tubulaire :

Comme son nom l'indique, l'échangeur tubulaire est un échangeur à tube et à calandre. Il a pour objectif de récupérer la chaleur sur gaz ou sur liquide. Pour cela, il fonctionne grâce à un échange de chaleur entre deux fluides dont l'un est chauffant et l'autre est chauffé. L'un de ces fluides circule à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre. Les fluides sont séparés par une surface de transfert.

-Les trois phénomènes successifs pour faire le transfert de chaleur :

- 1-Convection entre fluide chaud et la face externe du tube.
- 2- Conduction à travers le tube.
- 3- Convection à la face interne du tube et le fluide froid.



**Figure 14** : Processus physiques dans les échangeurs de chaleur

Dans un échangeur à tubes et calandre à deux passage coté tube, les écoulements ne sont ni complètement Co-courant, ni complètement contre-courant. De plus les chicanes créent des écoulements à courants croisés alternés.

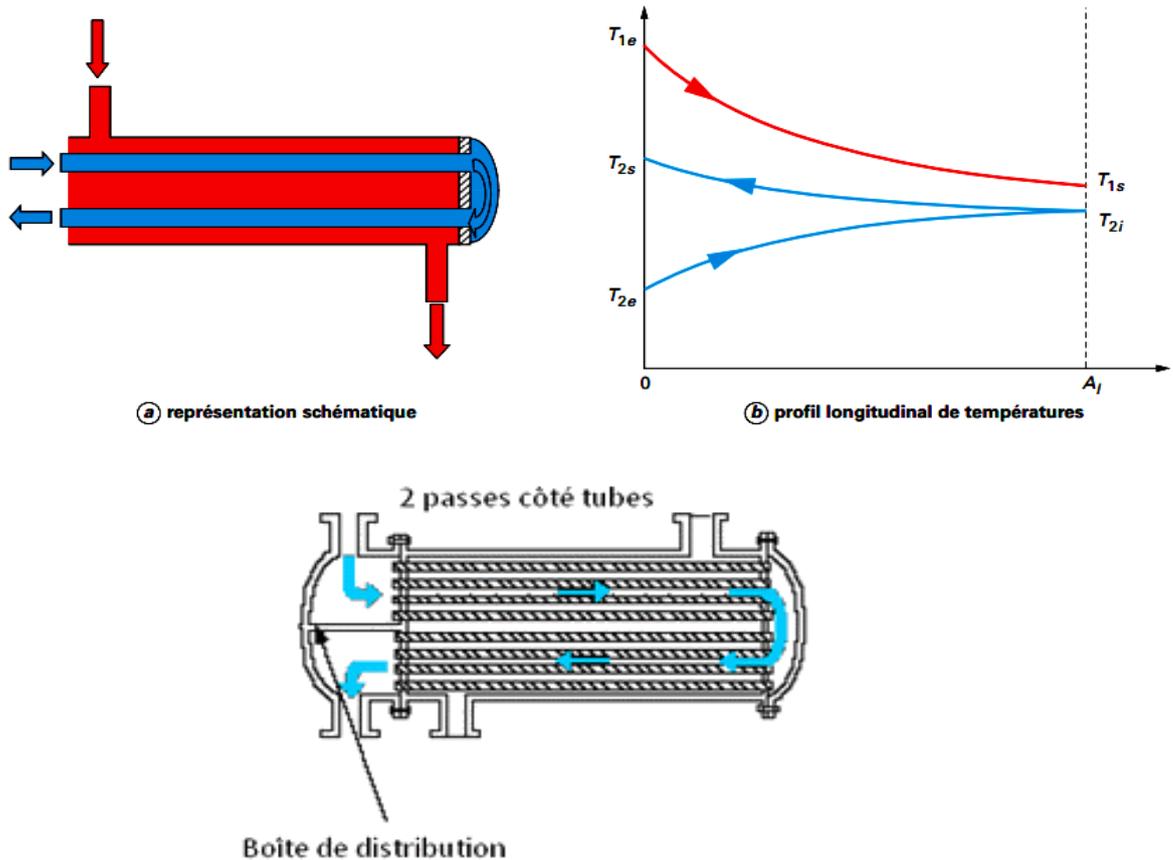


Figure 15 : Échangeur tubes et calandre (Co et à contre-courant)

## II.8 Principaux problèmes des échangeurs de chaleur

La mise en service et exploitation des échangeurs de chaleur dépendent de plusieurs facteurs, comme les matériaux de construction, les fluides en circulation, les températures d'échange, les pressions et vitesses des fluides dans les différentes parties de l'échangeur, le changement de phase, les états de la surface des tubes, les interventions des opérateurs. Ainsi que les industriels sont les plus souvent confrontés aux phénomènes liés à l'encrassement, la Corrosion et les vibrations. Ceci provoque les dégradations des appareils et perturbe l'évolution de processus. Le mode de dégradation des appareils doit être connu du personnel exploitant et de maintenance afin de prévoir la défaillance et d'éviter des situations de panique général, et les problèmes existants sont les suivantes :

### II.8.1 L'encrassement des tubes de l'échangeur

L'encrassement des équipements de transfert thermique peut être défini comme le dépôt de matériau ou de substance désirée sur les surfaces d'échange. Ce dépôt qui évalué dans le

temps, peut constituer des cristaux, des sédiments, des résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore de la combinaison de plusieurs de ces éléments (le gaz brut) provenant des puits est un mélange de plusieurs substances. L'encrassement peut se produire à l'extérieur des tubes mais de moins degré.



**Figure 16** : Encrassement des tubes dans un échangeur

Le problème de l'encrassement de l'échangeur est surtout économique, du fait de coût élevé de l'énergie du matériau. Les dépôts ont généralement une faible conductivité thermique.

L'encrassement des échangeurs de chaleur augmente par :

- Une réduction de l'efficacité des appareils.
- Une diminution de leurs performances.

### **II.8.2 Vibrations dans les échangeurs :**

Dans les échangeurs de chaleur qu'ont une longueur importante sont exposé au problème de vibration des tubes. Le problème de vibration peut être limité par :

- L'utilisation des vitesses des fluides raisonnables.
- L'utilisation d'un déflecteur à l'entrée de la tubulure.
- L'évitement des larges et faibles distances entre chicanes.

### II.8.3 Corrosion des entrées des tubes

Les fluides corrosifs circulant côté tube ou calandre peuvent engendrer des problèmes de corrosion importants surtout au niveau d'entre du tube. La corrosion d'échangeur de chaleur sera limitée en utilisant un matériau résistant :

- Acier inoxydable.
- Graphite pour les solutions aqueuses des acides minéraux.
- Matière plastique pour les températures inférieures à 100°C.



Figure 17 : Corrosion dans les tubes

## II.9 Maintenance de l'échangeur de chaleur :

L'application de la maintenance préventive et curative dans les échangeurs :

### II.9.1 Control normal de l'échangeur et suivi des performances :

Pour un produit donné, on caractérise la qualité d'un échange thermique par le coefficient global d'échange. L'encrassement de l'appareil est suivi par le calcul de ce coefficient à partir du relevé des températures entrées et sorties des deux fluides et des deux débits.

Sur les échangeurs à forte charge thermique et qui sont connus pour s'encrasser rapidement, le Calcul du coefficient d'échange est fait régulièrement, quelquefois directement par ordinateur. A partir d'une certaine valeur d'encrassement il peut devenir économique d'effectuer le nettoyage de l'échangeur en marche s'il est possible.

### II.9.2 Nettoyage des échangeurs :

Lorsque la qualité de l'échange diminue, il faut procéder au nettoyage de l'appareil qui peut s'effectuer de deux façons, soit en marche à l'aide de produits chimiques, soit mécaniquement après démontage de certains éléments.

#### II.9.2.1 Nettoyage en marche :

Ce procédé est utilisé sur le côté à nettoyer s'il peut être bypassé. Les températures de fonctionnement doivent correspondre à celles du nettoyage (solutions chimiques) ; sinon il faut isoler l'autre fluide. On utilise comme agent de nettoyage des solutions à base d'acides chlorhydrique ou sulfurique que l'on fait circuler dans l'appareil. De nombreux produits existent sur le marché et leur utilisation nécessite une connaissance exacte des matériaux constituant l'appareil et de la nature des dépôts.

La durée de l'opération sera fonction de la qualité et de l'épaisseur des dépôts ; des analyses fréquentes seront effectuées sur le produit de circulation : suivi du pH.

En fin de nettoyage, on fera circuler un produit neutralisant à base de soude ou de carbonate de soude. La mise en œuvre de produits chimiques dangereux nécessitera le balisage de l'aire et le port par le personnel du matériel individuel de protection.

#### II.9.2.2 Nettoyage pendant les phases d'arrêts :

Dans de nombreux cas, que les techniques de traitement des fluides et de nettoyage en continu soient ou non utilisées, il est nécessaire de procéder à un nettoyage complet de l'appareil. Cette opération s'effectue pendant les phases d'arrêts de l'installation et deux méthodes peuvent être utilisées (soit en semble, soit séparément) :



Figure 18 : Nettoyage des échangeurs

#### **II.9.2.2.1 Nettoyage mécanique :**

Le nettoyage mécanique pendant les phases d'arrêts peut être effectué sur l'échangeur sur place lorsque l'espace disponible le permet ou sur une aire de nettoyage (échangeur démonté), plusieurs techniques peuvent être mise en œuvre :

##### **II.9.2.2.1.1 Nettoyage à l'eau sous pression :**

Elle est efficace pour enlever les dépôts à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes d'échangeur ou pour d'autres types de géométrie, de façon occasionnelle, du sable peut être injecté avec l'eau pour arracher les dépôts durs mais dans ce cas, il y a risque d'érosion de la surface et surtout de destruction du film protecteur anticorrosion.

##### **II.9.2.2.1.2 Nettoyage à l'aide d'outils :**

Cette technique est utilisée pour enlever les dépôts mêmes très durs à l'intérieur des tubes rectilignes de chaudières, de condenseurs, ou de tous autres échangeurs de chaleur. Ces outils peuvent être :

- À Moteur d'entraînement électrique ou pneumatique entraînant une transmission flexible en rotation à l'extrémité de laquelle sont montés des outils tels que : des outils à molettes travaillant par frappe élastique, des outils à lames ou à éléments expansibles travaillant par grattage, des écouvillons (ou brosses).
- À Moteur d'entraînement pneumatique pénétrant dans les tubes, montés à l'extrémité d'un tuyau d'alimentation en air, les outils utilisés :
  - Outils à molettes
  - Outils à lames
  - Tarières sur joint de cadran pour casser les dépôts durs
- À moteur d'entraînement pneumatique ou électrique à percussion entraînant des tubes épais rabotant entre eux et à l'extrémité desquels sont montés les outils de nettoyage :
  - Taillant pour enlèvement de dépôts très durs et épais,
  - Trépan pour enlèvement de tous dépôts,
  - Traceurs pour enlèvement de certains dépôts mous ou pâteux,
  - Ecouvillons
  - Mèches hélicoïdales pour enlèvement de dépôts collants.
- À Pistolet hydraulique (pression d'utilisation : 6 à 15 bar) propulsant des écouvillons spéciaux dans les tubes : ils permet d'enlever des dépôts de boues ou d'algues dans des tubes de petit diamètres.

#### **II.9.2.2.2 Nettoyage chimique**

Il présente de nombreux avantages, tels que :

- Opération rapide et efficace,
- Les surfaces d'échange ne subissent pas de dégâts mécaniques importants,
- Les solutions chimiques pénètrent jusqu'aux zones, inaccessibles de l'échangeur et le traitement de toute la surface d'échange est réalisé,
- Il nécessite moins de main d'œuvre et peut se réaliser sans démontage de l'appareil.

#### **II.10 Vérification d'étanchéité :**

Dans l'échangeur, il se manifeste deux fuites :

##### **II.10.1 Fuites externes :**

Détection visuelle et facile

Les causes des fuites externes :

Un dudgeonnage imparfait, le fluage des goujons et l'endommagement des joints d'étanchéité dans la tête ainsi qu'un montage non qualifié.

##### **II.10.2 Fuites internes :**

Elles ne peuvent être détectées qu'après analyse périodique des échantillons du produit dont la précision est plus faible.

Les causes les plus répandues des fuites internes est la détérioration des tubes

Le faisceau : corrosion bilatérale donc perçage des tubes, diminution d'épaisseur dans ce cas les tubes ne résistent plus à la pression.

- Exemple de détection de fuites de tubes

La vérification périodique de l'étanchéité des tubes de condenseurs et d'échangeurs est essentielle pour maintenir leurs performances initiales. Le KIT LD 2X2 permet un contrôle rapide et précis des fuites de tubes.



**Figure 19** : Le KIT LD 2X2

Fonctionnement :

Le KIT LD 2X2 se compose de 2 pistolets légers que l'on introduit dans chaque extrémité du tube. Le tube est ensuite pressurisé jusqu'à stabilisation de la pression. Si les manomètres indiquent ensuite une chute de la pression le tube fuit. Et d'après le contrôle et le suivi de l'échangeur on pourra localiser les tubes percés puis on procède à l'opération de bouchage de ses tubes pour que l'échangeur reste en fonctionnement.

Cette opération consiste à éliminer les tubes perforés par bouchage, elle est effectuée jusqu'à 15% des tubes percés selon TEMA, si le bouchage des tubes perforés dépassé 15% on propose de retuber l'échangeur.

### **II.11 Sécurité technique de l'échangeur :**

La sécurité dans l'exploitation des échangeurs contribue, comme celle des autres équipements en exploitation au sein d'une unité, à la réduction de nombre de risques, et d'incidents, pendant sa production, en plus de sa contribution au maintien de la production, en sachant que les échangeurs sont des équipements intermédiaires dans le procédé, et le moindre incident à leur niveau se répercute, et d'une façon directe sur la production.

L'herméticité est une des conditions de fonctionnement normal de l'échangeur, c'est pourquoi on associe l'échangeur à une entrée hydraulique qui correspond au planning d'entretien de l'équipement. Avant de procéder au démontage de l'appareil on doit l'isoler non seulement par les vannes, mais aussi à l'aide des parois pleines installées entre les brides des conduites, l'appareil étant vidé, on le laisse un certain moment jusqu'à ce qu'il atteigne la température

ambiante. D'après cela on doit abaisser la pression dans l'équipement jusqu'à l'atmosphère, puis à travers la purge, on évacue le reste du produit et enfin on ouvre l'appareil.

### **Conclusion du chapitre :**

L'échangeur de chaleur, lorsqu'il est sujet à des encrassements, ne fonctionne pas correctement. Cela signifie que son rendement va diminuer et qu'il nécessitera plus d'énergie pour fonctionner normalement. Par conséquent, en plus de la perte d'efficacité, il y aura aussi une augmentation de la consommation de carburant.

Il est préconisé de faire un contrôle d'étanchéité tous les ans pour être sûr de ne pas avoir de problèmes d'intégrité de l'échangeur, c'est-à-dire de fuites internes ou externes. Un échangeur thermique nettoyé assure un process efficace et permet d'économiser de l'énergie. Un bon entretien conduit toujours à un bon fonctionnement d'un équipement et à une réduction des temps d'arrêts.

## **Chapitre III**

# **Méthodes de calcul des échangeurs thermiques**

### III.1 Distribution de température dans un échangeur de chaleur :

Le transfert de chaleur du fluide chaud vers le fluide froid cause un changement de température de l'un ou des deux fluides circulant dans l'échangeur de chaleur à partir des distributions de température des divers types d'échangeurs de chaleur les observations Communes sont :

- a. Dans l'échangeur à contre-courant, l'augmentation de la température du fluide froid est presque égale à la chute de température du fluide chaud.
- b. Dans tous les cas la différence de température entre les fluides chaud et froid varie avec la position le long du chemin du fluide chaud.

### III.2 Coefficient global d'échange thermique (U) ou (K) :

Si on considère un échangeur de chaleur constitué de deux conduites dans lesquelles s'écoulent deux fluides.

Nous avons trois résistances au transfert :

- Sur la paroi interne du tube, convection  $h_i$
- Dans l'épaisseur du tube conduction,  $k$
- Sur la paroi externe du tube, convection  $h_e$ .

En régime permanent, le flux de chaleur s'exprime :

$$\phi = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i S_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_e S_e}} \quad (\text{III.1})$$

On introduit le coefficient global d'échange  $U$  ou  $K_G$ , le flux s'écrit :

$$\phi = K S \Delta T_{\text{moyenne}} \quad (\text{III.2})$$

Le coefficient de transfert est basé sur l'utilisation de la surface externe ou interne de la conduite selon le choix de l'utilisateur.

-Si la surface interne est utilisée alors le coefficient global d'échange et le flux de chaleur s'exprime :

$$\phi = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{S_i \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{S_i}{h_e S_e}} \quad (\text{III.3.a})$$

$$\phi = k_i S_i \Delta T_{\text{moyenne}} \quad (\text{III.3.b})$$

Si la surface externe est utilisée alors le coefficient global d'échange et le flux de chaleur s'exprime :

$$\phi = \frac{T_i - T_e}{\frac{S_e}{h_i S_i} + \frac{S_e \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{III.4.a})$$

$$\phi = K_e S_e \Delta T_{\text{moyenne}} \quad (\text{III.4.b})$$

La détermination du flux de chaleur nécessite la détermination d'une différence de température moyenne.

Remarque :

L'expression précédente ne tient pas compte des problèmes d'encrassement (Fouling), exemple le dépôt du tartre sur les conduites d'eau. Le dépôt du tartre dans ou sur les tubes provoque une résistance thermique supplémentaire.

On introduit une résistance d'encrassement interne  $R_f^{\text{int}}$  résistance d'encrassement externe  $R_f^{\text{ext}}$ .

### III.3 Evaluation des performances thermiques d'un échangeur en régime permanent :

Dans l'étude d'un échangeur de chaleur, on cherche à atteindre la puissance d'échange nécessaire avec la plus faible surface possible. L'aspect thermique de l'étude consiste en fait évaluer principalement les performances thermiques c'est-à-dire le flux de chaleur dégagé.

Hypothèses de calcul :

Les hypothèses admises sont :

- La chaleur massique des fluides caloporteurs est constante ;
- Le coefficient d'échange global est constant tout le long de la surface d'échange ;
- L'échange est sans perte.

### III.4 Différence de température logarithmique moyenne " $\Delta TLM$ " :

#### III.4.1 Cas d'un échangeur à courant parallèle :

Considérons un élément de surface  $dS$  appartenant à la surface d'échange d'un échangeur simple passe à courant parallèle.

$$d\phi = K dS (T_c - T_f) \quad (III.5)$$

D'autre part, le flux de chaleur perdu par le fluide chaud est donné par :

$$d\Phi_c = -m_c C_{pc} dT_c \quad (III.6.a)$$

Avec :

$d\Phi_c$ : le flux de chaleur perdu par le fluide chaud ;

$C_{pc}$ : la chaleur massique du fluide chaud ;

$dT_c$ : la variation élémentaire de la température du fluide chaud ( $dT_c < 0$ ).

De même pour le fluide froid le flux de chaleur gagné est donné par :

$$d\Phi_f = m_f C_{pf} dT_f \quad (III.6.b)$$

Avec :

$d\Phi_f$ : le flux de chaleur gagné par le fluide froid ;

$C_{pf}$ : la chaleur massique du fluide froid ;

$dT_f$ : la variation élémentaire de la température du fluide froid ( $dT_f > 0$ ).

A partir des équations (III.6a) et (III.6b), nous avons :

$$dT_c = -\frac{d\phi}{m_c C_{pc}} \quad (III.7.a)$$

$$dT_f = \frac{d\phi}{m_f C_{pf}} \quad (III.7.b)$$

Donc :

$$dT_c - dT_f = -\frac{d\phi}{m_c \cdot C_{pc}} - \frac{d\phi}{m_f C_{pf}} \quad (III.8)$$

Remplaçant le flux de chaleur par sa valeur, on aura :

$$\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = -K dS \left( \frac{1}{m_c \cdot C_{pc}} + \frac{1}{m_f C_{pf}} \right) \quad (III.9)$$

Puisque les chaleurs massiques des deux fluides sont constantes et le coefficient d'échange global est de même, intégrant entre l'entrée et la sortie (e et s).

$$\frac{(T_{cs}-T_{fs})}{(T_{ce}-T_{fe})} = K S \left( \frac{1}{m_c \cdot c_{pc}} + \frac{1}{m_f c_{pf}} \right) \quad (III.10)$$

A partir des relations (III.6.a) et (III.6.b), on remplace le produit du débit massique et la chaleur massique en fonction du flux de chaleur des deux fluides, on obtient :

$$\ln \frac{(T_{cs}-T_{fs})}{(T_{ce}-T_{fe})} = K S \left( \frac{T_{cs}-T_{ce}+T_{fe}-T_{fs}}{\phi} \right) \quad (III.11)$$

$$\ln \frac{(T_{ce}-T_{fe})}{(T_{cs}-T_{fs})} = K S \left( \frac{T_{ce}-T_{fe}-T_{cs}+T_{fs}}{\phi} \right) \quad (III.12)$$

Donc, le flux de chaleur est donné par la relation suivante :

$$\phi = K S \frac{[(T_{ce}-T_{fe})-(T_{cs}-T_{fs})]}{\ln \left[ \frac{T_{ce}-T_{fe}}{T_{cs}-T_{fs}} \right]} \quad (III.13)$$

On introduit les indices suivants :

$$\Delta T = T_c - T_f \quad (III.14)$$

e et s sont des indices d'entrée et de sortie de l'échangeur. Nous aurons :

$$d\phi = K S \Delta T_{LM} \quad (III.15)$$

Avec :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}} \quad (III.16)$$

$\Delta T_{LM}$  Étant la température logarithmique de la différence de température globale entre les deux fluides.

$$\text{La différence de température à l'entrée } \Delta T_e = T_{ce} - T_{fe} \quad (III.17.a)$$

$$\text{La différence de température à la sortie } \Delta T_s = T_{cs} - T_{fs} \quad (III.17.b)$$

#### III.4.2 Cas d'un échangeur à contre-courant :

De la même façon que le co-courant on trouve que :

$$d\phi = K S \Delta T_{LM} \quad (III.18)$$

Avec :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln \frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}} \quad (III.19)$$

Et,

La différence de température à l'entrée :

$$\Delta T_e = T_{ce} - T_{fs} \quad (\text{III.20.a})$$

La différence de température à la sortie :

$$\Delta T_s = T_{cs} - T_{fe} \quad (\text{III.20.b})$$

#### III.4.3 Cas d'un condenseur :

La température du condensât (fluide chaud) reste constante. Donc, les différences de températures peuvent être calculées avec les équations :

$$\Delta T_e = T_c - T_{fe} \quad (\text{III.21.a})$$

$$\Delta T_s = T_c - T_{fs} \quad (\text{III.21.b})$$

#### III.4.4 Cas d'un évaporateur :

La température du fluide froid (vapeur) reste constante. Donc, la différence de température moyenne logarithmique peut être calculer en utilisant équations (III.16) avec :

$$\Delta T_e = T_{ce} - T_s \quad (\text{III.22.a})$$

$$\Delta T_s = T_{ce} - T_f \quad (\text{III.22.b})$$

#### III.4.5 Cas d'autres configurations (Courants croisés, configuration mixte) :

Pour les échangeurs à courants croisés ou autres, la quantité  $\Delta T_{LM}$  ne présente plus la différence de température logarithmique moyenne réelle. On introduit alors un facteur de correction  $F$  (inférieur à l'unité) fourni par des abaques et traduisant la nature de l'écoulement tel que :

$$d\phi = F K S \Delta T_{LM} \quad (\text{III.23})$$

$\Delta T_{LM}$  : est obtenue à partir de l'analyse effectuée pour le cas contre-courant.

#### III.5 Nombre d'unités de transfert "NUT" (Efficacité d'un échangeur) :

La méthode de DTLM est basée sur la connaissance des températures des deux fluides aux extrémités de l'échangeur de chaleur (entrée et sortie). Comme on n'a pas souvent accès à ces températures, il serait intéressant de pouvoir évaluer l'échange thermique entre les deux fluides en partant des températures à l'entrée de l'échangeur uniquement. Ceci est envisageable en utilisant la méthode NUT (Nombre d'Unités de Transfert).

### III.5.1 Efficacité d'un échangeur de chaleur :

Elle est définie comme le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximum théoriquement possible avec les mêmes conditions d'entrée des fluides dans l'échangeur (mêmes fluides, débits et températures d'entrée).

$$E = \frac{\Phi_{\text{réel}}}{\Phi_{\text{maximum}}} \quad (\text{III.23})$$

$$\Phi_{\text{réel}} = m_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) \quad (\text{III.24.a})$$

$$\Phi_{\text{réel}} = m_f C_{pf} (T_{fc} - T_{fe}) \quad (\text{III.24.b})$$

$$\Phi_{\text{max}} = (m C_p)_{\text{min}} (T_{ce} - T_{cs}) \quad (\text{III.25})$$

Donc l'efficacité pour un fluide chaud :

$$E = \frac{[m_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs})]}{(m C_p)_{\text{min}} (T_{ce} - T_{fe})} \quad (\text{III.25})$$

Pour un fluide froid :

$$\Phi = E C_{\text{min}} (T_{ce} - T_{fe}) \quad (\text{III.26})$$

L'efficacité d'un échangeur de chaleur à co-courant :

$$E = 1 - \frac{\exp\left[\text{Nut}\left(1 - \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{max}}}\right)\right]}{1 + \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{max}}}} \quad (\text{III.27.a})$$

L'efficacité d'un échangeur de chaleur à contre-courants :

$$E = \frac{1 - \exp\left[\text{Nut}\left(1 - \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{max}}}\right)\right]}{1 - \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{max}}} \exp\left[-\text{Nut}\left(1 - \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{max}}}\right)\right]} \quad (\text{III.27.b})$$

### III.5.2 Méthode du NUT :

C'est un groupement à dimensionnelle, il est appelé nombre d'unité de transfert en abrégé NUT, il représente le pouvoir d'échange de l'appareil.

$$NUT = \frac{UA}{C_{\text{min}}} \quad (\text{III.28})$$

Des abaques fournissent l'efficacité à partir du NUT et du rapport  $\frac{C_{min}}{C_{max}}$  ont été dressés pour la plupart de configurations courantes d'écoulements. Ainsi la méthode de calcul d'un échangeur par la méthode NUT revient à évaluer dans l'ordre :

- U ou K, le coefficient d'échange global,
- $C_f C_c$  et  $\frac{C_{min}}{C_{max}}$ , les capacités calorifiques,
- $\Phi$ , la puissance thermique donnée par l'équation (III.26).

### III.6 Avantages et inconvénients de l'échangeur de chaleur à tube et calandre :

#### III.6.1 Avantages :

- Le tubulaire est un échangeur extrêmement robuste et fiable.
- L'une des raisons d'utiliser un échangeur à tube, c'est qu'il est conçu pour de multiples applications. Cet appareil s'adapte à tous types d'échanges de chaleur. Ainsi, il prend le nom de son usage.
- C'est un équipement industriel qui est apte à résister à de fortes pressions mais aussi à des températures extrêmes.
- Cet échangeur est opérationnel avec des fluides de différentes natures et s'adapte ainsi à différentes applications.

#### III.6.2 Inconvénients :

- Bien que le tubulaire présente de nombreux avantages, il est cependant un équipement encombrant.
- Il est donc primordial de penser à la place que ce dernier occupera au sein de l'industrie. En effet, les échangeurs tubulaires sont des équipements qui peuvent mesurer plusieurs dizaines de mètres de long.
- Le risque de dépôt au sein de l'échangeur tubulaire est à prendre en compte, tout comme le fait que son inspection ne soit pas aisée car le plus souvent il est doté de grands tubes qu'il faut intégralement sortir de l'appareil pour pouvoir les nettoyer.

## **Chapitre IV**

**Simulation par le logiciel COMSOL**

**Multiphysics**

### **IV.1 Historique de COMSOL :**

Le logiciel COMSOL et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de Germund Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'Institut royal de technologie (KTH) à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998, elle portait le nom de FEMLAB.

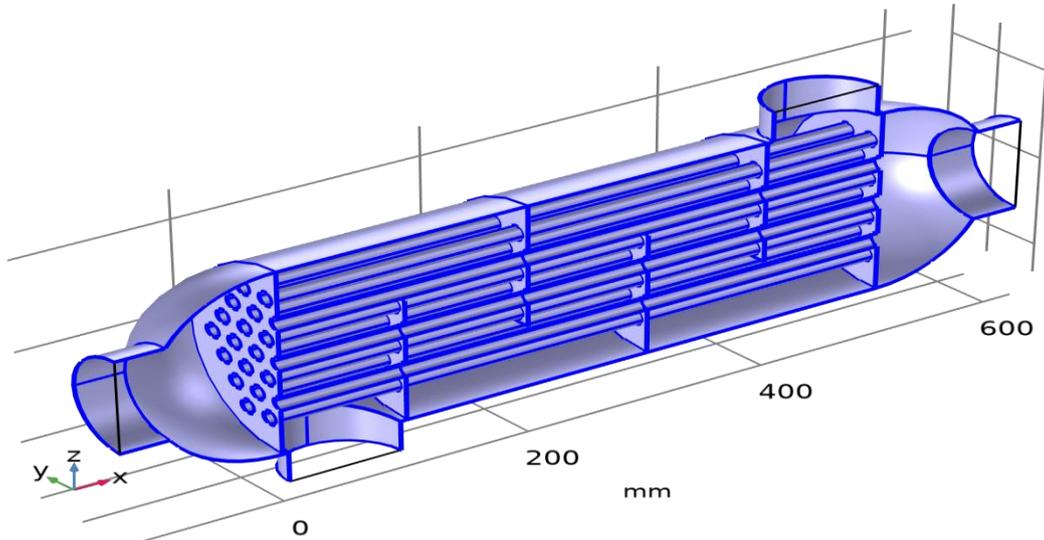
### **IV.2 Présentation de COMSOL Multiphysics :**

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulements, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi des particules, optimisation, microsystèmes électromécaniques (MEMS), ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab.

### **IV.3 Simulation d'un échangeur de chaleur à tubes et calandre à contre-courant :**

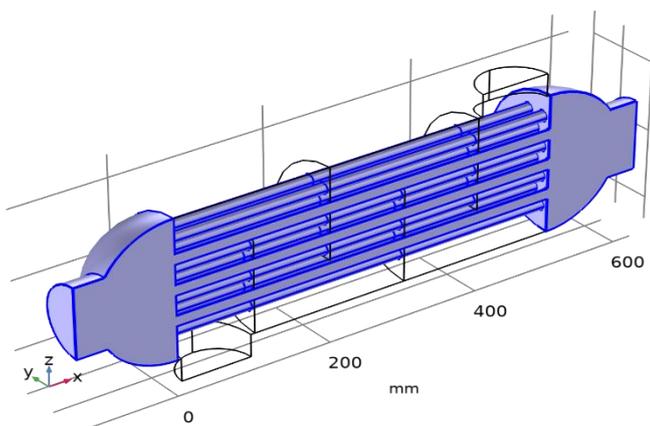
L'échangeur à faisceau tubulaire, aussi appelé échangeur multitubulaire ou échangeur tubes et calandre, est constitué d'un faisceau de tubes disposés à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre. L'un des fluides circule à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre, autour des tubes. Le nombre de chicanes ainsi que leurs formes sont optimisés afin d'améliorer le transfert de chaleur. À chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur des tubes. Leur configuration peut être à une seule ou à plusieurs passes. La calandre est elle aussi munie de tubulures d'entrée et de sortie (connexions) pour le fluide qui circule à l'extérieur des tubes suivant le chemin imposé par les chicanes. Le choix du diamètre des tubes est aussi optimisé en fonction de la nature du fluide qui y circule.

Le but de ce mémoire consiste à étudier le comportement d'un échangeur de chaleur à faisceaux et calandre qui sera mise en réalité grâce à ce logiciel qui nous permet de choisir et contrôler toutes les propriétés physiques, le matériel utilisé et même la géométrie. Dans notre exemple j'ai choisi un échangeur de chaleur à tubes et calandre en Acier AISI 4340.

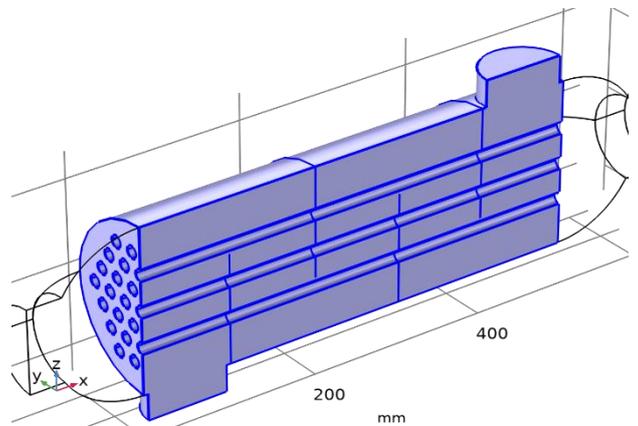


**Figure 20** : Coupe longitudinale de l'échangeur avec les deux passage coté tubes et calandre

L'eau circule dans les tubes avec une vitesse de 0.1 m/s, une pression de 37.8 Pa et une température de 80 °C. A contre sens l'air circule dans la calandre avec une vitesse de 1 m/s, une pression de 13.2 Pa et une température de 5 °C.



**Figure 21** : Eau coté tubes



**Figure 22** : Air coté calandre

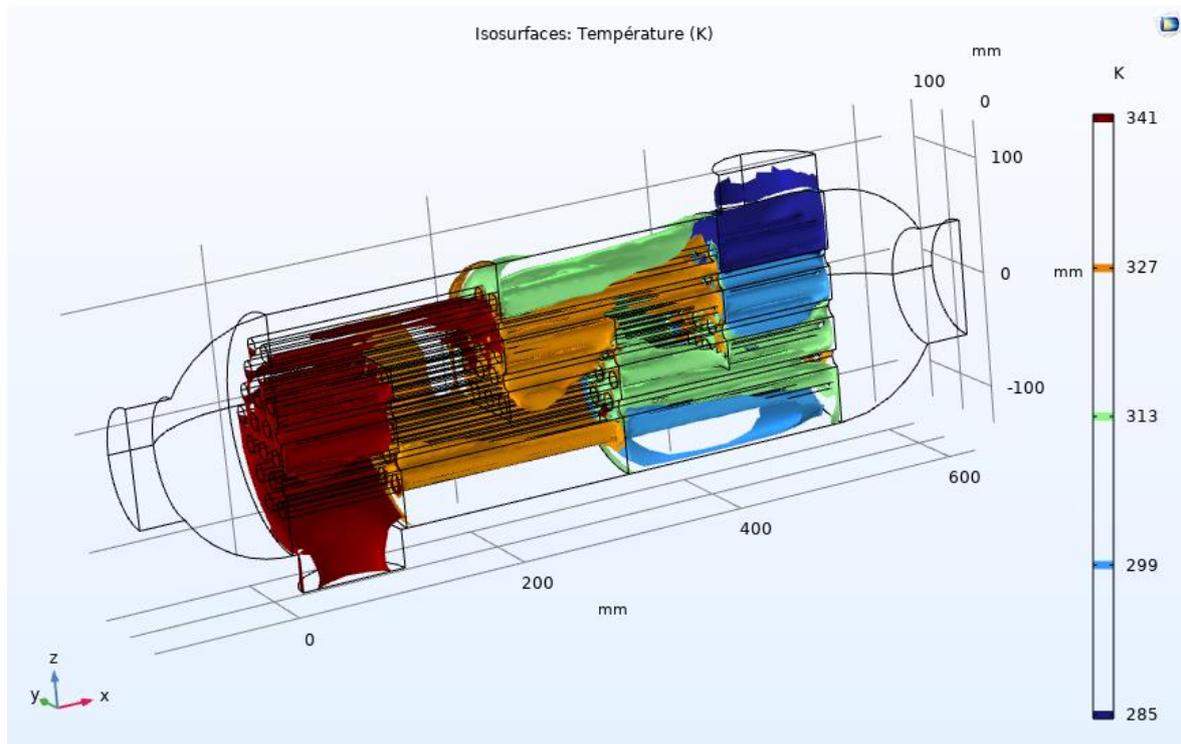


Figure 23 : Variation de la température de l'air dans la calandre

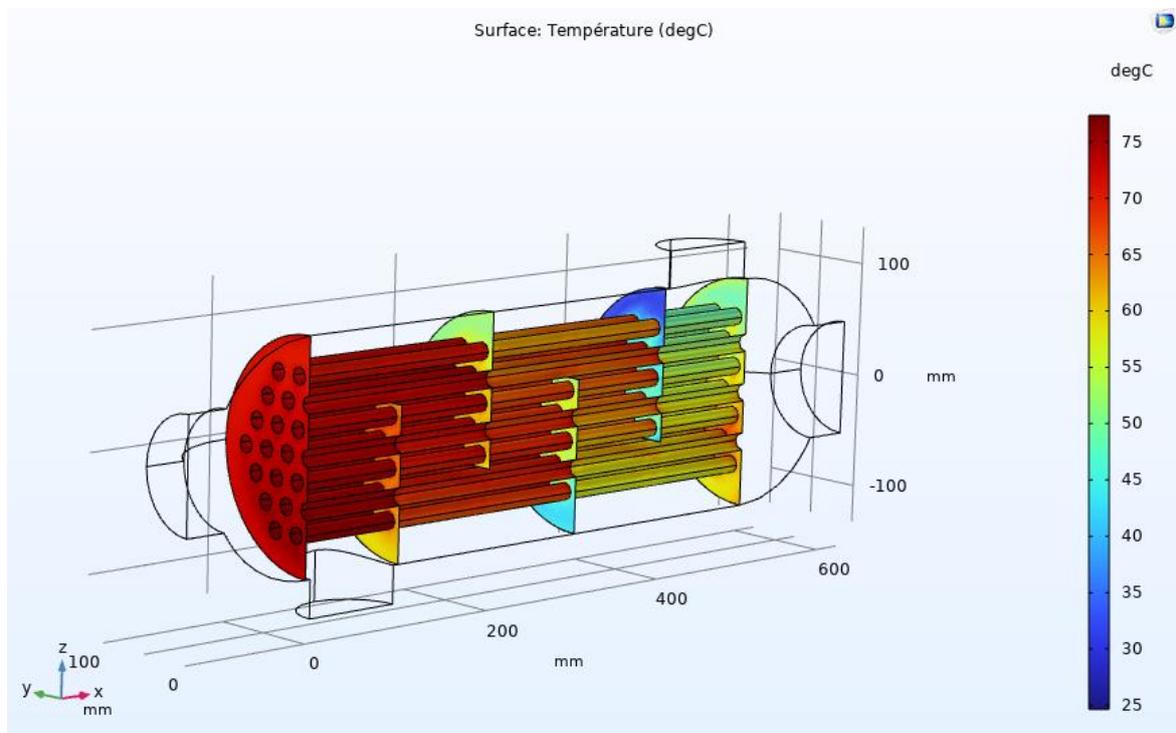


Figure 24 : Variation de la température de l'eau dans les tubes

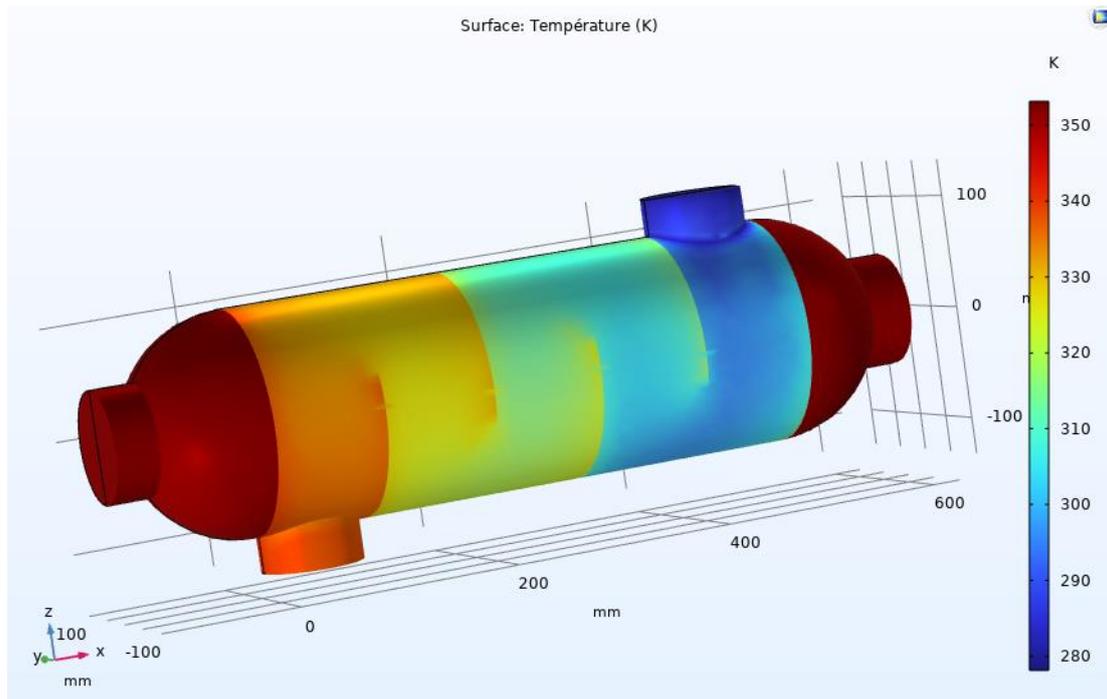


Figure 25 : Variation de la température de paroi externe de la calandre

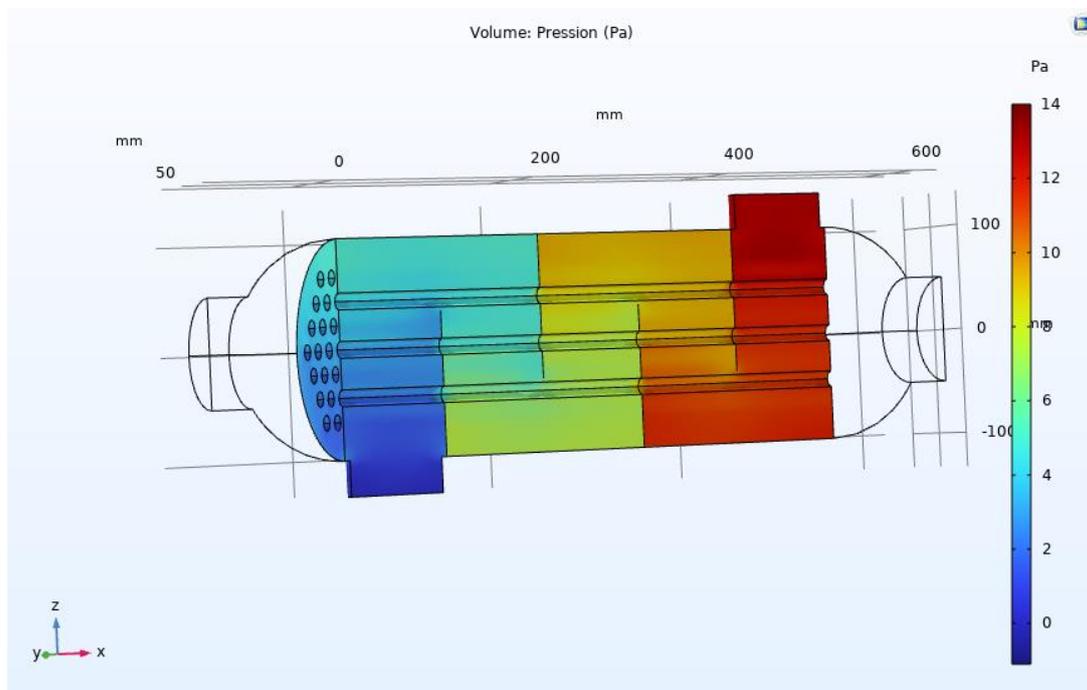


Figure 26 : Variation de la pression de l'air dans la calandre

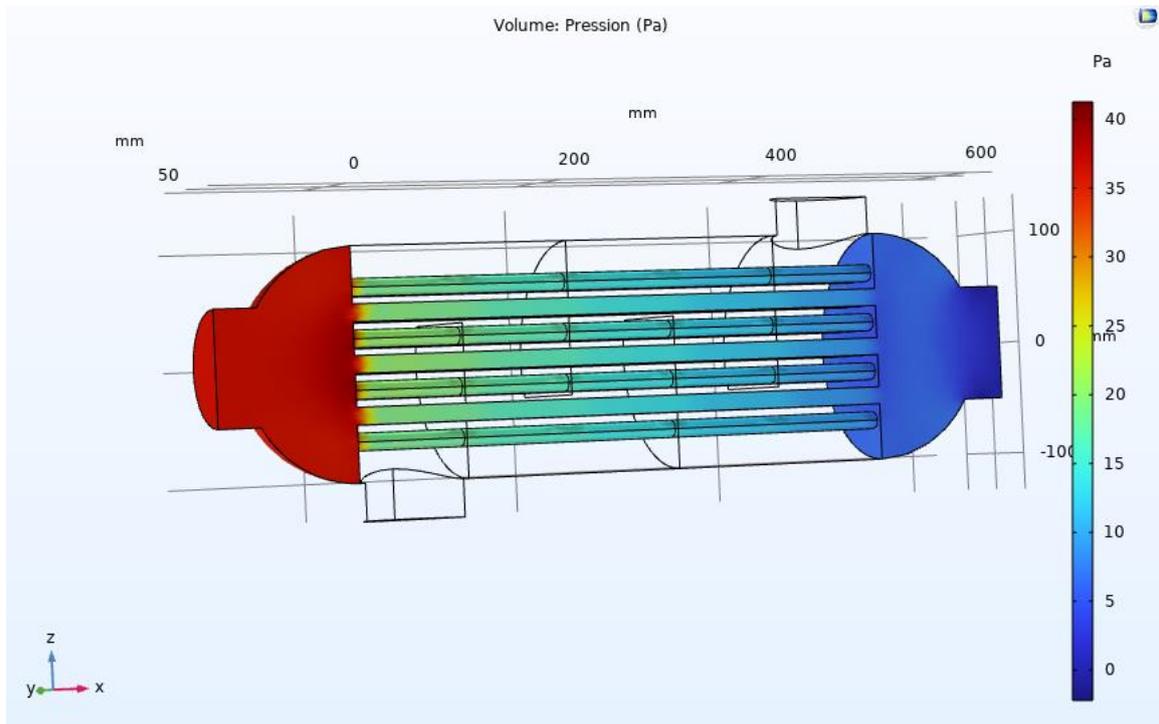


Figure 27 : Variation de la pression de l'eau dans les tubes

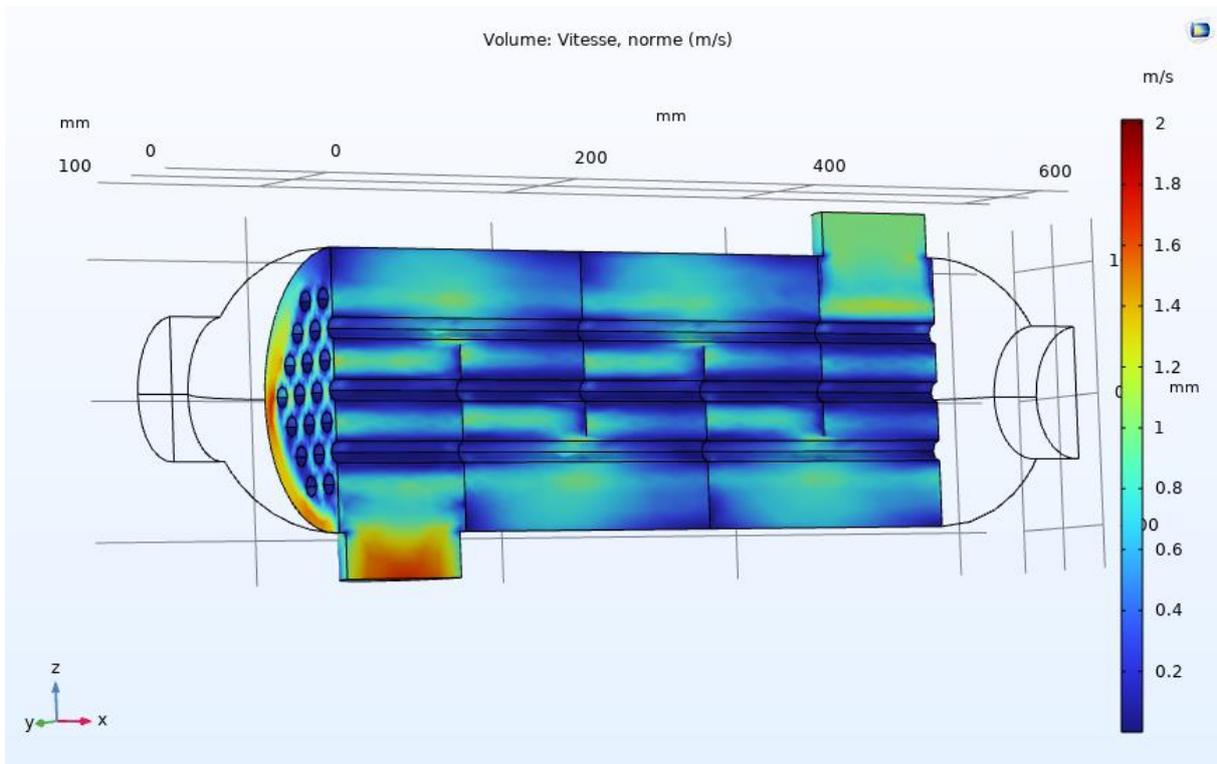


Figure 28 : Variation de la vitesse de l'air dans la calandria

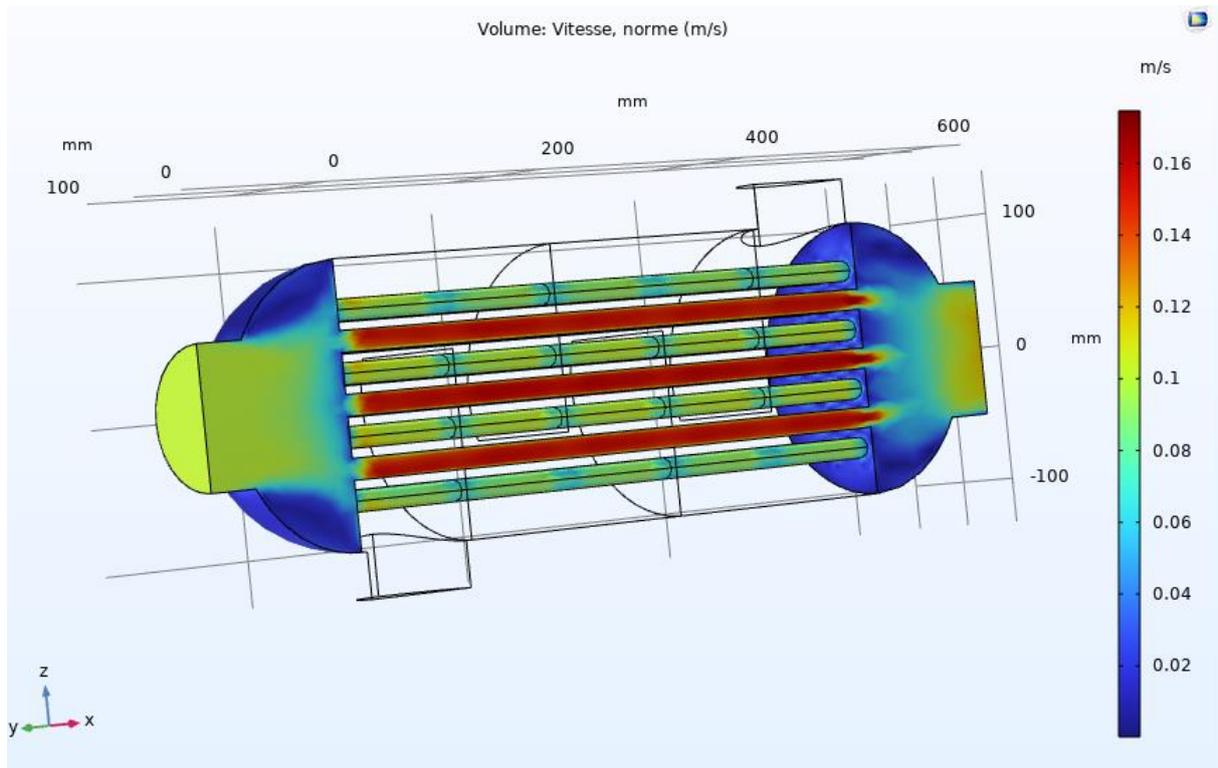


Figure 29 : Variation de la vitesse de l'eau dans les tubes

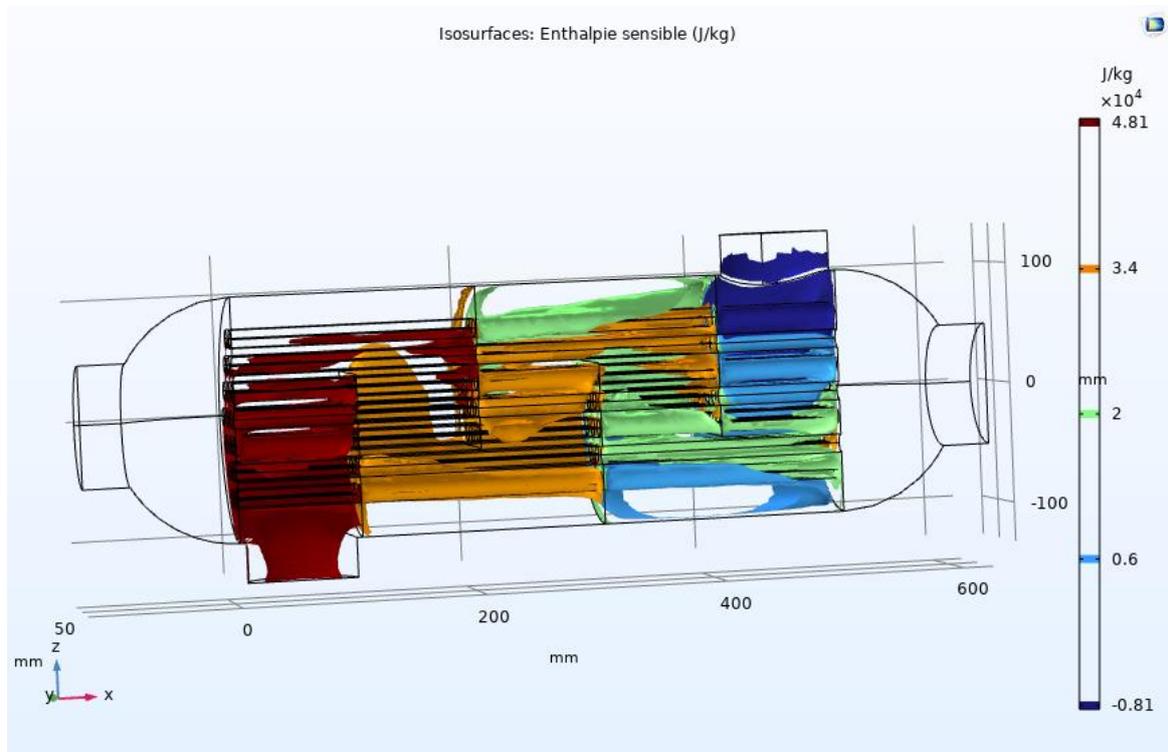


Figure 30 : Variation de l'enthalpie d'air dans la calandria

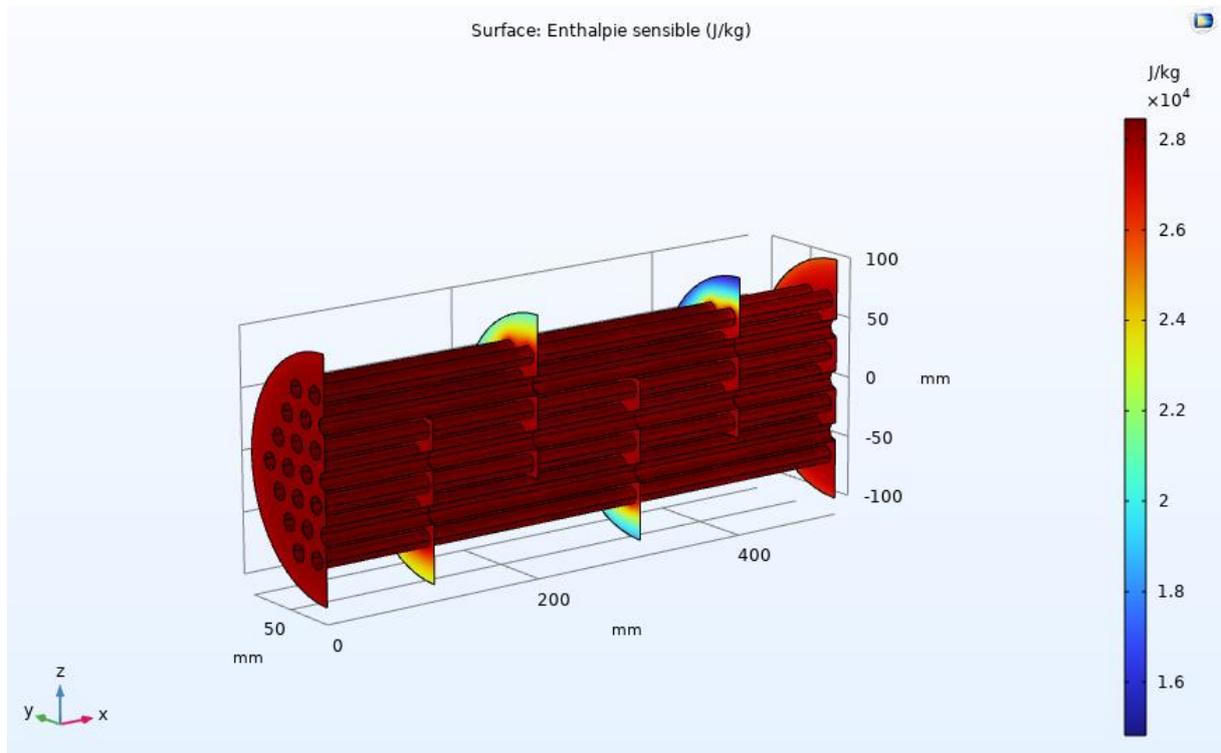


Figure 31 : Variation de l'enthalpie d'eau dans les tubes

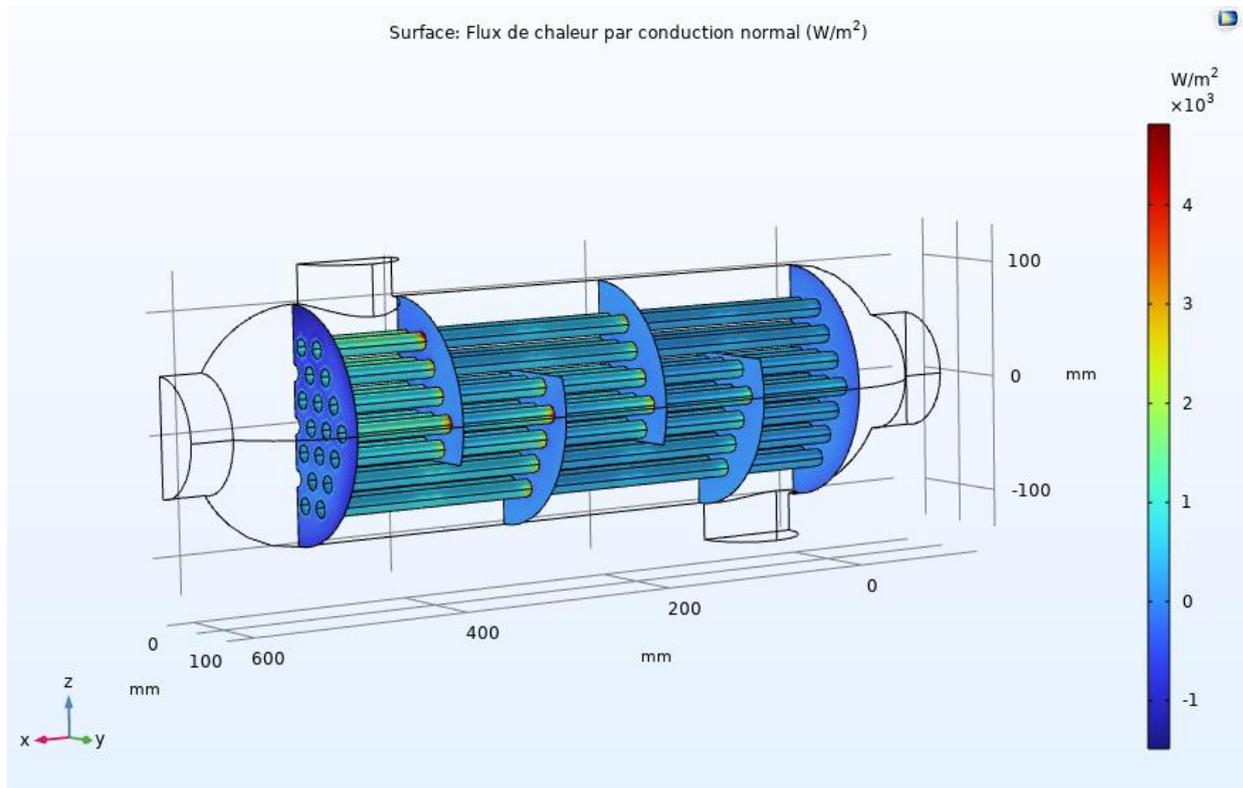


Figure 32 : Flux de chaleur par conduction

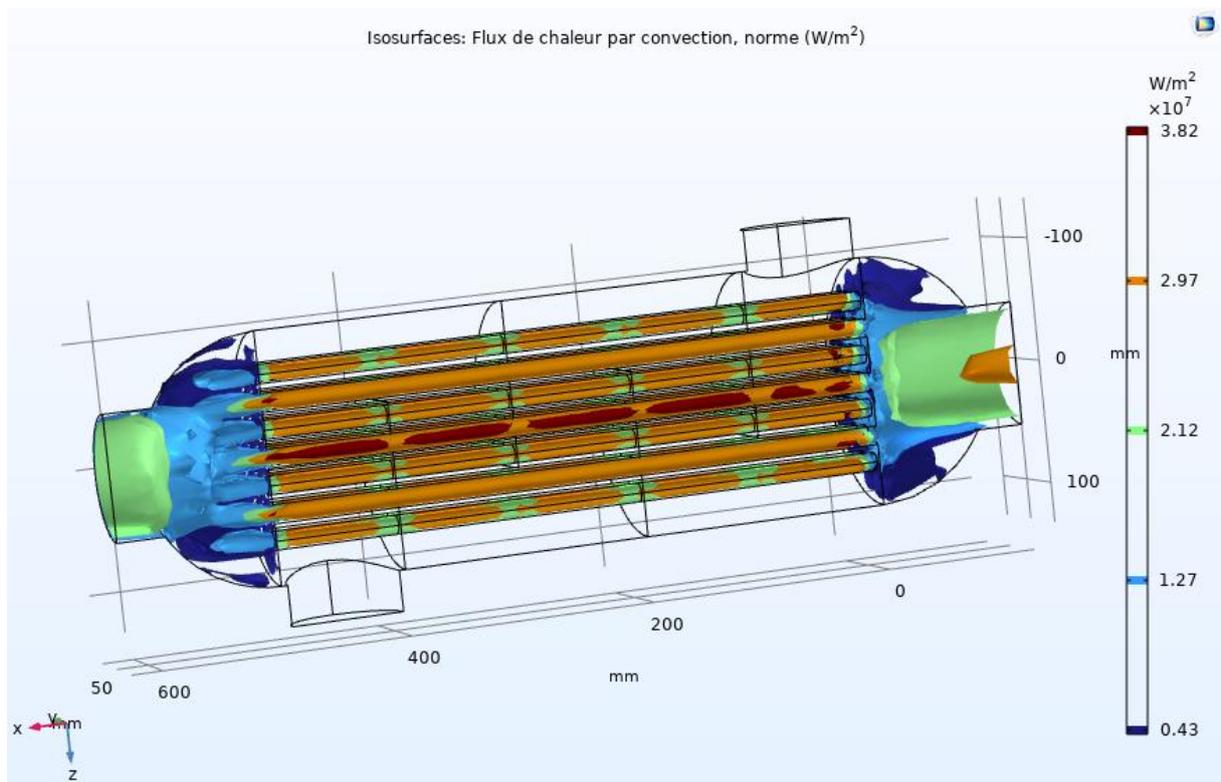


Figure 33 : Flux de chaleur par convection

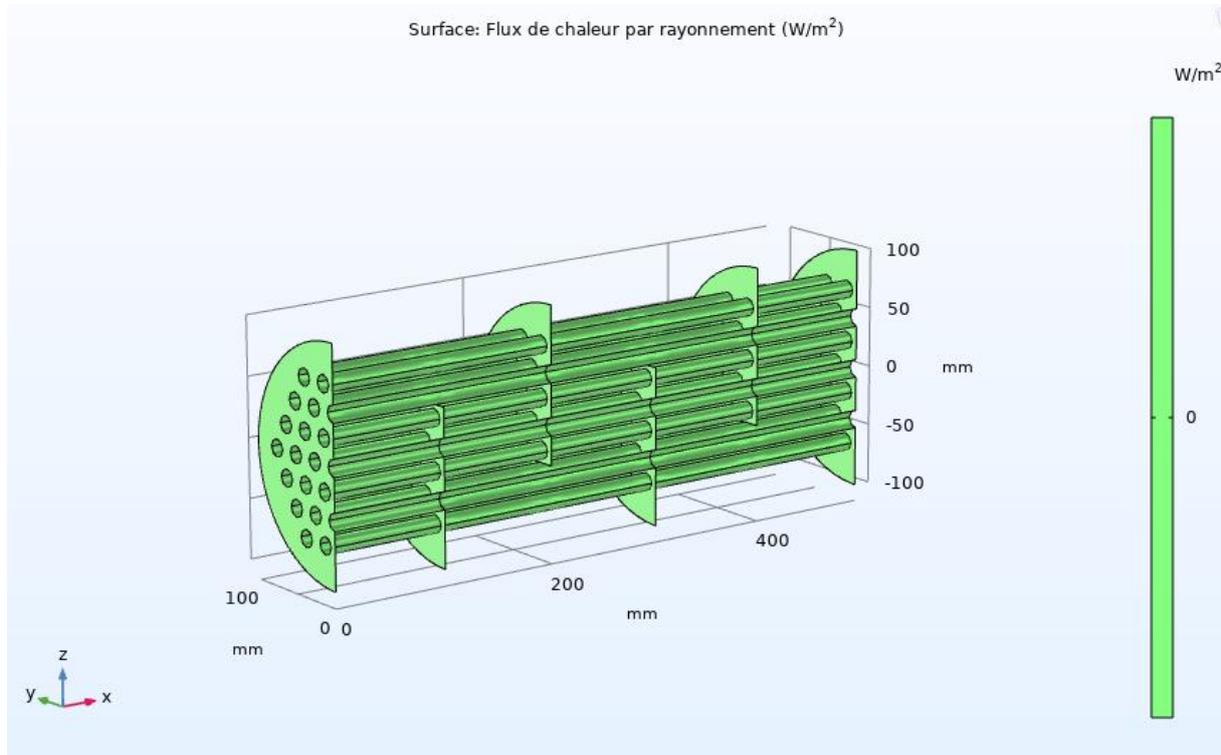


Figure 34 : Flux de chaleur par rayonnement

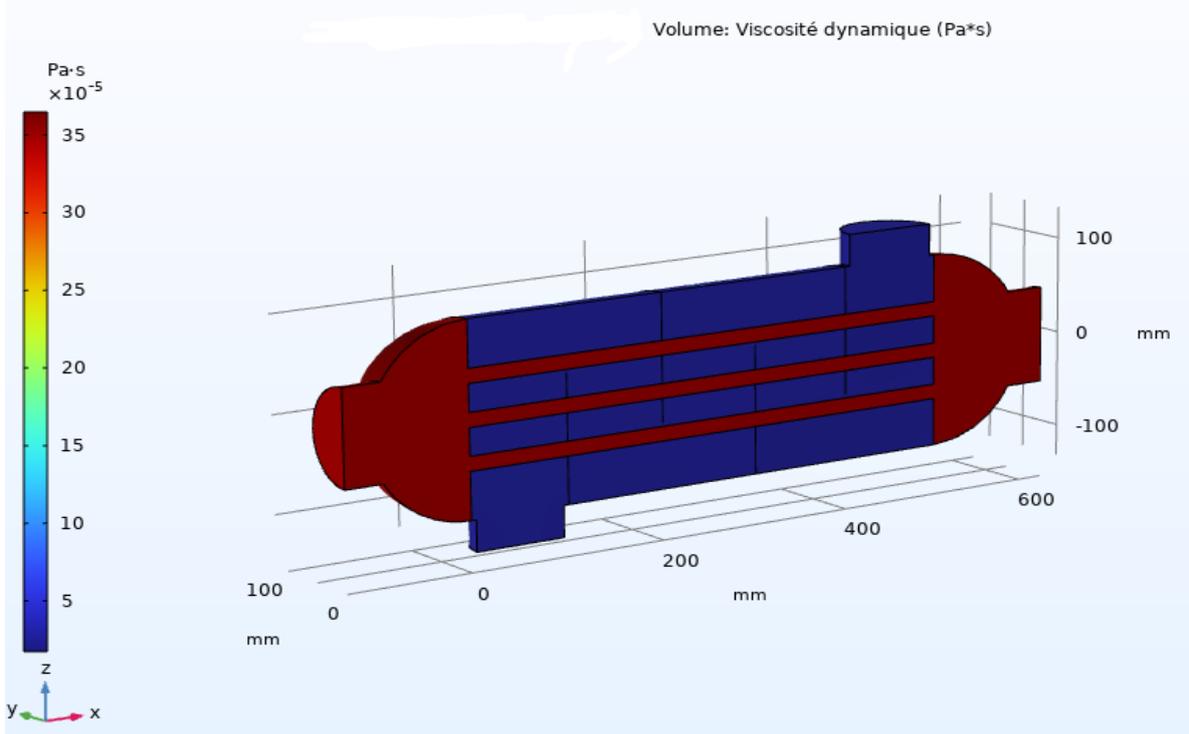


Figure 35 : Présentation de la viscosité dynamique dans l'échangeur

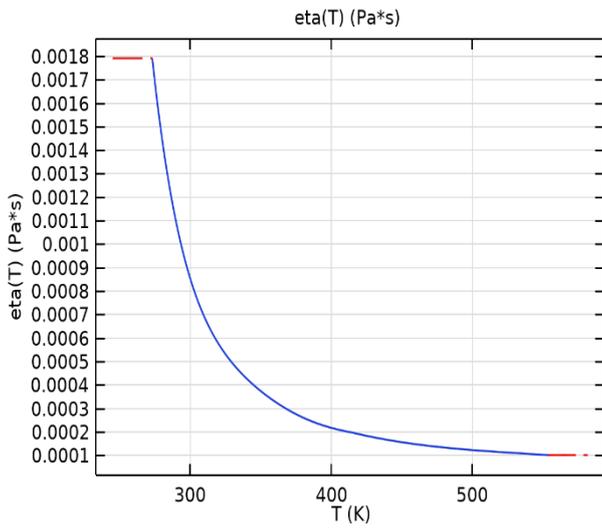


Figure 36 : Viscosité dynamique coté tubes

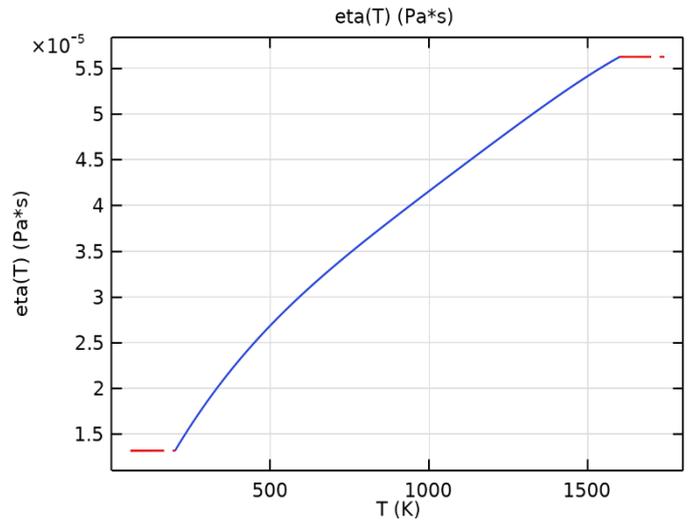


Figure 37 : Viscosité dynamique coté calandre

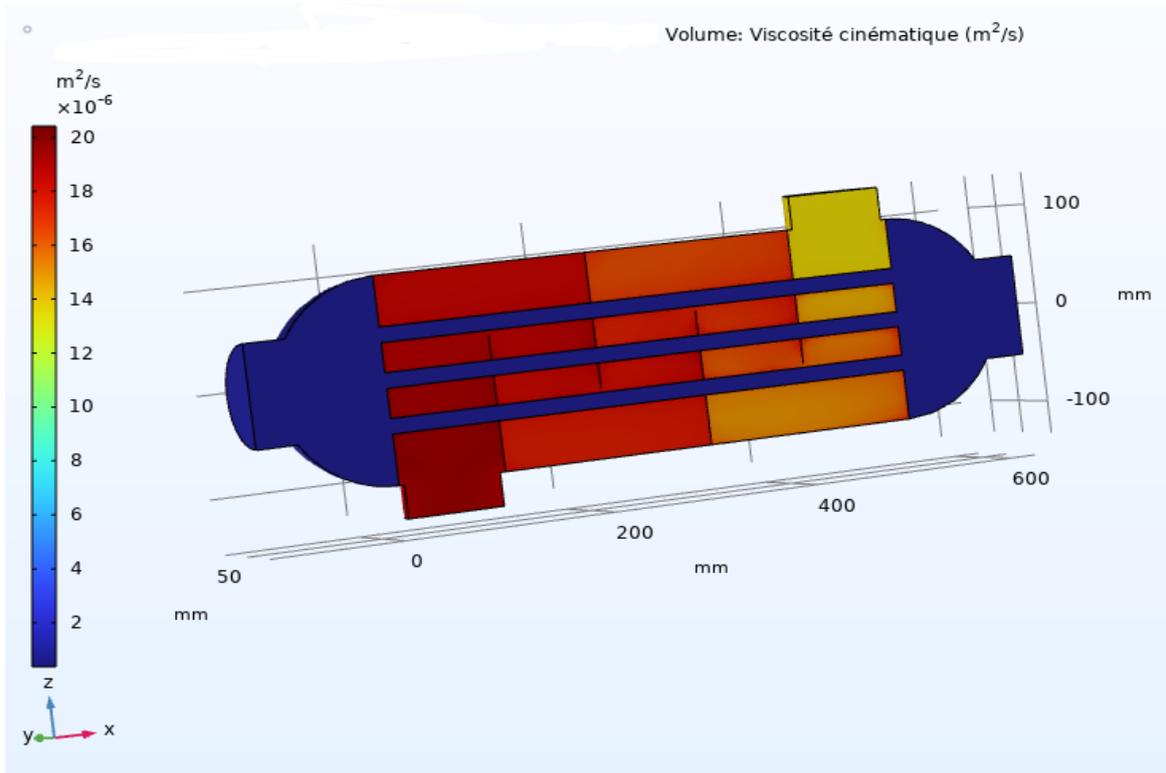


Figure 38 : Présentation de la viscosité cinématique dans l'échangeur

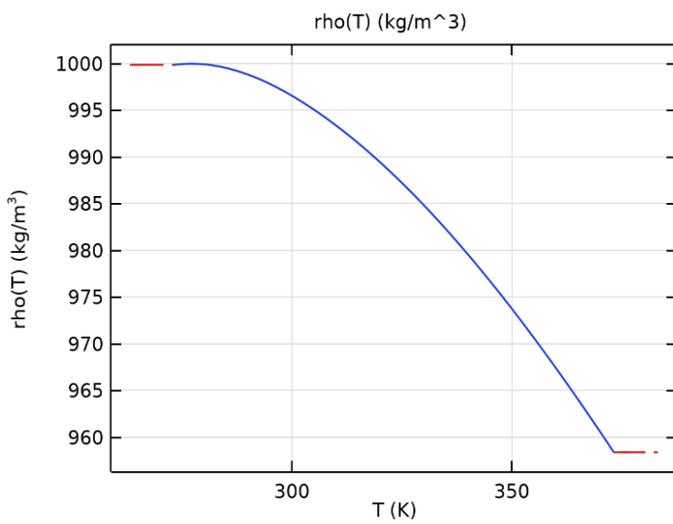


Figure 39 : Masse volumique coté tubes

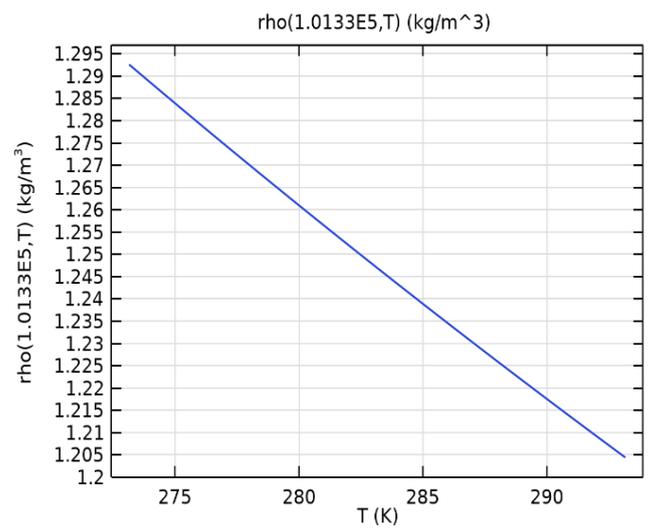


Figure 40 : Masse volumique coté calandre

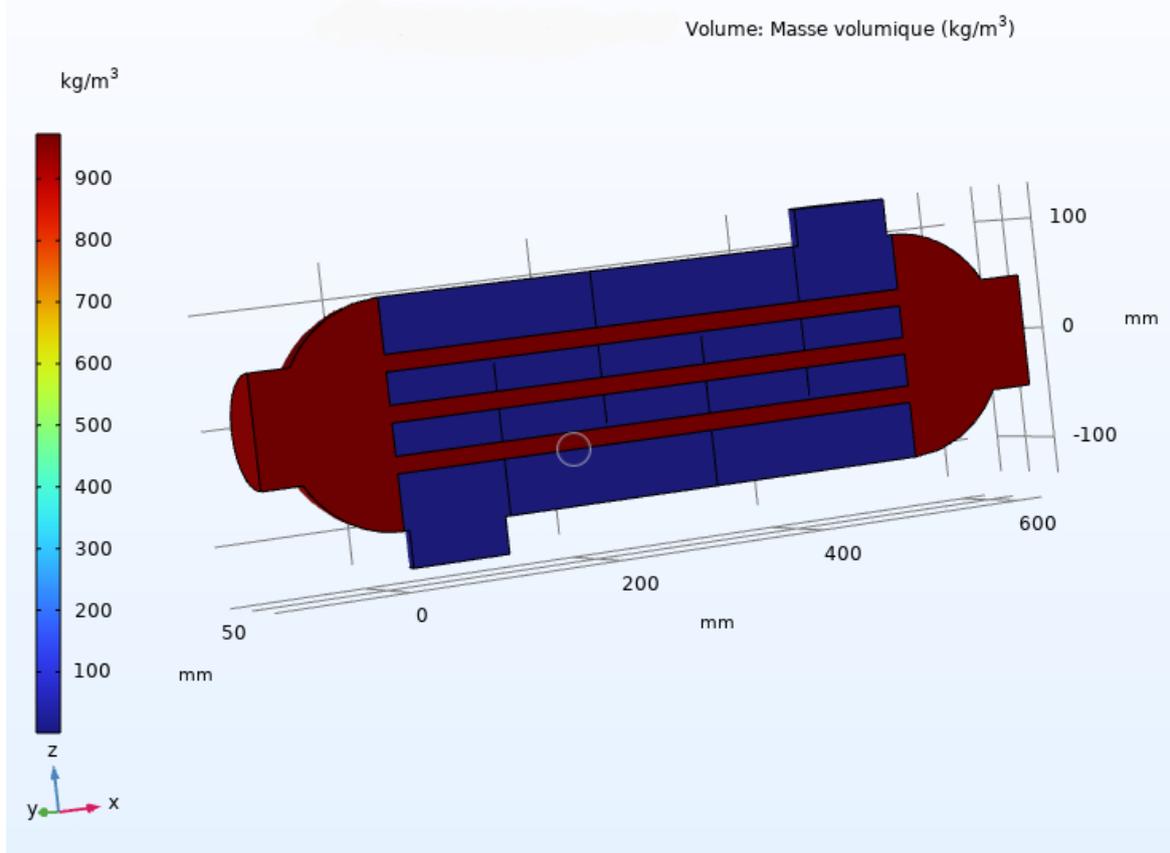


Figure 41 : Présentation de la masse volumique dans l'échangeur

	Température	Masse volumique	Viscosité dynamique	Viscosité cinématique	Chaleur massique	Conductivité thermique	Coefficient de dilatation
Symbole	T	$\rho$	$\mu$	$\nu$	c	$\lambda$	$\alpha$
	-	$\rho\hat{o}$	$mu$	$nu$	-	$lambda$	$alpha$
Unité	°C	kg/m <sup>3</sup>	kg/(m.s)	m <sup>2</sup> /s	J/(kg.K)	W/(m.K)	K <sup>-1</sup>
Valeurs	0	999,9	1,80.10 <sup>-3</sup>	1,80.10 <sup>-6</sup>	4217	0,55	-7,00.10 <sup>-5</sup>
	10	999,7	1,32.10 <sup>-3</sup>	1,32.10 <sup>-6</sup>	4191	0,58	8,80.10 <sup>-5</sup>
	20	998,3	1,01.10 <sup>-3</sup>	1,01.10 <sup>-6</sup>	4181	0,60	2,06.10 <sup>-4</sup>
	30	995,7	8,02.10 <sup>-4</sup>	8,05.10 <sup>-7</sup>	4178	0,61	3,03.10 <sup>-4</sup>
	40	992,2	6,60.10 <sup>-4</sup>	6,65.10 <sup>-7</sup>	4178	0,63	3,85.10 <sup>-4</sup>
	50	987,9	5,55.10 <sup>-4</sup>	5,62.10 <sup>-7</sup>	4180	0,64	4,57.10 <sup>-4</sup>
	60	982,9	4,72.10 <sup>-4</sup>	4,80.10 <sup>-7</sup>	4183	0,65	5,23.10 <sup>-4</sup>
	70	977,5	4,05.10 <sup>-4</sup>	4,14.10 <sup>-7</sup>	4189	0,66	6,43.10 <sup>-4</sup>
	80	971,6	3,52.10 <sup>-4</sup>	3,62.10 <sup>-7</sup>	4196	0,67	6,98.10 <sup>-4</sup>
	90	965,2	3,11.10 <sup>-4</sup>	3,22.10 <sup>-7</sup>	4204	0,68	7,52.10 <sup>-4</sup>
100	958,4	2,80.10 <sup>-4</sup>	2,92.10 <sup>-7</sup>	4215	0,68	-	

Tableau 1 : Caractéristiques thermo-physiques de l'eau

	Température	Masse volumique	Viscosité dynamique	Viscosité cinématique	Chaleur massique	Conductivité thermique	Coefficient de dilatation
Symbole	T	$\rho$	$\mu$	$\nu$	c	$\lambda$	$\alpha$
	-	<i>rho</i>	<i>mu</i>	<i>nu</i>	-	<i>lambda</i>	<i>alpha</i>
Unité	°C	kg/m <sup>3</sup>	kg/(m.s)	m <sup>2</sup> /s	J/(kg.K)	W/(m.K)	K <sup>-1</sup>
Valeurs	20	1,20	1,82.10 <sup>-5</sup>	1,51.10 <sup>-6</sup>	1005	0,026	3,43.10 <sup>-3</sup>
	40	1,13	1,91.10 <sup>-5</sup>	1,70.10 <sup>-6</sup>	1009	0,027	3,20.10 <sup>-3</sup>
	60	1,06	2,00.10 <sup>-5</sup>	1,89.10 <sup>-6</sup>	1009	0,029	3,00.10 <sup>-3</sup>
	80	1,00	2,09.10 <sup>-5</sup>	2,09.10 <sup>-6</sup>	1009	0,030	2,83.10 <sup>-3</sup>
	100	0,95	2,18.10 <sup>-5</sup>	2,30.10 <sup>-6</sup>	1013	0,031	2,68.10 <sup>-3</sup>
	200	0,75	2,58.10 <sup>-5</sup>	3,46.10 <sup>-6</sup>	1026	0,039	2,11.10 <sup>-3</sup>
	500	0,46	3,58.10 <sup>-5</sup>	7,84.10 <sup>-6</sup>	1092	0,057	1,29.10 <sup>-3</sup>
	1000	0,28	4,80.10 <sup>-5</sup>	1,73.10 <sup>-4</sup>	1185	0,077	7,80.10 <sup>-4</sup>

**Tableau 2** : Caractéristiques thermo-physiques de l'air

## IV.4 Discussion des résultats :

### IV.4.1 Effet de la température :

On peut remarquer sur les figures 23 et 24 la variation des températures. La température de l'eau à l'entrée des tubes est entre 75°C et 80°C et au fur et à mesure qu'elle traverse les tubes on peut voir que sa température diminue. C'est pourquoi à la sortie on retrouve une température entre 50°C et 55°C. Contrairement à l'air qui circule dans la calandre à contre sens de l'eau. En effet l'air entre à une basse température qui varie entre 5°C et 12°C et sort à une température plus élevée qui varie entre 60°C et 68°C.

On peut expliquer cette variation de température par l'échange de chaleur qui s'est déroulé entre l'eau et l'air par conduction et convection.

### IV.4.2 Effet de la pression :

Comme l'indiquent les figures 26 et 27, la pression de l'eau diminue tout au long de son parcours dans les tubes. Cette diminution de pression est causée par le fait que la température de l'eau a diminué à cause de l'échange de chaleurs entre l'air et l'eau. C'est le cas également pour la pression de l'air dans la calandre, à la différence que lors de son parcours, l'air rencontre des obstacles en plus, qu'on appelle les chicanes. La diminution de la température était causée par la diminution de pression et aussi les obstacles (les chicanes) qu'il a rencontré lors de son parcours.

### IV.4.3 Effets de la vitesse et de la masse volumique :

- Sur la figure 29 on remarque que la vitesse de l'eau avant l'entrée des tubes est inférieure (0.1m/s) à celle de l'intérieur des tubes (0.16 m/s) et ça revient à la section de passage des tubes qui est logiquement inférieure à la section de passage de la boîte de distribution. Dans la figure 28 on remarque que la vitesse de l'air à la sortie est supérieure à celle de l'entrée et on peut expliquer ça par le parcours de l'air dans la calandre passant par les chicanes qui représentent des obstacles qui ralentissent son mouvement et donc sa vitesse.
- D'après la figure 41 on remarque que la masse volumique de l'eau et de l'air est constante mais en réalité la masse volumique de l'eau à la sortie est inférieure à celle de l'entrée car la masse volumique dépend de la température aussi et la masse volumique de l'eau à la sortie est plus élevée car la température de l'eau augmente et donc la masse volumique aussi.

### IV.4.4 Etude d'enthalpie :

D'après les figures 30 et 31 on remarque que l'enthalpie de l'eau diminue à la sortie par rapport à l'entrée, cependant l'enthalpie de l'air à la sortie est plus élevée par rapport à l'entrée et ça explique le transfert de chaleur par convection entre la paroi externe des tubes et l'air ce qui fait que la température de l'air augmente à la sortie ce qui explique l'augmentation de l'enthalpie de l'air à la sortie de la calandre et la diminution de l'enthalpie de l'eau à la sortie des tubes.

### IV.4.5 Etude des transferts thermiques :

- Sur la figure 32 on remarque que le flux par conduction est généralement constant tout au long des tubes, les chicanes jouent le rôle de promoteurs de turbulence et améliorent le transfert thermique.
- Sur la figure 33 on remarque que le transfert de chaleur par convection à l'entrée dans la boîte de distribution est plus faible par rapport à la convection dans les tubes et ça revient au contact d'air avec la paroi externe des tubes.
- Comme l'indique la figure 34, le flux de chaleur par rayonnement est négligeable car dans ce cas on n'a pas des très hautes températures.

### IV.4.6 Effet de la viscosité :

- La figure 35 montre que la viscosité dynamique reste constante pour l'eau et l'air d'où celle de l'air est inférieure à celle de l'eau et cela revient aux caractéristiques des deux fluides, mais en réalité il y a des petits changements par rapport aux variations de température qui ne sont pas visibles sur figure.
- Dans la figure 38 on remarque que la viscosité cinématique de l'eau à la sortie est plus élevée que celle de l'entrée et ça revient aux caractéristiques de l'eau à la sortie elle augmente légèrement car la température de l'eau diminue à la sortie. Contrairement pour l'air la viscosité cinématique augmente en augmentant la température.

## Conclusion Générale

L'échangeur thermique est, aujourd'hui, présent dans de nombreux appareils du quotidien. Il se charge du transfert d'énergie calorifique entre des fluides. Il est utile dans les systèmes de chauffage ou dans la réfrigération. Cet appareil reste très pratique pour les industries et intervient dans différents domaines, notamment dans les installations thermiques industrielles. Il existe différents types d'échangeurs de chaleur : l'échangeur tubulaire et l'échangeur à plaques et joints. Le premier s'utilise le plus dans le domaine industriel, il représente même 60% des installations existantes.

La plupart des échangeurs tubulaires utilisés dans l'industrie chimique, pétrolière et pétrochimique sont conçus en respectant les normes "Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association" *TEMA*. En particulier les différents types de chambres de distribution, calandres et fonds sont répertoriés

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

Il a été montré, dans l'étude entreprise, que le fonctionnement de l'échangeur de chaleur tubulaire dépend de nombreux paramètres dont les plus importants sont la température, la pression des fluides, les propriétés physiques ainsi que le régime et le sens de l'écoulement. La simulation menée dans le cadre de cette étude montre que :

- La température dépend de la nature et les débits des fluides et de la nature et le sens de l'écoulement.
- La pression dépend de la température et la vitesse de circulation des fluides et de leurs caractéristiques physiques, à savoir : densité et viscosité, ainsi que la géométrie de l'appareil.

- Le régime de l'écoulement dépend de la vitesse des fluides qui dépend de la géométrie de l'échangeur de chaleur et le chemin suivi par le fluide.
- Le transfert de chaleur par conduction dépend de la conductivité thermique et l'épaisseur de la paroi.
- Le transfert de chaleur par convection dépend de la nature chimique du fluide, la surface d'échange et le régime de l'écoulement.
- La performance de l'échangeur dépend de la surface d'échange entre les deux fluides et donc il faut l'entretenir régulièrement pour éviter les bouchages des conduites ce qui baisse la surface d'échange et donc son rendement.

## Références Bibliographiques

1. **H. Mzad**, Cours personnels : Transferts thermiques, Université Badji Mokhtar, Annaba, (2020).
2. **H. Mzad**, Cours personnels : Echangeurs de chaleur, Université Badji Mokhtar, Annaba, (2021).
3. **M. Bennai & O. Daoudi**, Etude et simulation tridimensionnelle d'un échangeur de chaleur à tubex et calandre (à contre-courant), Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, (2018).
4. **N. E. Deziri**, Simulation d'une conception d'un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire et calandre, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, (2017).
5. **Z. Chamouma & Y. Benyattou**, Le dimensionnement des échangeurs de chaleur avec les méthodes DTLM et NUT, Mémoire de master, Université Abdelhamid Ben Badis, Mostaganem, (2020).
6. **A. A. Nehari**, Étude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaques et joints : Application aux fluides géothermiques, Mémoire de master ; Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, (2011).
7. **R. Leleu**, Transferts de chaleur, Techniques de l'ingénieur, (1992).
8. **A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier & R. Vidil**, Echangeurs de chaleur – Description des échangeurs, Techniques de l'ingénieur, (1995).
9. **P. Clément**, Echangeurs de chaleur – Problèmes de fonctionnement, Techniques de l'ingénieur, (2021).
10. **Y. Jannot**, Introduction aux échangeurs de chaleurs, LEPT-ENSAM, Bordeaux, (2016).
11. **E. Cao**, Heat transfer in process engineering, 1<sup>st</sup> edition, McGraw-Hill Education, New York, (2010).
12. **A. Leontiev**, Théorie des échanges de chaleur et de masse, Edition Mir, Moscou, (1985).
13. **J. F. Sacadura**, Initiation aux transferts thermiques, Technique et Documentation, Paris, (1978).
14. **W. H. Mac Addams & A. Beaufils**, La transmission de la chaleur, Edition Dunod, Paris, (1961).
15. **F. P. Incropera & D. P. Dewitt**, Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley, New York, (2002).

## Sites Web

16. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
17. <http://processs.free.fr/Pages/VersionWeb.php?page=4520>
18. <https://docplayer.fr/10405888-References-a-leontiev-theorie-des-echanges-de-chaleur-et-de-masse-edition-mir-moscou.html>
19. <https://www.axxair.com/fr/blog/echangeurs-de-chaleur-tubulaires-principes-et-applications>
20. <https://thermofin.net/fr/produits/caleos-echangeurs-faisceau-tubulaire/>