

**République Algérienne Démocratique Et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Centre Universitaire Salhi Ahmed - Naama**



Institut des Sciences et Technologie  
Département de Technologie

**MEMOIRE**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en:  
**GENIE MECANIQUE**  
Option: **Énergétique**

**Intitulé:**

---

**Etude de L'encrassement d'un échangeur  
de chaleur à plaques**

---

**Préparé par:**

- \* Haouli Ibrahim
- \* Khelifi Ismail

**Soutenu le: 29/09/2020**

**Examiné par le jury:**

MEDJAHED Driss	MCB	Centre Universitaire Naâma	Président
BOUBOUA N	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
TAIBI Ibrahim	Pr	Centre Universitaire Naâma	Examineur

**Naama – Algérie: 2020**

## **REMERCIEMENTS**

Nos remerciements vont à notre encadreur Mr le professeur BOUNOUA NOURDDINNE pour son assistance et sa contribution à l'avancement de ce travail.

Nous le remercions aussi pour sa disponibilité et pour toutes les remarques et les précieux conseils prodigués.

De même, le professeur Karima Boukhadia, pour sa précieuse assistance et pour les informations qu'elle nous a fournies.

A tous les enseignants du génie mécanique qui ont contribué à notre formation pendant ces années d'études et particulièrement aux enseignants du département énergétique.

## LISTE DES FIGURES

- Figure I.1 : Échangeur monotube en serpentif
- Figure I.2 : Échangeur coaxial
- Figure I.3 : Échangeur à tube séparé
- Figure I.4 : Échangeur à tube rapproché
- Figure I.5 : Échangeur à tube ailette
- Figure I.6 : Échangeur à tête flottante
- Figure I.7 : Échangeur à plaque tubulaire fixe
- Figure I.8 : Échangeur à tube en U
- Figure I.9 : Échangeurs à plaques et joints
- Figure I.10 : Silhouette d'un échangeur à plaques et joints
- Figure I.11 : Vue éclatée échangeur à plaques et joints
- Figure I.12 : Exemple de profils pour augmenter la turbulence
- Figure I.13 : Plaque à cannelures droites
- Figure I.14 : Plaques à cannelures en chevron
- Figure I.15 : Schéma explicite du montage d'un joint
- Figure I.16 : Zone de circulation délimitée par l'espace entre plaques
- Figure I.17 : Plaque à canal large
- Figure I.18 : Plaque à double paroi
- Figure I.19 : Plaque semi-soudée
- Figure I.20 : Profil d'écoulement d'une plaque
- Figure I.21 : Représente l'auto centrage dans une plaque
- Figure I.22 : Le joint sans colle
- Figure I.23 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques jointé
- Figure I.24 : Distributions monopasses en Z dans un échangeur à plaques et joint
- Figure I.25 : Distribution monopasses en U dans un échangeur à plaques et joint
- Figure I.26 : Circulation multipasse avec un nombre égal de passes des deux cotés
- Figure I.27 : La circulation des fluides est latérale
- Figure I.28 : La circulation des fluides est diagonale
- Figure I.29 : Assemblage des plaques
- Figure I.30 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre courants
- Figure I.31 : Exemples d'échangeurs à courants croisés
- Figure II.1: Importante corrosion

Figure II.2: Entartrage d'une chaudière à tubes de fumée (P= 15 bars)

Figure II.3 : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière MP

Figure II.4: Nettoyage à l'eau sous pression

Figure II.5 : Photo de plaques d'un échangeur de chaleur encrassé

Figure II.6: Echange entre deux fluides séparés par Une paroi plane

Figure II.7: Schéma de principe d'un échangeur de chaleur à plaque

Figure II.8. Schéma et prototype du dispositif de mesure du facteur d'encrassement par onde acoustique

Figure II.9. Représentation schématique de la cellule de mesure du capteur mécatronique

Figure II.10. Photo du dispositif de mesure de la conductivité électrique

Figure III. 1 : Modèle géométrique

Figure III. 2 : maillage du modèle

La figure IV.1 distribution de la température dans le lait le long de la plaque

La figure IV.2 profil de la température le long a)d'une plaque saine et b)une plaque encrassé

La figure IV.3 profil de la température pour a)un échangeur à 10 passes saint et b)un échangeur à 10 passe encrassé

figure IV.4 pertes de charges le long c)d'une plaque saine et d) une plaque encrassé

figure IV. 5 profil de la chute de pression pour a)un échangeur à 10 passes saint et b)un échangeur à 10 passe encrassé

La figure IV .6 Profil de la température le long de l'échangeur pour différentes valeurs de l'épaisseur du dépôt encrassant

La figure IV .7 Les pertes de pressions dans un échangeur à chaleur à 10 passes pour différentes épaisseurs du dépôt

La figure IV .8 La distribution des températures le long de notre modèle pour différentes épaisseurs du dépôt encrassant.

La figure IV.9 variation de la température le long de l'échangeur pour différent valeurs de la conductivité thermique du dépôt encrassant

La figure IV.10 les pertes de charges le long de l'échangeur pour différent valeurs de la conductivité thermique du dépôt encrassant

La figure IV.12 Profil de la température le long d'une plaque avec 1mm d'encrassement de notre échangeur pour différents débits du fluide traité

La figure IV.13 Pertes de charges le long d'une plaque avec 1mm d'encrassement de notre échangeur pour différents débits du fluide traité

## **LISTE DES TABLEAU**

Tableau I.1 : Principe de la méthode du DTLM

Tableau I.2 : Principe de la méthode NUT

Tableau II.1: Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur

Tableau II.2 : Caractéristiques géométriques des plaques

Tableau II.3 : Paramètres physico-chimique du lai

Tableau III.1 : Caractéristiques et dimensions du modèle géométrique

Tableau III. 2 : Les propriétés da la plaque

Tableau III. 3 : Les propriétés dépôt encrassant

Tableau III. 4 : les propriétés du lait

Tableau III. 5 : type et nombre d'élément utilisé Pour la discrétisation du modèle

## Nomenclature

### Lettres latines:

C	La concentration	(kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>a</sub>	La concentration initial en protéine native	(kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>c</sub>	capacité calorifique du fluide chaud	(J/k s)
C <sub>f</sub>	capacité calorifique du fluide froid	(J/k s)
C <sub>p</sub>	La chaleur spécifique	(J/kg K)
C <sub>pc</sub> , C <sub>pf</sub>	chaleur massique à pression constant des deux fluide	(J/kg K)
C <sub>pp</sub>	chaleur massique du produit	(J/kg K)
C <sub>pec</sub>	chaleur massique de l'eau chaude	(J/kg K)
C <sub>min</sub>	capacité calorifique minimal entre les deux fluides	(J/k.s)
C <sub>max</sub>	capacité calorifique maximal entre les deux fluides	(J/k.s)
D	Diamètre	(m)
D <sub>h</sub>	Diamètre hydraulique	(m)
D <sub>h0</sub>	diamètre hydraulique encrassé	(m)
d <sub>p</sub>	diamètre du cristal	(m)
e	Epaisseur	(m)
e <sub>d</sub>	Epaisseur de dépôt	(m)
E , eff	efficacité	(%)
E <sub>A</sub>	énergie d'activation	(j.mol <sup>-1</sup> )
f	le coefficient de frottement de la plaque	
F	facteur correctif	
g	accélération de la pesanteur	(m.s <sup>-2</sup> )
h	Coefficient d'échange par convection	(W/m <sup>2</sup> /K)
h <sub>ext</sub>	Coefficient d'échange convectif extérieur propre	(W/m <sup>2</sup> /K)
h <sub>int</sub>	Coefficient d'échange convectif intérieur propre	(W/m <sup>2</sup> /K)
H	dégradation d'échange	
L	La longueur de la plaque	(m)
l	La largeur de la plaque	(m)
ṁ <sub>c</sub> , ṁ <sub>f</sub>	débit massique des deux fluide	(kg/s)
m <sub>di</sub>	La masse de dépôt du canal i	(kg)
ṁ <sub>ec</sub>	débit massique de l'eau chaud	(kg/s)
m <sub>s</sub>	La masse de dépôt	(kg)
m <sub>s</sub> <sup>*</sup>	La valeur asymptotique de m <sub>s</sub>	(kg)
m <sub>mc</sub>	dépôt de masse totale sur les canaux modifiés	(kg)

$m_{nmc}$	dépôt de masse totale sur les canaux non modifiés	(kg)
$\dot{m}_p$	débit massique du produit	(kg/s)
$\dot{m}_{ec}$	débit massique de l'eau chaud	(kg/s)
$p$	La pression	(Pa)
$R_d$	La résistance du dépôt encrassant	(m <sup>2</sup> K/W)
$R_d^*$	La résistance asymptotique du dépôt encrassant	(m <sup>2</sup> K/W)
$R_f$	La résistance thermique d'encrassement	(m <sup>2</sup> K/W)
$R_p$	rapport pondéral	
$R_p$	résistance thermique propre	(m <sup>2</sup> K/W)
$R_f$	rapport des capacités thermique (fluide / produit)	
$R_1, R_2$	résistance d'encrassement	(m <sup>2</sup> K/W)
$S$	Surface de la plaque	(m <sup>2</sup> )
$S_{ext}$	Surface extérieur	(m <sup>2</sup> )
$S_{int}$	Surface intérieur	(m <sup>2</sup> )
$T$	La température	(K)
$T_{solide}$	Température du solide	(K)
$T_{fluide}$	Température du fluide	(K)
$T_e$	Température entrée	(K)
$T_s$	Température sortie	(K)
$T_p$	La Température à la paroi	(K)
$T_{ce}$	La Température entrée du fluide chaud	(K)
$T_{cs}$	La Température sortie du fluide chaud	(K)
$T_{fe}$	La Température entrée du fluide froid	(K)
$T_{fs}$	La Température sortie du fluide froid	(K)
$T_{ep}$	Température d'entrée du produit	(K)
$T_{sp}$	Température sortie du produit	(K)
$T_f$	Température de film	(K)
$t$	temps	(s)
$u$	Vitesse de l'écoulement	(m/s)
$u_m$	vitesse moyenne	(m/s)
$U$	Coefficient d'échange global	(W/m <sup>2</sup> /K)
$U_0$	Coefficient d'échange global à l'état propre	(W/m <sup>2</sup> /K)
$U_d$	Coefficient d'échange global à l'état encrassé (dépôt)	(W/m <sup>2</sup> /K)
$(U)_p$	Le coefficient d'échange globale en condition propres	(W/m <sup>2</sup> /K)
$(U)_d$	Le coefficient d'échange globale en condition encrassant	(W/m <sup>2</sup> /K)

$V_f$	Volume du fluide	(m <sup>3</sup> )
$V_t$	Volume total	(m <sup>3</sup> )
$w$	vitesse du fluide	(m/s)
$x_f$	épaisseur de la couche de dépôt	(m)

### Constantes :

$a, b, c, k_1, k_2$  Constantes  
 $K_d, k_r$  Constantes de dépôt et d'arrachement

Nombres adimensionnels

$Bi$	Nombre de Biot
$Nu$	Nombre de Nusselt
$Pr$	Nombre de Prandtl
$Rn$	Nombre de Reynolds

### Symboles Grecs :

$\frac{dm_s}{dt}$	taux d'encrassement net	
$\rho$	La masse volumique	(kg/m <sup>3</sup> )
$\lambda$	La conductivité thermique	(w/m/K)
$\lambda_d$	Conductivité thermique du dépôt	(w/m/K)
$\mu$	La viscosité dynamique	(kg/m/s)
$\nu$	La viscosité cinématique	(m <sup>2</sup> /s)
$\varphi$	Densité du flux massique	(kg/m <sup>2</sup> /s)
$\tau$	Contrainte	(pa)
$\tau_w$	Contrainte pariétale exercée par le fluide sur la paroi	(pa)
$\delta$	Coefficient d'expansion linéaire de la couche de dépôt	(k <sup>-1</sup> )
$\sigma_f$	Force d'adhésion de la couche de dépôt	(pa)
$\varphi_{conv}$	densité de flux par convection	(kg/m <sup>2</sup> /s)
$\varphi_{cond}$	densité de flux par conduction	(kg/m <sup>2</sup> /s)
$\Phi$	Flux de la chaleur	(m <sup>2</sup> K/J)
$\Phi_{max}$	Le flux maximal	(m <sup>2</sup> K/J)
$\Phi_p$	Le flux de chaleur en condition propres	(m <sup>2</sup> K/J)
$\Phi_r$	taux de décrochement	
$\Phi_d$	taux croissance de dépôt	
$\Delta C_i$	variation de la concentration de protéine native entre l'entrée et la sortie du canal i	(kg/m <sup>3</sup> )
$\Delta P_0$	perte de charge de l'installation du produit	(pa)
$\Delta P$	variation de pression	(pa)
$\Delta T$	variation de température	(k)



$\Delta T_a$

$\Delta T_b$

**Indices :**

c e Chaud entrée

f e Froid entrée

c s Chaud sortie

f s Froid sortie

d Dépôt

f Fluide

p Poreux

eff Effective

Cd Conduction

Cv Convection

s Sortie

e Entrée

moy Moyenne

S.M.P Sans milieu poreux

A.M.P Avec milieu poreux

$\Delta T_{LM}$  La différence de température logarithmique moyenne

PHE échangeur de chaleur à plaque (plate heat exchange )

FMF Modèle d'encrassement fluide (Fouling Model Fluide)

NUT Nombre de transfert des unités

## SOMMAIRE

1	Généralité sur les échangeurs de chaleur.....	1
<b>1.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.2	Définition d'un échangeur thermique.....	1
1.3	Les différentes fonctions d'un échangeur thermique .....	1
1.4	Classification des échangeurs de chaleur .....	1
1.4.1	Classement technologique [4].....	2
1.4.2	Classement suivant le mode de transfert de chaleur .....	2
1.4.3	Classement suivant le procédé de transfert de chaleur .....	2
1.4.4	Classement fonctionnel.....	2
1.4.5	Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange [5].....	3
1.5	Types des échangeurs de chaleur [5].....	3
1.5.1	Les échangeurs tubulaires .....	3
1.5.1.1	Échangeur monotube .....	3
1.5.1.2	Échangeur coaxial .....	3
1.5.1.3	Échangeur multitubulaire .....	4
1.5.1.3.1	Échangeur à tubes séparés .....	4
1.5.1.3.2	Échangeur à tubes rapprochés .....	4
1.5.1.3.3	Échangeur à tubes ailettes .....	5
1.5.1.3.4	Echangeur à tube et calendrier [6]. .....	5
1.5.1.3.4.1	Echangeur de chaleur à tête flottante .....	5
1.5.1.3.4.2	Echangeur à plaque tubulaires fixes.....	6
1.5.1.3.4.3	Echangeur à tubes en U.....	6
1.5.2	Echangeur à plaque [5]. .....	7
1.5.2.1	Échangeurs à plaques et joints.....	7
1.5.2.1.1	Définitions .....	7
1.5.2.1.2	Description des différents composants de l'échangeur à plaques .....	9
1.5.2.1.2.1	Les plaques et leurs cannelures .....	9
1.5.2.1.2.2	Plaques à cannelures droites.....	10
1.5.2.1.2.3	Plaques à cannelures en chevron.....	11
1.5.2.1.3	Dimensions caractéristiques .....	12
1.5.2.1.4	Les joints.....	13
1.5.2.1.5	Description de l'échangeur de chaleur à plaques et joints.....	15
1.5.2.1.6	Technologie des plaques.....	15
1.5.2.1.7	Optimisation de l'échange de chaleur.....	18

1.5.2.1.8	Principe de fonctionnement .....	18
1.5.2.1.9	Principe de circulation .....	19
1.5.2.1.10	Les types de circulation possibles.....	20
1.5.2.1.11	Modes d'écoulement des deux fluides.....	20
1.5.3	Autres types d'échangeurs à plaques .....	22
1.5.4	Échangeurs avec un fluide changeant de phase .....	23
1.5.5	Méthodes de calcul.....	23
1.5.5.1	Généralités.....	23
1.5.5.1.1	Méthode analytique .....	24
1.5.5.1.2	Méthode numérique.....	25
<b>2</b>	<b>ENCRASSEMENT DE L'ÉCHANGEUR DE CHALEUR.....</b>	<b>27</b>
2.1	Introduction .....	27
2.2	Le problème industriel.....	27
2.3	Notions sur l'encrassement des échangeurs .....	28
2.4	Types d'encrassement .....	28
2.4.1	La corrosion .....	28
2.4.2	L'encrassement biologique .....	29
2.4.3	L'encrassement par réaction chimique .....	29
2.4.4	L'entartrage.....	29
2.4.5	L'encrassement particulaire .....	30
2.4.6	Encrassement par solidification .....	31
2.5	Aspect économique de l'encrassement.....	31
2.6	Apparition et développement de l'encrassement.....	32
2.6.1	Mécanisme de l'encrassement .....	32
2.6.2	Nature du dépôt.....	32
2.6.3	Les processus fondamentaux de l'encrassement .....	33
2.6.4	Méthodes d'évaluation de l'encrassement .....	35
2.7	Facteurs favorisant l'encrassement .....	36
2.7.1	Zones stagnantes .....	36
2.7.2	Effet de la vitesse .....	36
2.7.3	Effet de la température de surface.....	37
2.8	Transferts de chaleur sous forme adimensionnelle .....	38
2.9	Prévention de l'encrassement dans les échangeurs .....	38
2.9.1	Pendant la phase de dimensionnement.....	39
2.9.2	Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route .....	40

2.9.3	Pendant la phase de fonctionnement .....	40
2.9.4	Au moment de l'arrêt de l'échangeur .....	40
2.10	Méthodes de nettoyage des échangeurs.....	41
2.10.1	Nettoyage mécanique .....	41
2.10.2	Nettoyage chimique .....	42
2.11	Encrassement des échangeurs de chaleur à plaque .....	42
2.11.1	L'encrassement des échangeurs .....	42
2.12	Les recherches sur ce problème.....	44
2.13	Détection de l'encrassement.....	44
2.14	Le lait.....	44
2.14.1	II.14.1. Généralités.....	44
2.14.2	Modèles et mécanismes d'encrassement par le lait .....	45
2.15	La vitesse de l'écoulement et le nombre de Reynolds .....	45
2.16	Caractéristiques des particules .....	46
2.16.1	Diamètre des particules .....	46
2.16.2	Concentration des particules .....	46
2.16.3	La turbulence.....	46
2.16.4	Le préchauffage.....	46
2.17	Réduction des dépôts.....	47
2.18	Elimination des dépôts .....	47
2.19	Capacité d'encrassement de la FMF .....	47
2.20	Évaluation de la masse de dépôt.....	48
2.21	II.22. Modèles prédictifs de l'encrassement.....	48
2.21.1	II.22.2. Travaux sur les encrassements laitiers.....	48

### **Chapitre III : Formulation mathématique du problème**

III.1	Introduction .....	52
III.2	Position du problème physique .....	52
III.2.1	Modèle géométrique .....	52
III.2.2	Conditions aux limites .....	54
III.2.3	Hypothèses .....	55
III.3	Maillage.....	55
III.4	Equations gouvernantes.....	55
III.4.1	Equations de conservation.....	56
<b>4</b>	<b>Résultats et discussions.....</b>	<b>58</b>
4.1	Introduction .....	58

4.2	Comparaison entre l'échangeur saint et encrassé.....	58
4.3	Effet de l'épaisseur du dépôt.....	61
4.4	Effet du type d'encrassement .....	63
4.5	Effet de la vitesse d'entrée du fluide traité.....	65
	<b>Conclusion .....</b>	<b>66</b>

## Résumé :

Dans les sociétés industrielles l'échangeur de chaleur est un élément essentiel pour la maîtrise de l'énergie, et les problèmes les plus importants sont liés à l'étude des dépôts des appareils. Pour cela, dans ce travail on va étudier le comportement thermique de l'écoulement des fluides pour améliorer les performances des échangeurs de chaleur, dans le cas simple (normal), et le cas en présence de dépôts, pour avoir la différence entre ces deux cas.

**Mots clés : Echangeur de chaleur, plaques, dépôt (encrassement).**

## ملخص:

في الشركات الصناعية مبادل للحرارة هو عنصر أساسي لحسن استعمال الطاقة و أهم المشاكل تتعلق بدراسة الترسبات في هذا المبادل. لذلك قمنا بدراسة السلوك الحراري لتدفق السوائل لتحسين أداء مبادلات الحرارة. في الحالة العادية والحالة في وجود ترسبات والفرق بين الحالتين.

**كلمات مفتاحية: مبادل للحرارة, ألواح (صفائح), الترسبات.**

## Abstract:

In industrial societies the heat exchanger is an essential element for energy management, and the most important problems are linked to the study of the deposits of the devices. For this, in this work goes study the thermal behavior of the flow of fluids to improve the performance of heat exchangers, in the simple case (normal), and the case in the presence of deposits, to have the difference between these two cases.

**Keywords: Heat exchanger, plates, deposit (fouling).**

# **INTRODUCTION GENERALE**

### INTRODUCTION GENERALE

Au cours de leur transformation, les produits alimentaires subissent pratiquement toujours un traitement thermique dont le principe repose le plus souvent sur un transfert de chaleur au travers d'interfaces liquide-solide (cas des échangeurs de chaleur à chauffage indirect tubulaire, à plaques, spirales, à surface raclée, ...). Ces interfaces sont le lieu privilégié de réactions entre le matériau solide et les constituants du produit traité, ou entre les constituants eux-mêmes. Le résultat global est souvent un encrassement de la surface d'échange qui diminue les performances du matériel en opposant une résistance supplémentaire au transfert de chaleur et en augmentant les pertes de charges. En outre, il rend souvent plus difficiles et plus longues les opérations de nettoyage. Tous ces facteurs concourent à augmenter le coût de fonctionnement de l'installation.

L'encrassement se répercute donc sur la rentabilité des installations par des coûts principalement liés aux pertes de production, à la surconsommation d'énergie et aux frais de nettoyage et de maintenance, et dans une moindre mesure aux surdimensionnements et aux ajouts d'équipements de nettoyage.

Ces inconvénients ont justifié les études menées depuis de nombreuses années sur l'encrassement et sur les moyens de le limiter. Notre modeste travail est une étude bidimensionnelle par la méthode des éléments finis, menée grâce au code de calcul COMSOL version 5.4 de l'encrassement et de son influence sur les performances thermo-hydrauliques des échangeurs de chaleur à plaques.

Notre mémoire est constitué de quatre chapitres dont :

- ✚ Le premier chapitre « Généralités sur les échangeurs de chaleurs » est consacré à définir les échangeurs de chaleur, leurs différents types, leur classification et leurs problèmes de fonctionnement.
- ✚ Le deuxième chapitre « Encrassement des échangeurs de chaleur » ou nous exposons la définition de l'encrassement, ses différents types, son mécanisme et les paramètres qui favorisent son développement.
- ✚ Le troisième chapitre « position du problème » est consacré à définir notre étude en exposant notre modèle géométrique et la problématique avec les hypothèses et les conditions aux limites.

Le dernier chapitre « Résultats et discussions » ou nous exposons et discutons les résultats de notre étude.



## **CHAPITRE I:**

### **Généralité sur les échangeurs de chaleur**

**Généralité sur les échangeurs de chaleur****Introduction**

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés.

**Définition d'un échangeur thermique**

Les échangeurs thermiques sont des appareils qui permettent d'échanger de la chaleur entre deux ou plusieurs fluides. Le principe mis en œuvre est simple parce qu'il s'agit de mettre en contact un fluide chaud et froid afin qu'ils se trouvent à la même température. Au cours du processus, un des fluides pourra changer de phase (condensation, évaporation). Ils peuvent être intégrés dans des équipements destinés aussi bien au refroidissement qu'au réchauffement. Utilisés depuis plus d'un siècle dans l'industrie agro-alimentaire, les échangeurs thermiques ont maintenant de nombreuses applications, majoritairement dans l'industrie, mais également dans l'habitat (notamment le conditionnement d'air, la réfrigération et le chauffage urbain) ou dans les transports (conditionnement d'air, réfrigération et refroidissement des moteurs) [1]

**Les différentes fonctions d'un échangeur thermique**

Les échangeurs thermiques permettent des échanges de chaleur entre deux liquides, entre deux gaz ou entre un gaz et un liquide. En cas de transfert de chaleur accompagné de changement de phase, les échangeurs thermiques peuvent assurer une fonction d'évaporation ou de condensation.

**Classification des échangeurs de chaleur**

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés selon [2,3] comme :

a) Récupérateurs ou régénérateurs.

- b) Processus de transfert (contact direct ou indirect).
- c) Type de construction (tubes, plaques et surfaces étendues).
- d) Mécanisme de transfert de chaleur (monophasé et biphasé).
- e) Dispositif d'écoulement (écoulement parallèle, contre-courant ou écoulement transversal).

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

**Classement technologique [4].**

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants:

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

**Classement suivant le mode de transfert de chaleur**

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés.

Dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) ; il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tous échangeurs avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient.

**Classement suivant le procédé de transfert de chaleur**

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

- □ Transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou n passages et un écoulement en général continu.
- □ Transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique.

**Classement fonctionnel**

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

- □ Les deux fluides ont un écoulement monophasique.
- □ Un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs.
- □ Les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs condenseurs.

**Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange [5].**

On retiendra deux types de paroi :

- □ Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux: superalliages, métaux ou alliages réfractaires.
- □ Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

**Types des échangeurs de chaleur [5].**

#### **Les échangeurs tubulaires**

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus.

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée.

#### **Échangeur monotube**

Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentín comme montré à la figure au dessous.



**Figure I.1.** Échangeur monotube en serpentín.

#### **Échangeur coaxial**

Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur comme montré à la figure au dessous.

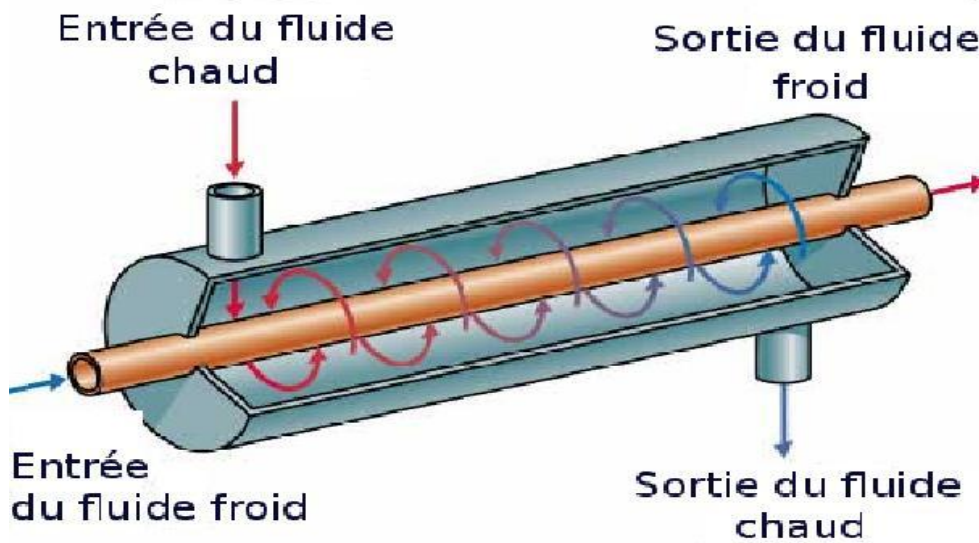


Figure I.2. Échangeur coaxial.

**Échangeur multitubulaire**

Échangeur à tubes séparés

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

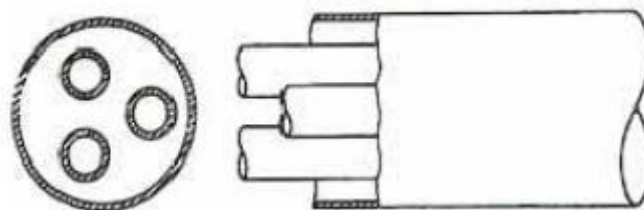
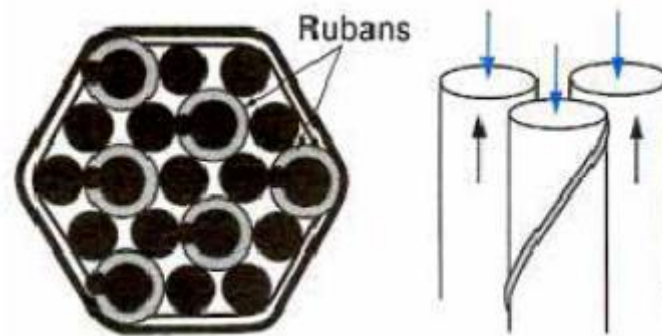


Figure I.3. Échangeur à tube séparé.

**Échangeur à tubes rapprochés**

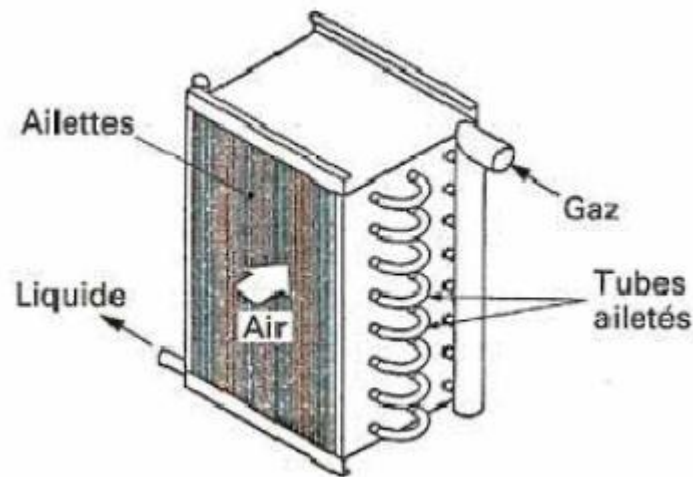
Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.



**Figure I.4 :** Échangeur à tube rapproché.

Échangeur à tubes ailettes

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique; différents types d'ailettes sont toutefois présentés si contre.



**Figure I.5 :** Échangeur à tube ailette.

Echangeur à tube et calandre [6].

Echangeur de chaleur à tête flottante

L'une des plaques tubulaires est fixe, bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La seconde plaque, d'un diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre.

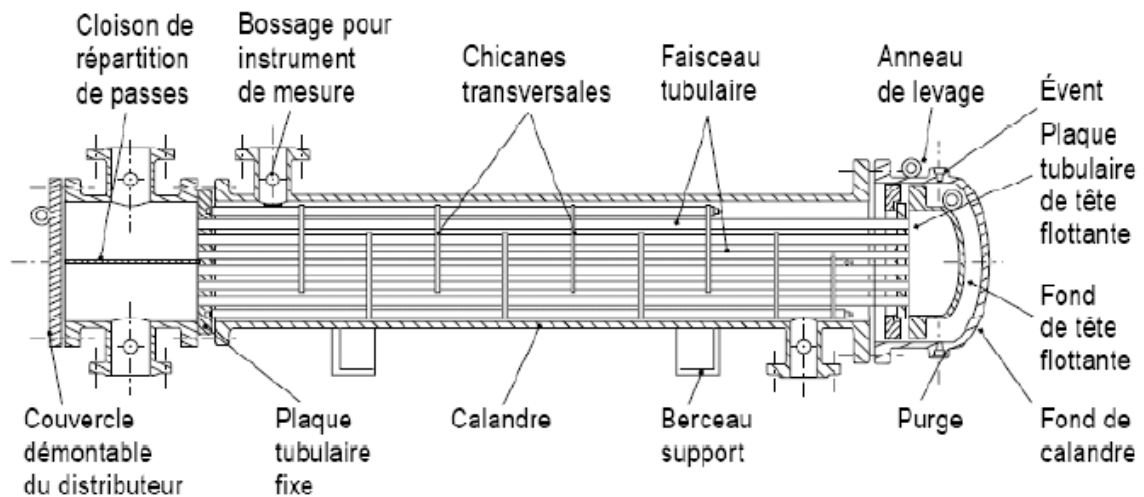


Figure I.6 : Échangeur à tête flottante.

Echangeur à plaque tubulaires fixes

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre.

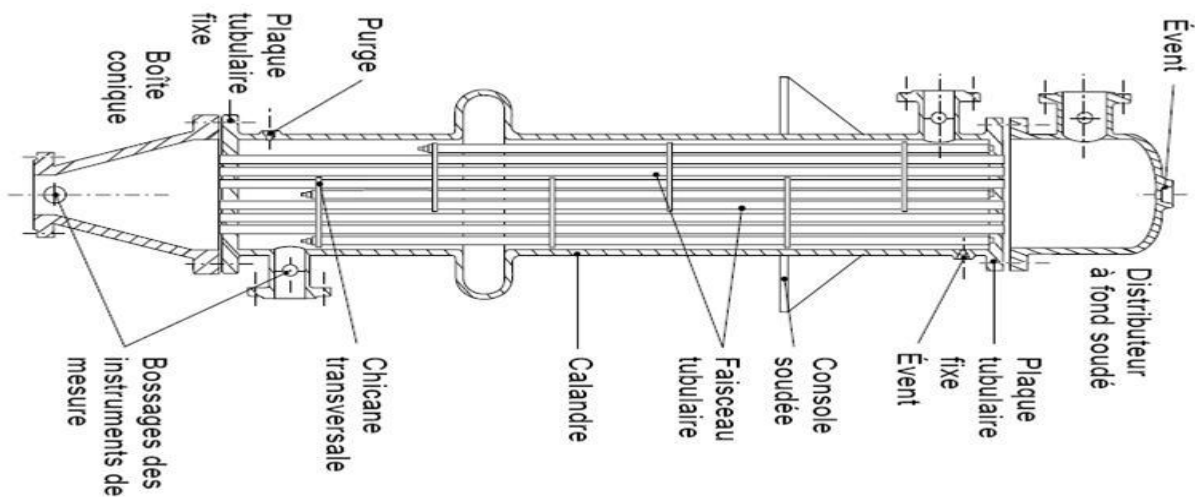


Figure I.7 : Échangeur à plaque tubulaire fixe.

Echangeur à tubes en U

Le faisceau est constitué de tubes coudés en forme d'épingle, il n'est donc porté que par une seule plaque tubulaire. Ce système permet la libre dilatation du faisceau. En revanche, le nettoyage des tubes est difficilement réalisable autrement que par voie chimique.

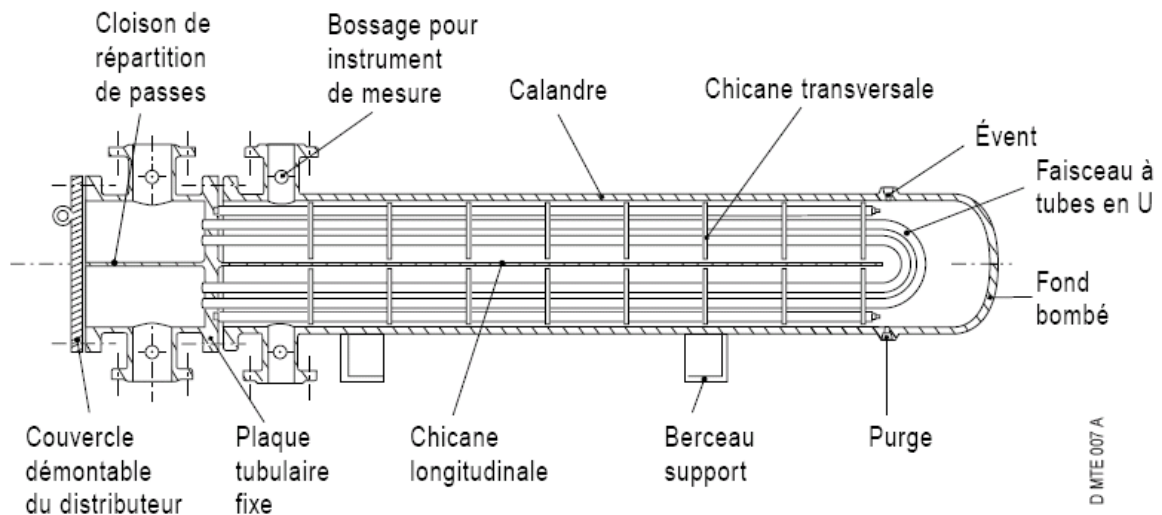


Figure I.8 : Échangeur à tube en U.

**Echangeur à plaque [5].**

**Échangeurs à plaques et joints**

Définitions

L'appellation « échangeurs à plaques et joints » est plus précise et permet d'éviter la confusion avec les échangeurs à plaques soudées ou à plaques brasées qui seront décrits par la suite.

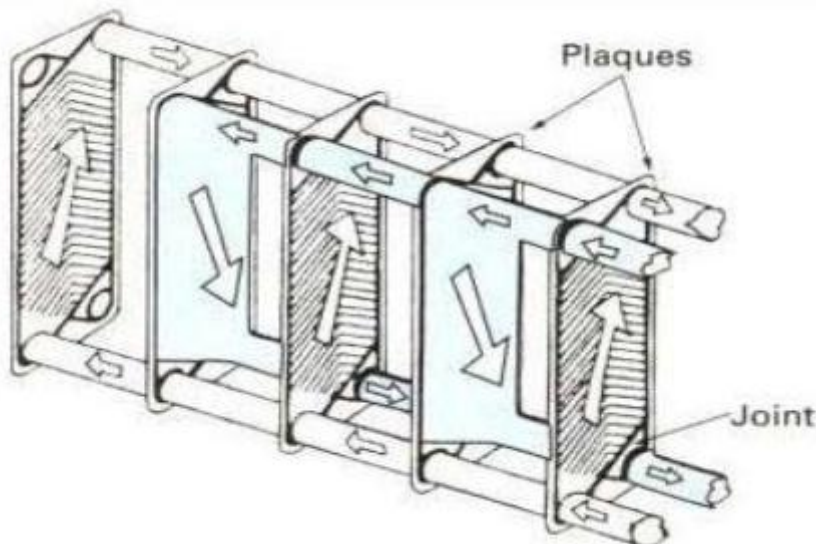


Figure I.9 : Échangeurs à plaques et joints

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile.



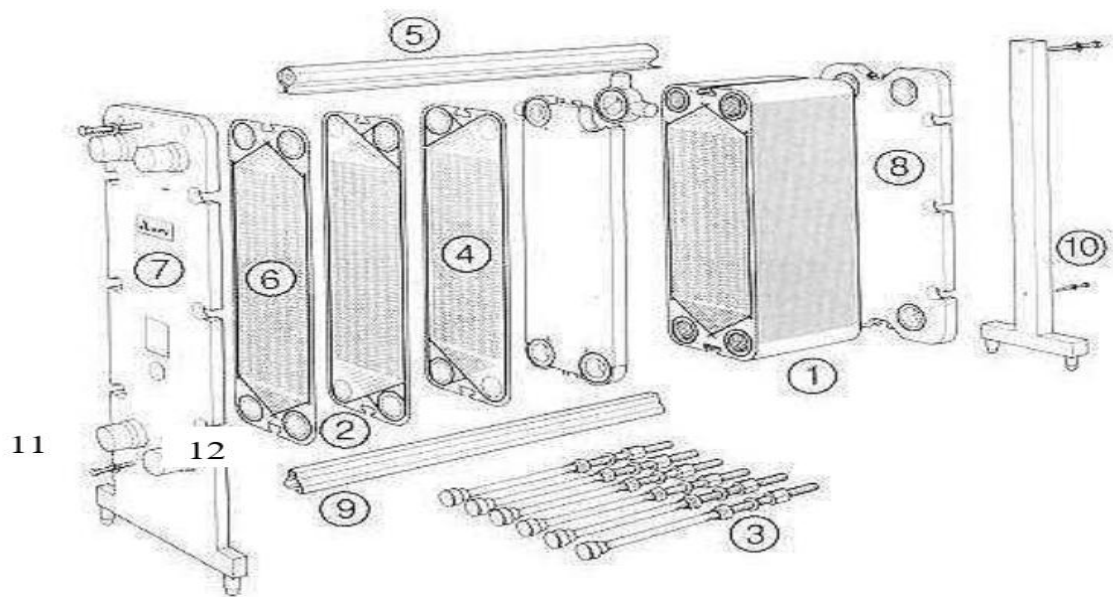


**Figure I.10:** Silhouette d'un échangeur à plaques et joints [7]

Dans un échangeur à plaques et joints, la surface d'échange est composée de série de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile. Un rail fixé sur le flasque fixe et sur un pied supporte l'ensemble de plaques et permet le déplacement de celles-ci pour les manutentions (montage, nettoyage, etc.).

Les plaques définissent un ensemble de canaux dans lesquels circulent respectivement chacun des fluides.

Les échangeurs à plaques et joints sont surtout utilisées pour les transferts de chaleur entre fluides monophasiques, mais en plus d'applications existent en double phase, condensation ou évaporation [8].



**Légendes :**

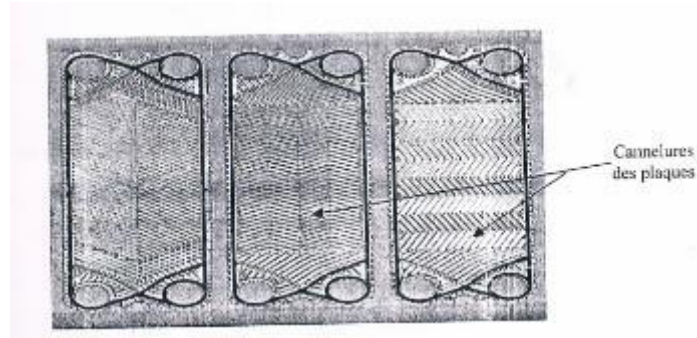
- 1- Jeu de plaques
- 2- Plaques d'échange avec entrée et sorti
- 3- Vis de serrage
- 4- Joint et gorge de joint
- 5- Barre supérieure
- 6- Plaque d'extrémité
- 7- Tête fixe avec raccords
- 8- Tête mobile
- 9- Barre inférieure
- 10- Pied arrière
- 11- Cadre de raccordement
- 12- Bossage

**Figure I.11:** Vue éclatée échangeur à plaques et joints

Description des différents composants de l'échangeur à plaques

Les plaques et leurs cannelures

Le dessin des plaques et des cannelures varie d'un constructeur à l'autre et il existe environ une soixantaine de dessins de plaques.



**Figure I.12:** Exemple de profils pour augmenter la turbulence [9]

Les plaques sont obtenues par emboutissage. Les matériaux utilisés sont en général l'acier inoxydable, le titane ou tout autre matériau suffisamment ductile (Hastelloy, Incaloy, Uranus B6, Monel, Cupronickel, tec.).

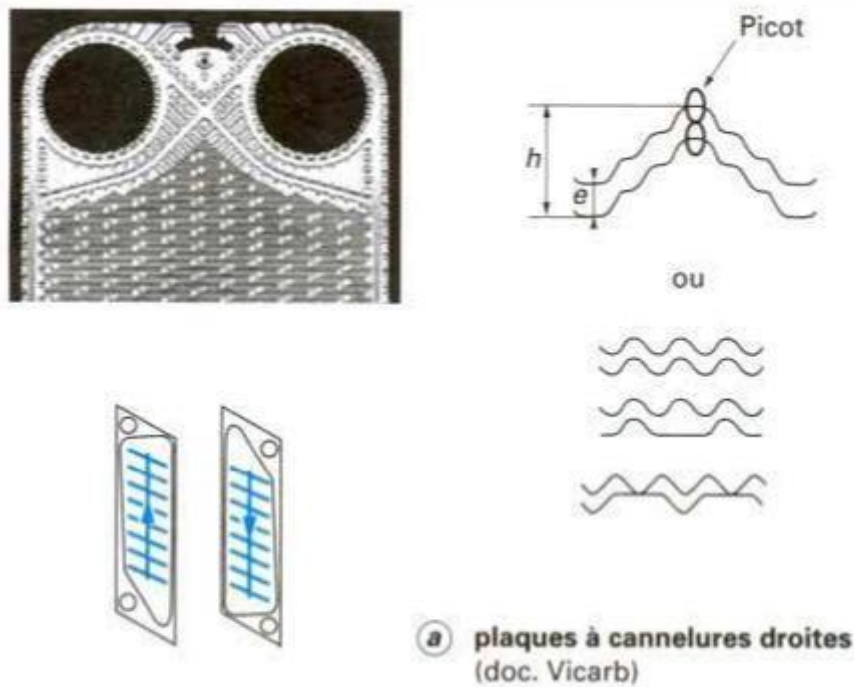
Pour des applications courantes, les plaques ont une épaisseur de l'ordre de 0.5 à 0.8 mm mais, dans certains cas, des épaisseurs supérieures au millimètre peuvent être mise en œuvre.

Les cannelures ont pour but essentiel d'augmenter les turbulences pour accroître les coefficients d'échange thermique, mais également d'assurer la rigidité mécanique par un grand nombre de contact métal-métal.

Les deux géométries de cannelures les plus fréquemment utilisées sont les cannelures droites ou à chevrons [8].

Plaques à cannelures droites

Il s'agit de cannelures perpendiculaires à la direction principale de l'écoulement et parallèles entre elles. Deux types de conception de canaux sont possibles :



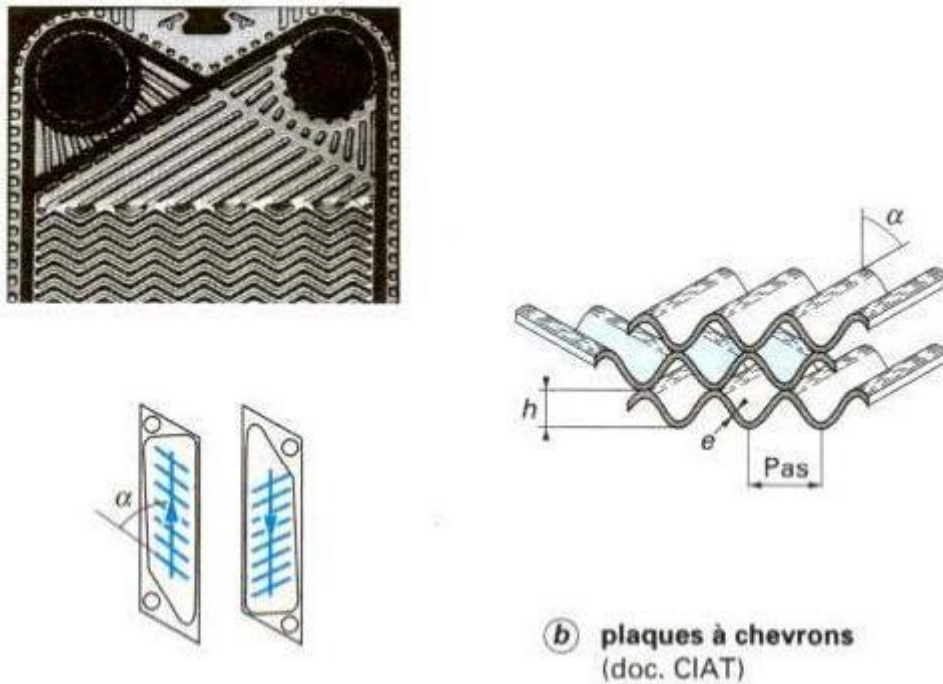
**Figure I.13:** Plaque à cannelures droites [5]

-La distance entre les plaques (2 à 5 mm) est maintenue grâce aux joints et à des picots qui, par les contacts métal-métal, assurent une bonne rigidité mécanique de l'ensemble. La hauteur  $h$  des plaques est supérieure à l'épaisseur  $e$  du joint et lors de l'assemblage, les ondulations s'emboîtent les unes dans les autres [8].

Les points de contact entre plaques se font sur absences d'ondulation sur une plaque le long des cannelures droites. La hauteur des ondulations (3 à 5 mm) correspond à la hauteur du joint comprimé. Dans ce type d'assemblage, l'écoulement entre les deux plaques subit un changement continu de direction. Les vitesses moyennes couramment admises pour un fluide tel que l'eau sont comprises entre 0.1 et 2 m/s [5].

#### Plaques à cannelures en chevron

Les chevrons sont des ondulations peu profondes et d'une épaisseur égale à l'épaisseur du joint comprimé (de l'ordre de 3 à 5 mm). Ces ondulations sont inclinées par rapport à la direction principale de l'écoulement d'un angle  $\alpha$ .



**Figure I.14:** Plaques à cannelures en chevron [5]

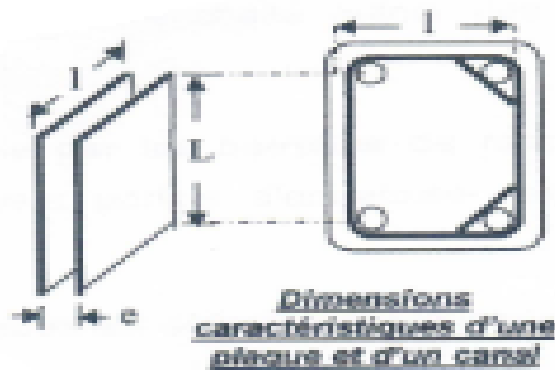
Au cours du montage, les plaques adjacentes se superposent de façon que le sommet des ondulations d'une plaque s'appuie sur la base des ondulations des autres plaques, ce qui donne un grand nombre de contacts métal-métal. Ainsi, après serrage, la hauteur du joint comprimé correspond à la hauteur des ondulations.

Les vitesses moyennes d'écoulement entre les deux plaques sont de l'ordre de 0.1 à 1 m/s dans le cas de l'eau.

#### Dimensions caractéristiques

Dans ce type d'échangeurs, on peut définir trois dimensions caractéristiques, pour une plaque, la longueur  $L$  et la largeur  $l$ , pour l'écoulement entre plaques, le diamètre hydraulique noté  $D_h$  défini à partir du jeu moyen entre plaques  $e$  [5] :

- Aire de la section transversale est donné par :  $e.l$
- Périmètre mouillé est donné par :  $2.(e+l)$



$$D_h = \frac{4 \cdot \text{Aire de la section transversale}}{\text{Périmètre mouillé}}$$

La formule se transforme en :

$$D_h = \frac{4 \cdot e \cdot l}{2 \cdot (e + l)}$$

Dans la plupart des cas  $l \ll e$ , alors le diamètre hydraulique se réduit au :

$$D_h = 2 \cdot e$$

Le coefficient de frottement du canal est estimé expérimentalement en connaissant le débit circulant dans le canal:

$$f = \frac{\Delta P}{2 \rho u_m^2} \frac{D_e}{L}$$

Il existe différents types de lois permettant de décrire l'évolution du coefficient de frottement mais dans le cas des échangeurs à plaques, il est généralement décrit par:

- $f = a \text{Re}^{-b}$  (Reynolds très élevés)
- $f = a + \frac{b}{\text{Re}}$  (laminaire ou de transition)

Les joints

Les joints sont collés dans les gorges autour des plaques et des orifices d'alimentation et assurent l'étanchéité vis-à-vis de l'environnement externe.

En général un double joint autour des orifices évite le mélange entre les deux fluides [8]. Le joint moulé en une seule pièce est, dans la plupart des cas, en élastomères (composé synthétique qui a l'élasticité du caoutchouc) choisi en fonction de la nature chimique des fluides, de leurs températures ou d'autres contraintes particulières.



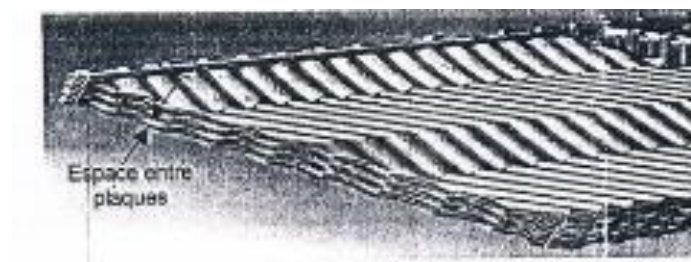
**Figure I.15:** Schéma explicite du montage d'un joint [9]

Ils sont les composants qui limitent les niveaux de température et de pression des échangeurs à plaques. Souvent il y'a lieu de distinguer : le joint principal, les joints circulaires et les barrettes de raccordement.

Le joint principal est celui qui entoure la surface d'échange de la plaque où circule un des fluides, les circulaires assurant l'étanchéité autour des trous de passage de l'autre fluide à travers la plaque.

Ces trois parties sont reliées ensemble par les barrettes de raccordement n'ayant aucun rôle d'étanchéité mais servant parfois d'entretoise-support (de traverse) lors du serrage des plaques.

La zone de circulation de chacun des fluides est délimitée par le joint principal et les joints circulaires.



**Figure I.16:** Zone de circulation délimitée par l'espace entre plaques [9]

Afin d'éviter un éventuel mélange des fluides dans cette zone où les joints sont très rapprochés, des encoches pratiquées dans les barrettes de raccordement mettent à l'atmosphère l'espace compris entre les joints, toute fuite se fera vers l'extérieur par les encoches et sera détectée immédiatement. Il est important que cet espace reste à pression atmosphérique [10].

Lors de la manipulation des plaques, il faut prendre toutes les précautions pour éviter de couper, d'entailler, ou de strier les joints.

Description de l'échangeur de chaleur à plaques et joints

Technologie des plaques

Les plaques d'un échangeur de chaleur sont en général en forme de chevron pour augmenter la turbulence et ménager des points d'appuis pour résister à la pression.

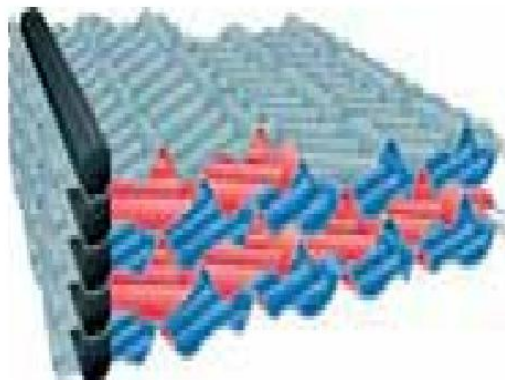
Leur faible épaisseur permet d'utiliser des matériaux de bonne qualité ayant une bonne tenue à la corrosion (acier inox, titane, etc.). De plus, les joints en polymères assurent un double rôle dans l'échangeur de chaleur à plaque jointé:

- étanchéité,
- répartition des fluides dans l'échangeur.

Parmi les techniques de fabrication des plaques d'un échangeur de chaleur, nous citons les plus répandus dans le marché.

#### A/ Plaque à canal large

Avec des canaux de 12 mm sans points de contact, cette plaque est idéale pour les fluides contenant des fibres ou des particules de grande taille. Chaque canal a été conçu pour éliminer le passage des solides dans la zone d'entrée. La figure ci contre représente une plaque à canal large [11].



**Figure I.17:** Plaque à canal large [11].



**B/ Plaque à double paroi**

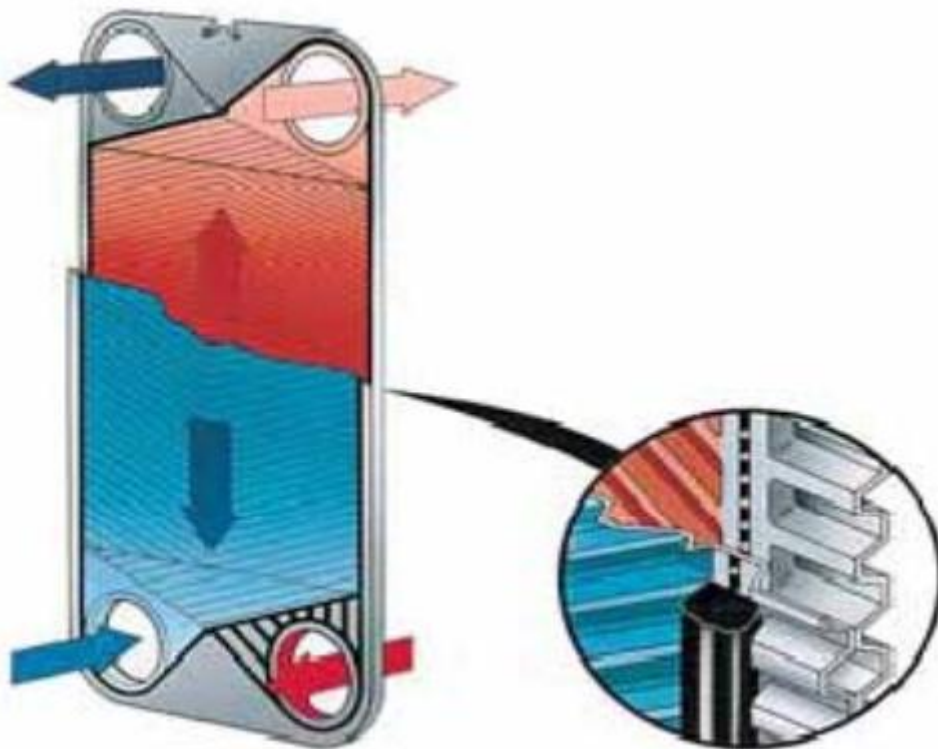
Composée de plaques comprimées simultanément et soudées au laser sur le port, cette plaque est conçue pour les applications nécessitant une fiabilité totale contre le brassage. La défaillance d'une plaque entraîne une détection externe sans fuite interne. La seconde paroi assure une double barrière entre les fluides, répondant aux normes sanitaires locales [11].



**Figure I.18:** Plaque à double paroi [11].

**C/ Plaque semi-soudée**

La Figure suivante présente deux plaques semi-soudées, séparées avec des joints.



**Figure I.19:** Plaque semi-soudée [11].

**D/ Profil d'écoulement**

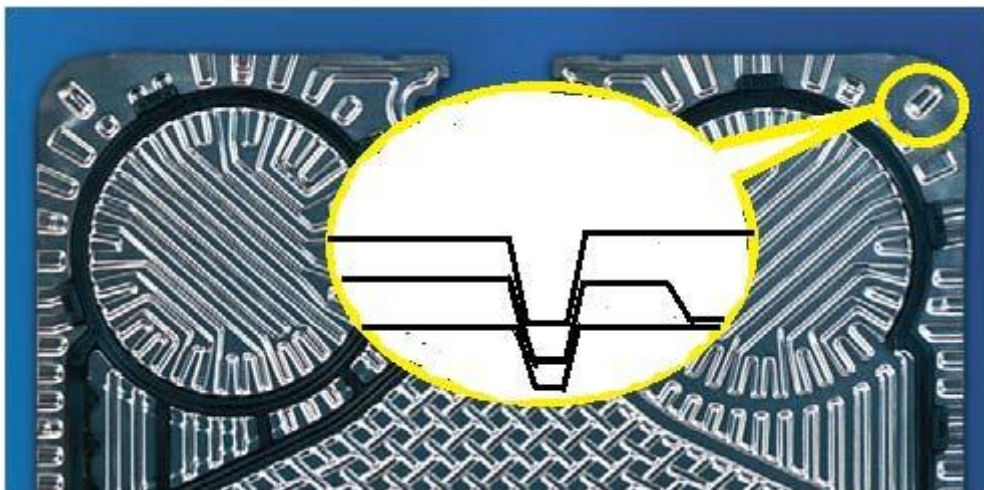
Le profil optimisé assure une bonne répartition des fluides sur toute l'épaisseur de la plaque. Ceci conduit aux meilleurs taux de transfert de chaleur pour la plus faible perte de charge [12].



**Figure I.20:** Profil d'écoulement d'une plaque [12].

**E/ Auto centrage des plaques**

L'Auto centrage des plaques. Il en résulte un jeu de plaques stable et parfaitement aligné, les joints étant situés directement au-dessus l'un de l'autre ce qui permet une longévité accrue [12].



**Figure I.21:** Représente l'auto centrage dans une plaque [12].

**F/ Joint sans colle**

Le nouveau joint sans colle permet un remplacement des joints rapide et simple.



**Figure I.22:** Le joint sans colle [12].

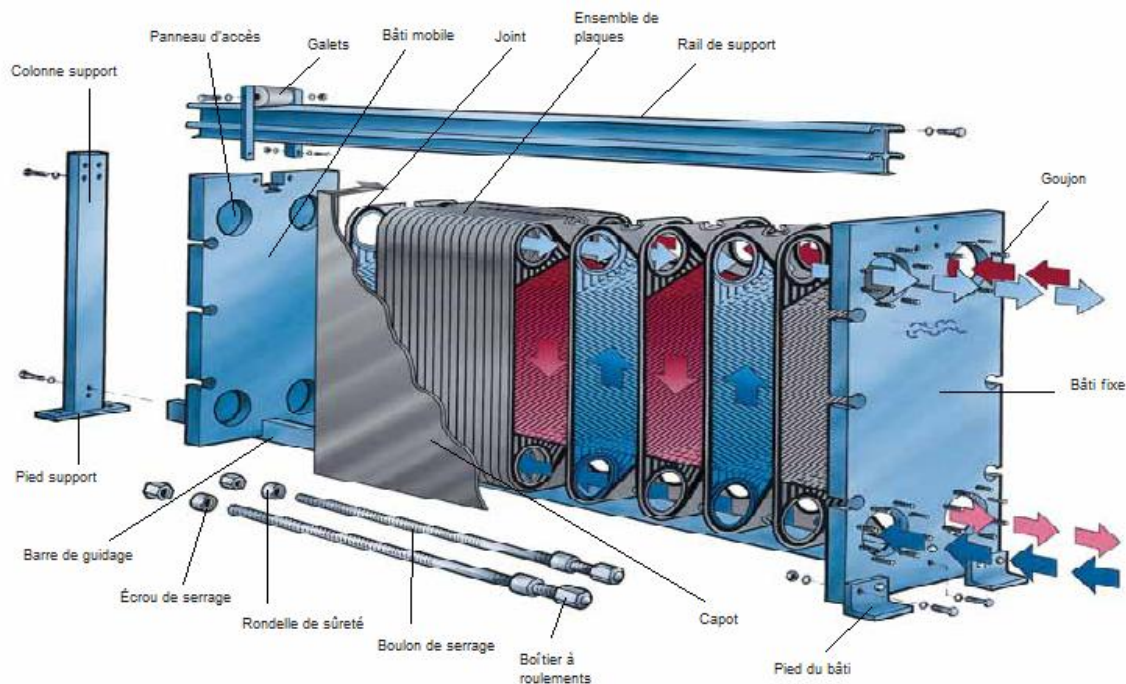
**Optimisation de l'échange de chaleur**

Les échangeurs de chaleur à plaques sont conçus pour optimiser le transfert de chaleur, car les plaques cannelées fournissent de loin la plus importante surface à travers laquelle la chaleur peut être transférée d'un gaz ou d'un liquide à un autre. Malgré l'importance de cette zone de transfert thermique, les échangeurs de chaleur à plaques sont généralement assez compacts.

La conception des canaux assure également une turbulence maximale lors de chaque passage de fluide, ce qui permet d'obtenir une efficacité maximale dans le transfert de chaleur d'un milieu à l'autre.

**Principe de fonctionnement**

Un échangeur de chaleur à plaques consiste pour l'essentiel en une série de fines plaques cannelées assemblées et/ou soudées, en fonction des liquides qui circuleront dans les plaques et de l'éventuelle possibilité de séparer les plaques pour une raison quelconque. Les plaques sont ensuite embouties ensemble dans un bâti rigide afin de créer une circulation de flux parallèles. L'un des fluides se déplace dans les canaux impairs, l'autre fluide dans les canaux pairs [11].



**Figure I.23:** Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques jointé [11].

#### Principe de circulation

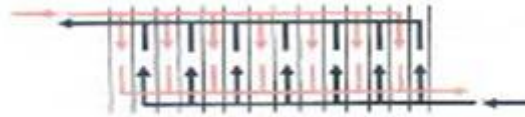
Quand le paquet de plaque est serré, les trous percés dans les coins des plaques sont alignés, et forme des collecteurs en face de chacune des tubulures. Les fluides entrant dans l'échangeur vont circuler dans ces collecteurs et alimenteront les espaces inter plaques (canaux) sur toute la longueur de l'appareil. De part la succession alternée de plaques à joints, chacun des fluides n'alimentera qu'un canal sur deux (par exemple, le fluide chaud n'alimentera que les canaux à nombre impairs, le fluide froid, que les canaux à nombre pairs).

Dans la plupart des cas, les fluides circulent à contre courant (un des fluides circulant de haut en bas, l'autre de bas en haut). Les fluides alors ne sont séparés que par la mince plaque de métal constituant la plaque.

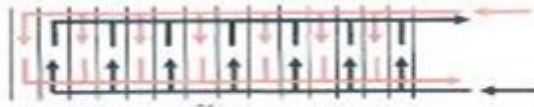
Pendant son passage dans l'échangeur, le fluide chaud cédera une partie de sa chaleur à la paroi de métal qui la transmettra instantanément au fluide froid en contact avec l'autre côté de la plaque. Le fluide chaud voit sa température s'abaisser, le fluide froid voit sa température s'élever. Finalement, les fluides sortent des canaux à l'extrémité des plaques et circulent dans les collecteurs vers les tubulures de sortie de l'échangeur [10].

Les types de circulation possibles

Il existe trois types de circulation différente dans les échangeurs à plaques et joints. Le sens de circulation est représenté par les figures suivantes :



**Figure I.24:** Distributions monopasses en Z dans un échangeur à plaques et joint [5,13]



**Figure I.25:** Distribution monopasses en U dans un échangeur à plaques et joint [5,13]

Il s'agit d'une circulation monopasse des deux cotés dont on distingue deux types de montage différents (figure **I.24** et **I.25**).

Le terme passe désigne une traversée de l'échangeur par l'un des fluides. Les fluides circulent à contre-courant [13]

Un troisième type de circulation représenté par la **figure I.26** est très recommandé lorsque le nombre d'unité de transfert requis pour le service thermique est important [8].

Il s'agit d'une circulation multipasse avec un nombre égal de passes des deux cotés schématisé comme suit :



**Figure I.26:** Circulation multipasse [8,9].

De point de vue thermique, la distribution en U est meilleure que la distribution en Z [8].

Modes d'écoulement des deux fluides

On peut distinguer 3 modes d'écoulement différents

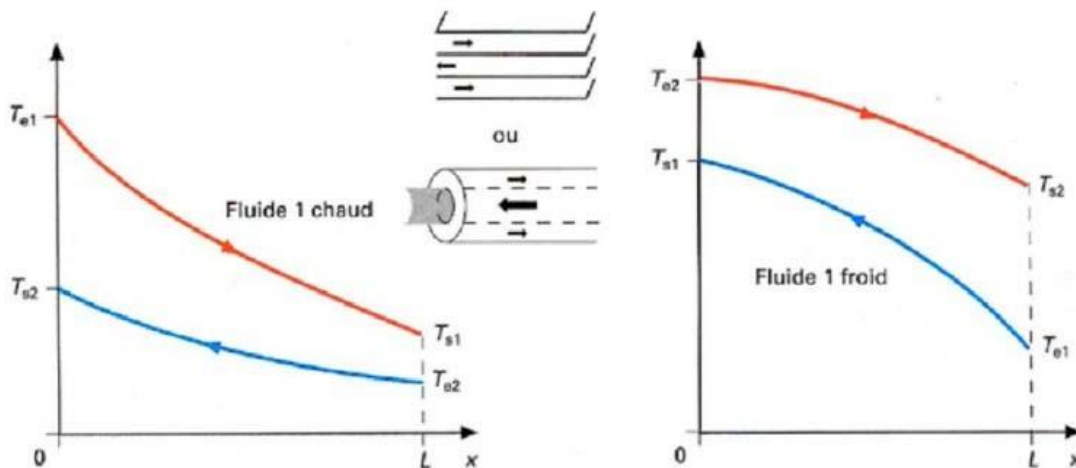
**A/ Ecoulement co-courants (Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens)**

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 du fluide chaud. Les températures des fluides évoluent pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase.

**B/ Ecoulement contre courants (Ecoulement des fluides parallèles mais de sens contraires)**

Il s'agit d'échangeurs à contre courants ou la température du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique.

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

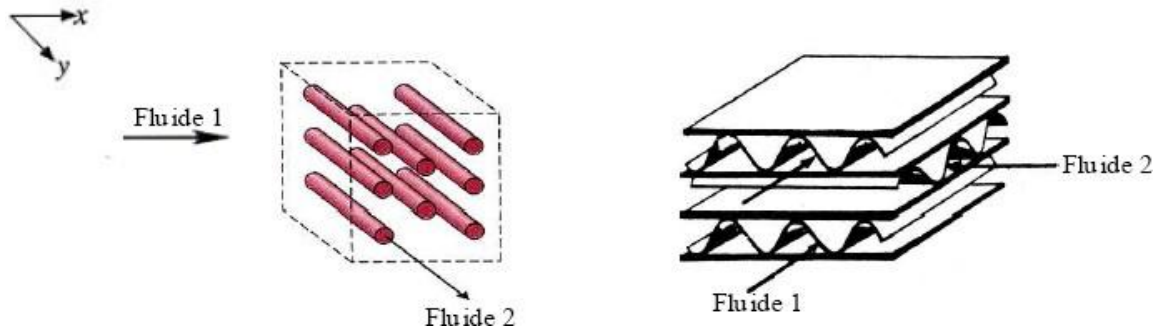


**Figure I.30:** Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre courants

**C/ Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage**

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre (Figure I.31), le fluide non brassé est canalisé : c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèle distincts et de faible section .l'autre fluide circule librement entre les veines et peut être considéré comme partiellement brassé du fait des tourbillons générés par les tubes. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine

fluide. Sans cela, les températures varient non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine. Une représentation schématique d'échangeur à courant croisés est donnée par la figure I.31.



**Figure I.31:** Exemples d'échangeurs à courants croisés

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

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

- ✚ Les tubes qui fixent l'espace dévolu seulement à l'un des deux fluides.
- ✚ Les plaques, planes ou corruguées, choisies pour un fluide qui impose la même géométrie pour l'autre.

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

**Autres types d'échangeurs à plaques**

Suivant le mode de fabrication et les matériaux utilisés, on distingue :

- échangeurs à surface primaire
- échangeurs à plaques soudées ou brasées
- échangeur platulaire.
- échangeur compabloc
- échangeur packinox
- échangeur lamellaire
- échangeur à spirale
- échangeur brasé

**Échangeurs avec un fluide changeant de phase**

L'un des deux fluides peut subir un changement de phase à l'intérieur de l'échangeur. C'est le cas des évaporateurs si le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, ou des condenseurs si le fluide chaud se condense de l'état de vapeur à l'état liquide.

**Méthodes de calcul****Généralités**

Le but d'un échangeur de chaleur est de transférer de la chaleur entre fluide de service (eau, vapeur d'eau, fluide thermique) et un fluide procédé qui constitue le produit intéressant de la fabrication. Dans la pratique deux cas généraux se produisent :

L'échangeur disponible étant connu (type, surface), on veut savoir s'il peut convenir pour fournir ou enlever un flux de chaleur déterminé à un fluide procédé dont on connaît le débit et les températures d'entrée et de sortie qui sont imposées. On calcule alors par un bilan thermique le débit de fluide traversant de service qui permettra d'effectuer ce transfert à partir des températures d'entrée et de sortie de ce fluide. Il est alors possible de déterminer le coefficient de transfert thermique global  $H$  nécessaire [20].

On vérifie ensuite que le coefficient  $H$  calculé à partir des relations de transferts thermiques (calcul entre autres des coefficients de convection) est bien supérieur à celui déterminé à partir des données générales sur les fluides et la surface totale de l'échangeur[20].

On souhaite calculer l'échangeur qui permettra de fournir ou enlever à un fluide procédé un certain flux de chaleur (débit, températures d'entrée et de sortie connus du fluide procédé). On raisonne comme plus haut concernant le fluide de service et il devient alors possible de déterminer la surface d'échange nécessaire en estimant à priori un coefficient de transfert thermique global  $U$ . On vérifie alors aussi par des calculs si la valeur de  $H$  supposée est correcte. Dans ces deux cas, si les solutions ne conviennent pas il faut reprendre les calculs depuis le début en modifiant les hypothèses jusqu'à obtenir une solution satisfaisante. Cette procédure itérative est actuellement réalisée par des programmes informatiques [20].

Les méthodes utilisées sont des méthodes analytiques et numériques destinées pour le dimensionnement des échangeurs :

➤ Méthode analytique

Telles que la méthode de l'écart moyen logarithmique ou la méthode de l'efficacité en supposant un coefficient d'échange constant le long de l'échangeur et pas de pertes de charge.

➤ Méthode numérique



Elles permettent de préciser le calcul en décomposant les phénomènes physiques mis en jeu et en prenant en compte la nature d'écoulement.

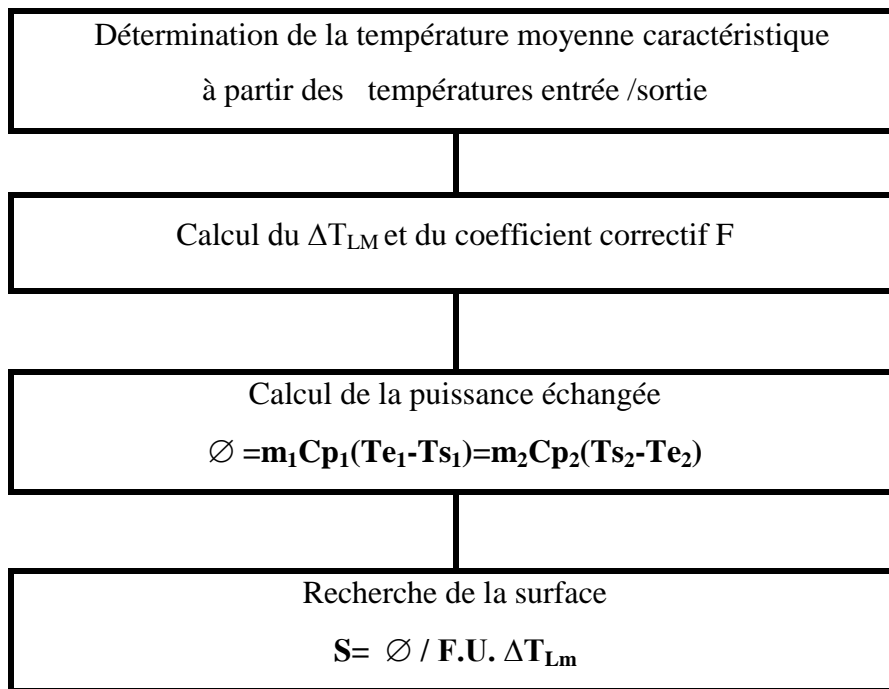
Méthode analytique

Deux types de calcul sont envisageables pour la caractérisation de l'échangeur :

**A / Méthodes du DTLM**

Le déroulement du calcul peut être schématiquement le suivant :

**Tableau I.1 : Principe de la méthode du DTLM**

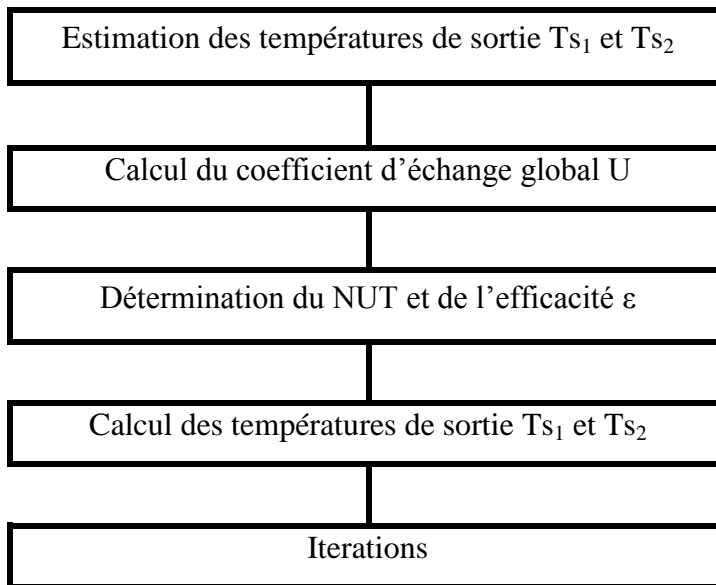


**B / Méthode du NUT**

Dans certaines utilisations d'échangeurs, on doit déterminer les températures de sortie d'un échangeur connaissant les températures d'entrée et la surface d'échange. Ce problème est itératif car on ne peut pas trouver directement une température moyenne caractéristique des fluides.

Le déroulement du calcul peut être schématiquement le suivant :

Tableau I.2 : Principe de la méthode NUT



Méthode numérique

Telles que

#### A / Méthode des volumes finis

C'est une méthode de simulation, elle suppose connue la géométrie exacte de l'appareil que l'on désire modéliser, ainsi que les caractéristiques des deux fluides à l'entrée de l'appareil et une bonne idée de la configuration d'écoulement c.-à-d. du champ de vitesse des fluides à l'intérieur de l'appareil.

Elle est axée sur la simulation de la performance des échangeurs, elle repose sur les principes suivants :

- On décompose l'échangeur en un certain nombre de volumes de contrôle ou de maille. On effectue sur chacune de ces cellules un bilan d'énergie en supposant la température du fluide constante à l'intérieur du volume [23].

#### B / Méthode de diagramme température – enthalpie

Le principe de cette méthode est la vérification des performances : [24]

- A partir de la connaissance de la géométrie complète de l'échangeur et de ces conditions de fonctionnement à l'entrée et à la sortie (et donc la puissance qui doit être échangée), ainsi que des propriétés physiques des fluides.
- La méthode permet la qualification de cet appareil en calculant un critère de

surdimensionnement ou de sous dimensionnement qui caractérise le fonctionnement de l'appareil.

Les principales étapes de la méthode sont les suivantes :

- Construction du graphe température –enthalpie.
- Evaluation des coefficients d'échange thermiques en fonction de la géométrie et des conditions locales de l'écoulement.
- Calcul de la surface nécessaire pour échanger la puissance imposée.
- Obtention du critère de dimensionnement thermique, comparaison entre la surface géométrique réelle de l'échangeur et la surface nécessaire.

## **CHAPITRE II:**

### **Encrassement de l'échangeur à chaleur**

**Encrassement de l'échangeur de chaleur****Introduction**

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie et donc, par voie de conséquence, de protection de l'environnement. Une grande part de l'énergie thermique (90% [25]) utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. Ils sont utilisés principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agro alimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Ils constituent donc un des dispositifs clé du thermicien, et sont un composant quasi inévitable dans la maîtrise de l'énergie [26]. Compte tenu de leurs multiples utilisations, les difficultés rencontrées par les utilisateurs d'échangeurs de chaleur sont diverses et variées. Toutefois, un des principaux problèmes de fonctionnement auxquels ils se heurtent a trait aux phénomènes d'encrassement. En effet, l'encrassement reste encore, de nos jours, l'un des phénomènes le moins compris et le moins prédictible de l'industrie.

**Le problème industriel**

Les principaux problèmes rencontrés par les utilisateurs d'échangeurs thermiques ont relation avec les phénomènes d'encrassement, de corrosion, de vibrations et de tenue mécanique. Malgré tout, un certain nombre d'études publiées [27] montre que l'encrassement reste au premier rang des préoccupations des industriels du secteur des équipements de transferts thermiques. Le couplage encrassement – dégradation des échanges thermiques a des fortes répercutions sur la rentabilité de l'opération. Les coûts liés à l'encrassement des échangeurs avoisinent les 700 millions d'euros par an [28]. Ces coûts intègrent les dépenses liées, d'une part, au dimensionnement (surdimensionnement de la surface d'échange à mettre en œuvre, incorporation d'équipements de nettoyage) à hauteur de 20% et, d'autre part, au fonctionnement (perte de production, diminution du transfert, frais de maintenance et nettoyage) à hauteur de 80%. Malgré les efforts considérables déployés depuis les premiers travaux de Kern & Seaton [29] en 1959, l'encrassement demeure encore un phénomène bien mal compris où l'empirisme reste le moyen le plus couramment utilisé. En effet, la large gamme d'écoulements et la panoplie des conditions industrielles existantes contribuent grandement à la méconnaissance du phénomène.

Les recherches sont actuellement menées sur deux fronts, totalement différents mais néanmoins complémentaires. Le premier concerne la détection de l'encrassement, et le second, auquel nous souhaitons nous rallier concerne les produits et appareillages permettant le nettoyage de tels dépôts.

Nous travaillons plus particulièrement sur les produits ayant un fort pouvoir encrassant, dans notre cas le lait.

### **2.3. Notions sur l'encrassement des échangeurs**

L'encrassement qui sous sa forme la plus générale, peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte un grand nombre d'opérations industrielles. Selon la classification établie en 1978 par Epstein, il existe cinq grands types d'encrassement différents :

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

Quel que soit le phénomène d'encrassement considéré, il est plus ou moins critique selon la nature des fluides employés et la conception des échangeurs. Dans les situations réelles d'encrassement, il est bien évident que ces différents mécanismes interagissent ou se superposent de manière plus ou moins complexe.

#### **Types d'encrassement**

##### **La corrosion**

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement [30]. Les produits qui se forment et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement. Il s'agit là d'un mécanisme de corrosion in situ. Lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générés ex situ, l'encrassement correspondant est de type particulaire. Il existe différents types de corrosion :

- la corrosion uniforme caractérisée par une perte d'épaisseur régulière mais dont la vitesse n'est pas forcément proportionnelle au temps
- la corrosion par piqûres où l'attaque est limitée à des zones de très petites surfaces ( $\approx 1\text{mm}^2$ ).
- la corrosion fissurant à l'échelle microscopique intergranulaire ou transgranulaire
- la corrosion sélective où seul un élément d'un alliage subit une attaque sélective.



**Figure II.1:** Importante corrosion

### **L'encrassement biologique**

L'encrassement biologique est dû au développement de micro-organismes qui créent un film encrassant au contact de la surface d'échange. Il peut être causé par trois grands types de micro-organismes :

- les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif de type hydrocarbures ;
- les algues dont le développement est dû à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse
- les champignons dont le développement est dû aux changements des conditions ambiantes telles que l'humidité, la température ou le pH.

### **L'encrassement par réaction chimique**

L'encrassement par réaction chimique est dû à la présence d'une réaction chimique au voisinage d'une surface d'échange. Les produits solides ainsi formés s'y déposent. Il s'agit le plus souvent d'une réaction de polymérisation qui implique la formation d'un dépôt de haut poids moléculaire. Les vitesses de telles réactions chimiques dépendent fortement de la température, de la pression, de la concentration et de la présence d'éléments catalyseurs. Toutefois, la vitesse globale du mécanisme de dépôt dépend aussi de la dynamique des phénomènes de surface et de transfert.

### **L'entartrage**

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies :

- la limite de solubilité du sel contenu dans l'eau doit être dépassée.
- la vitesse de dépôt doit être suffisamment rapide.



**Figure II.2:** Entartrage d'une chaudière à tubes de fumée (P= 15 bars)

### L'encrassement particulaire

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

- □ l'eau des chaudières contenant des produits de corrosion.
- □ l'eau des tours de refroidissement
- □ Les écoulements gazeux chargés de particules tels les résidus solides de combustion, ou les poussières résultant de l'incinération de déchets ménagers.

Toutefois, les types d'encrassement les plus fréquemment rencontrés dans l'industrie sont l'encrassement particulaire et l'entartrage.



**Figure II.3 :** Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière MP



**Encrassement par solidification**

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous refroidie (formation d'une couche de glace à l'intérieur des conduites forcées ou de givre) ou du dépôt d'un constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide.

**Aspect économique de l'encrassement**

Des efforts considérables sont fournis pour analyser le phénomène d'encrassement. Durant le fonctionnement, l'échangeur de chaleur devient encrassé avec l'accumulation des dépôts d'une ou plusieurs espèces sur les surfaces de transfert de l'échangeur. En conséquence, la résistance thermique augmente, ceci fait baisser les performances de l'échangeur. La couche d'encrassement bloque le passage du fluide et augmente la surface rugueuse, est ainsi réduit le taux de transfert de chaleur.

L'ampleur de l'encrassement sur la surface d'échange thermique par un fluide donné, dépend du type de transfert de chaleur (ébullition, condensation), le type de fluide (liquide, gaz) ou la nature de la surface et le type du matériau utilisé.

Les inconvénients économiques de l'encrassement sont attribués à :

- De grosses pertes d'énergie provoquées par l'inefficacité thermique.
- Le coût élevé de maintenance pendant la période de nettoyage des échangeurs.
- De grosses pertes de production durant la période d'arrêt pour le nettoyage.

Aux Etats Unis d'Amérique, une étude effectuée sur le coût annuel de l'encrassement et de la corrosion dans l'industrie pétrolière [31] annonce le chiffre de 10 millions de dollars par an pour une raffinerie, ce qui extrapolé à l'ensemble du monde occidental, atteint la somme de 4.500 millions de dollars.

Les dépenses relatives à toutes les causes d'encrassement, se traduisent par :

- Une surdimensionnement des appareils, en bureau d'études
- Une dépense d'énergie supplémentaire
- Le remplacement du matériel corrodé
- Des coûts d'arrêt d'installation (nettoyage, démontage...).

**Apparition et développement de l'encrassement****Mécanisme de l'encrassement**

Phénoménologiquement, l'encrassement est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes. Selon [32], les mécanismes d'encrassement est décomposés en cinq (5) évènements séquentiels :

- **Initiation**

Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre.

- **Transport des particules dans le fluide jusqu'au voisinage de la paroi**

Ce transport peut être mécanique par impaction sur un obstacle, diffusif, par mouvement turbulent ou bien généré par un champ de force extérieur thermique ou électrique. Dans de nombreux cas, ces différents mécanismes peuvent coexister.

- **Adhésion des particules**

Toutes les particules amenées au voisinage de la paroi n'adhèrent pas obligatoirement sur celle-ci, les phénomènes sont essentiellement contrôlés par les forces d'adhésion et de cohésion du dépôt.

**Nature du dépôt****Dépôt dur**

Il s'agit d'une structure dense et renforcée qui ne s'atténue pas lors d'un simple jet d'eau ou de vapeur mais qui nécessite un traitement mécanique ou un nettoyage chimique approprié.

C'est le cas de dépôt corrosif ou cristallin. La résistance thermique d'un dépôt dur est directement proportionnelle à son épaisseur.

**Dépôt poreux**

C'est le matériau d'un dépôt dur qui se présente en une structure moins dense, sous l'effet des conditions opératoires. Ce cas est plus sérieux que le précédent quand le fluide emprisonné dans les pores a une conductivité thermique plus faible que le matériau solide.

**Dépôt mou**

C'est le cas de boues, poudres de coke ou de fibres végétales. La résistance dans ce cas est plutôt liée au fluide emprisonné qu'au matériau constituant la matrice. Un simple soufflage peut donner des résultats satisfaisants lors du nettoyage.

**Les processus fondamentaux de l'encrassement**

Phénoménologiquement, l'encrassement est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes. Epstein [32] a décomposé les mécanismes d'encrassement selon 5 événements séquentiels :

**L'initiation**

L'initiation comme étant le temps nécessaire avant la formation du dépôt sur une surface propre. Il faut signaler que, dans la grande majorité des études expérimentales traitant de l'encrassement particulière sur des tubes d'échangeurs [33], la phase d'initiation du processus d'encrassement ne sont pas détectée. Pendant l'initiation, la surface est conditionnée par l'encrassement qui aura lieu plus tard.

La température de surface, le matériau et la rugosité influencent le retard initial (l'induction) ou la période d'incubation. Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur la surface d'échange.

Beaucoup de travaux de recherche donnent de plus en plus l'importance à cette phase initiale avant la formation du noyau cristallin encrassant. Actuellement, l'un des principaux objectifs des chercheurs est de donner un modèle capable de décrire la phase d'initiation de l'encrassement. Parmi leurs objectifs : augmenter du temps d'induction (le plus long possible). L'utilisation de nouveaux matériaux de surface, tel que le DLC (Diamond-Like Carbon), permet de prolonger la phase d'induction [34].

La surface rugueuse tend à diminuer le délai de la période. Elle fournit une situation favorable pour la cristallisation pendant que les rainures fournissent des régions pour le dépôt des particules

**Transport**

Pendant cette phase, les substances d'encrassements du volume de fluide sont transportées à la surface de transfert. Le transport est gouverné par un nombre de phénomènes y compris la diffusion, la sédimentation et la thermophorèse (thermophoresis). Une grande quantité d'information disponible pour chacun de ces phénomènes est appliquée pour étudier les mécanismes de transports pour les différentes catégories d'encrassement.

La thermophorèse est le mouvement de petites particules dans l'écoulement de fluide quand le gradient de température est présent. Les murs froids attirent les particules colloïdales pendant que les murs chauds repoussent ces particules. La thermophorèse est importante pour des particules autour de 5  $\mu\text{m}$  de diamètre et devient dominante autour de 0.1  $\mu\text{m}$ . Un autre type de ces processus est électrophorèse (electrophoresis). L'impact inertiel et les tourbillons de turbulence peuvent être présentés. Le modèle théorique qui expose ce processus est disponible dans la littérature [35].

### **Déposition**

Une partie de la matière encrassant transportée est attachée à la surface. Les forces agissantes des particules proches de la surface sont importantes à déterminer l'attachement. En plus, les propriétés du matériel tel que la densité, la viscosité et les conditions de surface sont importantes. L'adhésion des particules sous l'effet des forces de Van der Waals, des forces électrostatiques ou capillaires.

Les forces de London-Van der Waals sont dues aux interactions entre les moments dipolaires générés par le mouvement des électrons autour des noyaux d'atomes neutres voisins. Dans des fluides de phase unique, les forces résultant entre particules et entre les particules et la paroi sont toujours attractives. Pour  $d_p \leq 100 \mu\text{m}$ , les forces de Van Der Waals l'emportent sur les forces de gravité. [36]

### **Le réentraînement (Enlèvement)**

Le réentraînement des particules déposées dû aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt, à l'érosion ou à l'écaillage. Une certaine proportion de la matière est enlevée de la surface immédiatement après leur dépôt et un autre est enlevée plus tard. En général, les forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et la couche de dépôt encrassant sont responsables de cet enlèvement. Les forces de cisaillement dépendent du gradient de la vitesse à la surface, de la viscosité du fluide et de la rugosité de la surface.

### **Le Vieillissement**

Le vieillissement du dépôt caractérisé par un changement de texture et une usure dudit dépôt. Une fois le dépôt est posé sur la surface, le vieillissement commence. Les propriétés mécaniques de ce dépôt seront modifiées durant cette phase, à cause du changement de cristal ou de la structure chimique, par exemple, l'empoisonnement lent du micro-organisme causé par la corrosion à la surface affaiblira et appauvrira la couche du bio-encrassement. La

réaction chimique attire la surface du dépôt pour modifier la composition chimique du dépôt, et de cette façon changer les propriétés mécaniques.

### **Méthodes d'évaluation de l'encrassement**

Pourquoi et comment apprécier l'encrassement ?

Le but est de prévoir, sans ouvrir un échangeur, la date à la quelle il sera nécessaire de le nettoyer, donc de l'arrêter.

Il est extrêmement difficile de prédire le comportement spécifique de l'encrassement dans plusieurs situations à cause du nombre élevé de variables qui peuvent essentiellement modifier le type d'encrassement et le taux de formation. Dans la littérature, les sources décrivant la résistance d'encrassement sont plutôt limitées, car il y a peu de travaux récents sur l'encrassement. Les tables standard sont établies par l'association de fabrication des échangeurs tubulaires (TEMA) [37]. Ces tables donnant le facteur d'encrassement pour différents types de fluides sont souvent les sources les plus utilisées comme référence dans le design des échangeurs de chaleur.

L'effet de l'encrassement est quantifié par la mesure de sa résistance au transfert de chaleur, définie comme étant la différence entre les inverses des coefficients globaux de transfert thermique entre l'état propre et sale (encrassé) de l'échangeur. L'évolution du coefficient globale de transfert de chaleur dans le temps est une réplique fidèle de l'évolution de l'état physique des surfaces d'échanges. Suivant la définition adoptée, la quantification de l'effet de l'encrassement se fait par différentes méthodes, entre autres :

### **Variation du coefficient d'échange global ou Résistance thermique**

Le coefficient global d'échange thermique est l'inverse de la résistance globale qui, elle, est une combinaison des résistances partielles des différents domaines traversés par l'énergie transférée. Dans un échangeur à double-tube, le flux de chaleur traverse un premier fluide chaud, une paroi solide, puis un deuxième fluide froid, chaque domaine ayant sa propre résistance selon le mode de transfert y régnant (convection, conduction ou rayonnement). La différence entre les inverses des coefficients globaux de transfert thermique à l'état propre et sale (encrassé) représente la résistance de l'encrassement notée par  $R_d$  et définie par

$$R_d = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{U} \quad (\text{Équation II.1})$$

$U_d$  et  $U$  ( $\text{W/m}^2/\text{K}$ ) étant les coefficients d'échange globaux, respectivement, à l'état propre et sale (dépôt encrassant) et  $R_d$  la résistance totale du dépôt encrassant ( $\text{m}^2 \text{K/W}$ ).

**Efficacité ou température de sortie**

En présence de dépôt, la performance de l'échangeur diminue et sa capacité d'échange est inférieure à l'objectif de son calcul. Le fluide froid sort moins chaud que prévu. On dit que l'efficacité a diminué.

Cette notion d'efficacité est exprimée par le rapport de la quantité de chaleur réellement échangée sur la quantité maximale pouvant être échangée dans le cas idéal correspondant à un échangeur adiabatique de longueur infinie. En relation mathématique, elle peut être présentée comme :

$$\text{eff} = \frac{C_c(T_{ce} - T_{cs})}{C_{\min}(T_{ce} - T_{fe})} \quad (\text{équation II.2})$$

$C_c$  et  $C_{\min}$  étant les capacités calorifiques respectivement du fluide chaud et la minimale entre les deux fluides.

$T_{ce}$  et  $T_{fe}$  étant les températures à l'entrée et  $T_{cs}$  et  $T_{fs}$  à la sortie des fluides chauds et froids.

**Facteurs favorisant l'encrassement****Zones stagnantes**

Les zones stagnantes sont des zones de dépôts préférentiels par exemple dans l'écoulement externe d'un échangeur à tubes et calandre, les particules se concentreront dans les zones de recirculation à l'aval des chicanes, avec le temps, les dépôts ont tendance dans certains cas à s'agglomérer dans l'espace entre les tubes et les chicanes et créer ainsi un blocage de l'écoulement de fluide.

Dans les échangeurs à plaques, spirales et tubulaires à tiges, l'absence de chicanes réduit le risque d'apparition des zones 'mortes'. Par contre quelque soit le type d'échangeur, des zones de faibles vitesses peuvent apparaître aux raccordements entre les tuyauteries et l'échangeur.

**Effet de la vitesse**

En règle générale, plus la vitesse est importante, plus l'encrassement est faible, bien entendu, la vitesse retenue reste limitée par les contraintes de pertes de charges et les risques d'érosion, [38,39] la vitesse a un effet prépondérant sur le réentraînement [40]. La dureté du dépôt est également un paramètre important pour le réentraînement, cela a été prouvé par [41], dans leur expérience ils ont utilisé des particules de différentes tailles et matières pour

des vitesses d'écoulement différentes. Ils ont trouvé que les petites particules s'attachent premièrement les parois puis les particules larges. Pour éviter l'encrassement une vitesse d'écoulement importante fait diminuer l'épaisseur des dépôts. Avec un dépôt dur et adhérent on constate une évolution linéaire de la résistance d'encrassement par contre avec des dépôts mous, l'évolution de la résistance d'encrassement prend la forme asymptotique classique.

### **Effet de la température de surface**

La présence des points chauds (ou froids) sur la surface d'échange est souvent liées à un problème de répartition de vitesse au voisinage de la paroi. Il est bien connu que lorsque la température de surface croit, le dépôt des sels de solubilité inverse est favorisé. En ébullition, cela reste vrai quelque soient les sels en présence [42,43]. La même règle est encore vraie pour l'encrassement biologique jusqu'à une certaine température limite (de l'ordre de 35°C).

Les dépôts particuliers sont également influencés par les gradients de températures car les phénomènes de thermophorèses agissent dans la direction de ce gradient, pratiquement, cela revient à accentuer les dépôts lorsqu'on refroidit le fluide encrassant et à diminuer ceux-ci lorsqu'on le chauffe.





### **Etat de surface, Rugosité**

Les surfaces rugueuses ont tendance à favoriser les dépôts, particulièrement dans la phase d'initiation de l'encrassement, par contre, par la suite, le dépôt modifie la rugosité de la surface et ce n'est plus la rugosité initiale qui contrôle le phénomène, mais celle du dépôt[44].

### **Matériau de construction, corrosion**

Le choix d'un matériau approprié constitue la méthode la plus radicale pour éviter la corrosion. En présence de produits chimiques, les problèmes de corrosion sont complexes, une variation de composition ou la présence d'impuretés dans la solution peuvent modifier le comportement des matériaux.

Pour limiter les effets néfastes de l'encrassement, il est possible d'agir sur ces divers paramètres [44] cités ci-dessus à savoir :

-  Vitesses
-  Températures
-  Etat de surfaces
-  Nature des matériaux

**Transferts de chaleur sous forme adimensionnelle**

Lorsque le fluide est en écoulement forcé, l'écriture sous forme universelle des corrélations de convection fait intervenir 3 groupements adimensionnels:

- Le nombre de Nusselt qui représente le rapport entre les flux de chaleur transmis par convection et par conduction :

$$\text{Nu} = \frac{h L}{\lambda} = \frac{\Phi_{conv}}{\Phi_{cond}} \quad (\text{équation II.3})$$

Où L est la grandeur caractéristique du système,  $\lambda$  la conductivité thermique du fluide en présence et h le coefficient d'échange local ou global suivant les cas considérés.

- Le nombre de Reynolds qui traduit, d'une part, la compétition qui existe entre les forces d'inertie et de viscosité, et d'autre part, le type d'écoulement du fluide :  $\mu$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} \quad (\text{équation II.4})$$

Où L et u représentent la longueur et vitesse caractéristique de l'écoulement, et  $\rho$ ,  $\nu$ , et  $\mu$  représentent respectivement la masse volumique, la viscosité cinématique, et la viscosité dynamique du fluide.

- Le nombre de Prandtl qui caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux d'un fluide dans un état donné :

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (\text{équation II.5})$$

Le coefficient de transfert de chaleur, traduit par le nombre de Nusselt, est généralement exprimé en fonction du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl :

$$\text{Nu} = f. (\text{Re}, \text{Pr}) \quad (\text{équation II.6})$$

Quel que soit le régime d'écoulement, il existe, dans la littérature, une multitude de relations empiriques ou semi-empiriques permettant d'exprimer le nombre de Nusselt.

**Prévention de l'encrassement dans les échangeurs**

Il existe de nombreuses méthodes pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur, le choix de l'une ou de plusieurs de celle-ci dépend de l'efficacité de la méthode, du type d'encrassement et ainsi de nombreux paramètres économiques. Le tableau suivant résume les différentes actions pendant les quatre stades de vie de l'échangeur. [45]



**Tableau II.1:** Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur.

<b>Phase fonctionnement</b>	<b>Phase construction et montage</b>	<b>Phase fonctionnement</b>	<b>Phase d'arrêt</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix de type d'échangeur</li> <li>• choix de la géométrie et de la configuration</li> <li>• choix des conditions de fonctionnement (température, débit,..)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•assurance qualité sur la fabrication</li> <li>• protection pendant le transport et lors du stockage</li> <li>• opération de nettoyage et de passivation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maintien des conditions de fonctionnement (températures, débit,..)</li> <li>• prétraitement des fluides</li> <li>• utilisation d'additifs (inhibiteurs, antitartres, dispersants, acides)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• démontage et nettoyage manuel</li> <li>•attaques mécanique du dépôts(perçage,..)</li> <li>• nettoyage hydraulique à la lance (vapeur,air)</li> </ul>

**Pendant la phase de dimensionnement**

Il y a deux questions fondamentales auxquelles un projeteur est confronté lors du dimensionnement d'un échangeur comportant certains risques d'encrassement :

- quel est le type d'échangeur le mieux adapté au problème posé ?
- quels sont les paramètres physiques qui permettent de réduire la tendance à l'encrassement ?

**A/ Sensibilité à l'encrassement des divers types d'échangeurs**

Pour un service thermique donné, le choix entre les différents types d'échangeurs dépend de très nombreux paramètres tels que : le coût, l'encombrement, le poids, les niveaux de pressions ou de températures mais dans certains cas, l'encrassement peut être considéré comme un paramètre important.

**B/ Paramètres physiques permettant de réduire la tendance à l'encrassement**

Il s'agit des paramètres qu'on permet d'ajuster pour réduire la tendance de l'encrassement

- Des zones stagnantes ou de faibles vitesses, qui sont des zones où les dépôts s'accumuleront plus facilement.
- Des vitesses qui doivent être optimisées.
- Des points chauds (ou froids) qui doivent être évités.

- Des états de surface qui jouent un rôle important vis-à-vis de l'initiation de l'encrassement.
- Des matériaux eux-mêmes qui doivent être choisis pour éviter la corrosion.

**Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route**

La construction des équipements de transfert thermique peut s'étendre sur une durée relativement longue et les surfaces d'échange sont alors exposées à des conditions diverses. L'encrassement peut être initié lorsque les essais sous pression de l'échangeur sont réalisés avec une eau de mauvaise qualité, non suffisamment rincée à l'eau propre et à l'azote. En conséquence, il est nécessaire de protéger les surfaces d'échange de tout environnement favorisant la corrosion ou le dépôt.

Lors de la mise en service de l'installation, compte tenu de l'excès de surface attribuée pour tenir compte de l'encrassement, l'échangeur ne fonctionne pas dans des conditions optimales, en effet, des vitesses de circulation plus lentes et des températures de surface plus importantes favorisent l'encrassement.

Des efforts doivent être faits au démarrage de l'installation pour fonctionner aux conditions nominales et employer un moyen de traitement de l'eau limitant l'apparition de l'encrassement, il est conseillé d'équiper l'échangeur de plusieurs capteurs de températures et de débit pour pouvoir suivre l'évolution du degré d'encrassement et agir en conséquence lors d'un arrêt prolongé de l'installation, il faut prendre des précautions nécessaires (vidange, mise sous vide, traitement, ...) pour éviter, d'une part la corrosion rapide des surfaces et d'autre part l'apparition d'un encrassement biologique de l'appareil.[ 38 ]

**Pendant la phase de fonctionnement**

Les procédés mécaniques ou chimiques de prévention de l'encrassement pendant la phase de fonctionnement de l'échangeur peuvent améliorer de façon significative les performances de l'appareil, mais également permettent d'augmenter le temps de service entre deux arrêts de maintenance.

**Au moment de l'arrêt de l'échangeur**

Il est souvent nécessaire, malgré les procédés précédemment cités, de nettoyer complètement l'appareil. Le démontage de l'appareil permet des interventions comme le

nettoyage mécanique où plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre, le nettoyage hydraulique ou le nettoyage chimique.

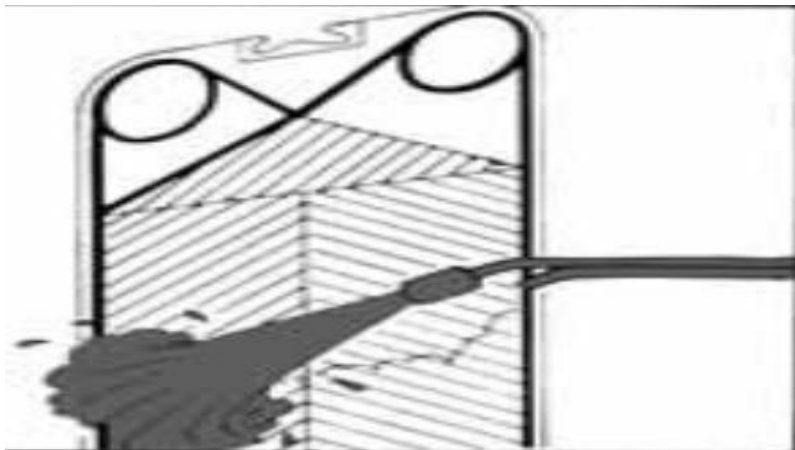
### **Méthodes de nettoyage des échangeurs**

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.

#### **.Nettoyage mécanique**

##### **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.



**Figure II.4:** Nettoyage à l'eau sous pression

##### **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 [46].

- N'utilisez jamais de brosse métallique qui pourrait créer des amorces de corrosion des plaques.
- Soyez prudent de ne pas endommager les joints et de s'assurer qu'ils sont en bon état avant de les remonter sur l'échangeur. [14].

**. Nettoyage chimique**

Le nettoyage des plaques sans démonter les plaques de l'échangeur est possible. Monter un système de nettoyage en place sur les orifices de l'échangeur et faites circuler sur chaque circuit un produit de nettoyage approprié. Assurez-vous de la bonne teneur des plaques et des joints par rapport à ce produit [14].

**Encrassement des échangeurs de chaleur à plaque**

**Figure II.5 :** Photo de plaques d'un échangeur de chaleur encrassé

**. L'encrassement des échangeurs**

Le calcul des échangeurs de chaleur dans les conditions réelles de fonctionnement ne peut souvent être estimé par l'étude thermique seule. Durant le fonctionnement, avec la plupart des liquides et quelque gaz, un film sale s'amorce graduellement sur la surface d'échange, son effet est d'augmenter la résistance thermique des plaques.

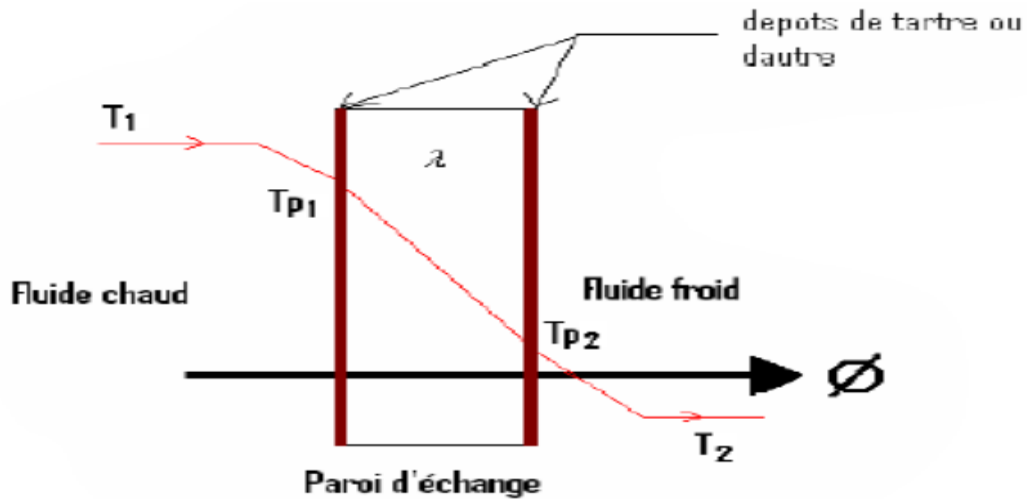


Figure II.6: Echange entre deux fluides séparés par Une paroi plane

Ces facteurs d'encrassement sont appliqués comme l'indique l'équation suivante reliant le coefficient d'échange de chaleur global aux coefficients d'échange  $h_1$  et  $h_2$  de chaque coté d'une plaque, aux résistances d'encrassement  $R_1$  et  $R_2$  et à la résistance thermique de la paroi  $e/\lambda$  qui est en général négligeable.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda} + R_1 + R_2 \quad \text{(Equation II.7)}$$

Il ressort de l'équation ci-dessus que plus les coefficients d'échange  $h_1$  et  $h_2$  sont élevés, plus l'effet des résistances d'encrassement sur le coefficient d'échange global n'est important[8].

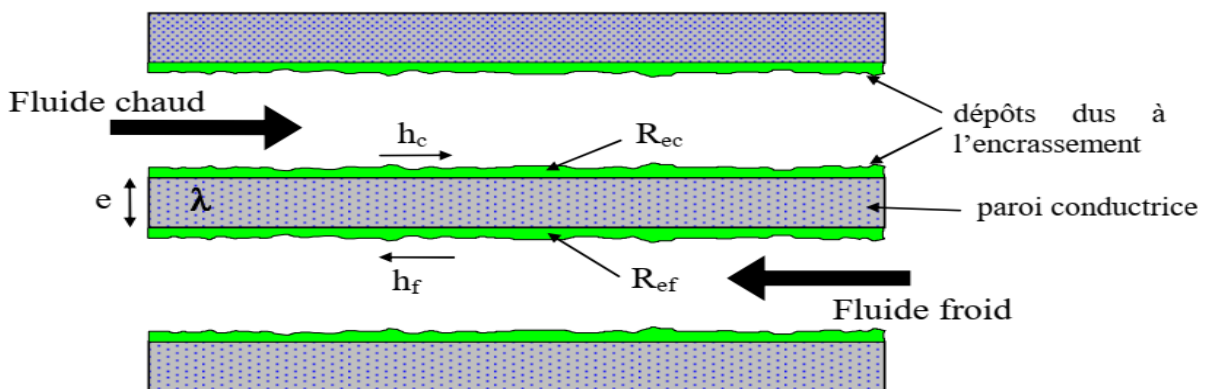


Figure II.7: Schéma de principe d'un échangeur de chaleur à plaque [11]

**Les recherches sur ce problème**

Les recherches sur le problème d'encrassement dans les échangeurs de chaleur et des méthodes pratique pour prédire le facteur d'encrassement, faisant appel notamment à des techniques numériques modernes. L'activité des brevets internationaux actuels sur l'encrassement. [47]

**Détection de l'encrassement**

En régime permanent, l'encrassement peut être détecté par la simple analyse de la variation de l'efficacité.

Comparaison du rendement actuelle de l'échangeur par rapport au caractéristique du fabricant, aussi que la surface d'échange, la capacité thermique et le coefficient de transfert sale.[48]

**Tableau II.2 :** Caractéristiques géométriques des plaques

<b>Matériau</b>	Acier inoxydable
<b>Conductivité thermique de la plaque</b>	16,3 w. m <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup>
<b>Longueur</b>	728 mm
<b>Largeur</b>	1 mm
<b>Épaisseur</b>	1 mm

**Le lait**

**. Généralités**

Le lait a été en 1908 défini lors du premier congrès international pour la répression des fraudes à Genève comme le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle.

**Tableau II.3 :** Paramètres physico-chimique du lai

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs calculée</b>	<b>Source</b>
Viscosité du lait [Pas]	$\mu = (-0.00445 \times T + 0.947) \times 10^{-3}$	Sahoo (2001)
Conductivité thermique du lait [W/m K]	$\lambda = 0.00133 \times T + 0.539911$	Sahoo (2001)
Chaleur spécifique du lait [J/kg K]	$C_p = 2.976 \times T + 3692$	Bertsch (1982)

**Modèles et mécanismes d'encrassement par le lait**

Pour le cas du lait, l'encrassement est provoqué par les réactions chimiques causées par les changements qui proviennent des transformations des protéines du lait sous l'effet de la température. Plusieurs auteurs se sont concentrés sur la cinétique de ces réactions.

D'après les travaux de recherche, l'encrassement est de nature très complexe. Ce phénomène ne peut pas être éliminé, mais essayer de le réduire reste toujours possible. C'est le cas de Fryer et Paterson [49]. Le paramètre important dans le processus d'encrassement est la formation d'un dépôt de protéine de  $\beta$ -lactoglobulin ( $\beta$ lg). L'approche de De Jong et al. [50] ainsi que Toyoda et al. [51] est basée sur la modélisation des réactions chimiques et microbiologiques. Le traitement thermique du lait interprète l'échangeur comme un réacteur chimique et les constituants du lait comme des réactifs.

Les constituants les plus importants provoquant des changements dans les protéines du lait [51] sont :

$\beta$ -lactoglobulin qui représente presque 50% des changements thermiques induits que subit le-lait.

$\alpha$ -lactoalbumine qui représente près de 20% des protéines du lait, elle est riche en sulfuredecaséine.

Quand le lait est chauffé à près de 65 C, la  $\beta$ -lactoglobulin devient instable thermiquement et il y a dénaturation des molécules exposant les groupements sulfhydriques réactifs et les polymérisent irréversiblement pour donner des particules insolubles dans les agrégations.

**La vitesse de l'écoulement et le nombre de Reynolds**

Les conditions d'utilisation des équipements laitiers peuvent contribuer à l'encrassement des surfaces. Ainsi, les faibles vitesses d'écoulements et, pire encore, la stagnation du lait favorisent la formation et le développement des dépôts. Les attentes prolongées en bassins non agités ou dans les chaînes de transformation sont donc à éviter.

Plusieurs auteurs se sont intéressés au rôle de la vitesse d'écoulement ou du nombre de Reynolds sur l'encrassement. Une augmentation de la vitesse peut faire diminuer l'encrassement puisque le réentraînement devient important selon [52] mais engendre des pertes de pression importante et exige ainsi un apport énergétique à cette perte.[53] montrent que la distribution et la nature de l'écoulement, le cas par exemple d'écoulement pulsatoire,

peut donner lieu à une diminution aléatoire ou irrégulière de l'encrassement et même des fois à une absence totale de diminution de l'encrassement quand la vitesse de l'écoulement augmente.

### **Caractéristiques des particules**

#### **Diamètre des particules**

Le diamètre des particules gouverne le mode de transport (diffusion, inertie, impaction), l'amplitude des forces hydrodynamiques et l'adhésion à la paroi. Il joue ainsi un rôle primordial dans le mécanisme de dépôt.[54] ont trouvé que l'augmentation du diamètre fait diminuer l'encrassement pour un système annulaire.

#### **Concentration des particules**

La plupart des modèles revus à travers la bibliographie montrent une augmentation linéaire de la résistance asymptotique d'encrassement avec l'augmentation de la concentration des particules. L'effet de la concentration s'atténue lorsque l'on travaille à des concentrations très élevées. Les travaux de [55] confirment ses hypothèses et indiquent que ceci est dû à l'agglomération des particules.

#### **La turbulence**

Une bonne turbulence dans le milieu permet d'accroître le coefficient d'échange de chaleur entre les deux fluides circulant dans l'échangeur. Elle est meilleure dans le cas des échangeurs à plaques que dans les échangeurs tubulaires selon [56] Les plaques d'un échangeur de chaleur ont une forme assurant la rigidité mécanique de l'empilement et une bonne turbulence [57,58] présenté les deux formes de cannelures les plus employées dans les échangeurs de chaleur à plaques, cannelures droites et les cannelures en chevrons, qui font augmenter la turbulence par un grand nombre de contact métal – métal. Une bonne turbulence donne lieu également à un meilleur transport des particules et une diminution de l'épaisseur de la sous-couche visqueuse selon [59] et ce, grâce à l'emploi d'une surface rugueuse.

#### **Le préchauffage**

Les connaissances de bases du processus de préchauffage et son influence sur la formation de dépôt sont basées sur les investigations de la dénaturation thermique des protéines du lait. La quantité de dépôt diminue avec l'augmentation du degré de dénaturation



des protéines selon [60] Dans le cas d'une dénaturation totale, aucun dépôt ne sera ainsi observé théoriquement.

### **Réduction des dépôts**

Le prétraitement thermique du lait est employé pour allonger les cycles de production des pasteurisateurs, des évaporateurs ou des systèmes de filtration afin de réduire la formation de crasse. Le préchauffage diminue la formation de dépôts dans les échangeurs de chaleur ou le colmatage des membranes de filtration. Ce traitement préliminaire entraîne la précipitation prématurée et lente des minéraux et la dénaturation partielle des protéines qui forment alors de fins agrégats peu susceptibles de s'attacher aux parois de l'échangeur.

L'entreposage du lait à froid (4 °C durant 24 heures) avant l'opération de pasteurisation est également une solution efficace pour réduire la formation de crasse dans les pasteurisateurs.

### **Élimination des dépôts**

Le lavage effectué à la fin de chaque cycle de production des équipements atteints par l'encrassement, est la solution la plus évidente et la plus employée. Elle consiste à enlever les dépôts qui se sont formés. Une autre approche vise à résoudre le problème à la source en tentant d'éliminer la formation de crasse. Le prétraitement du lait permet de réduire d'une façon significative l'encrassement des surfaces tandis que les techniques de traitement des surfaces pourraient rendre les surfaces des équipements de l'industrie laitières antiadhésives.

La procédure de lavage est réalisée avec des produits qui s'attaquent aux composés organiques et minéraux qui composent le dépôt. Les premiers sont éliminés par un lavage alcalin suivis par un lavage acide qui élimine les minéraux. L'efficacité du procédé dépend des conditions opératoires de l'opération. Un lavage avec de l'eau est enfin effectué et ce pour éliminer les traces d'acides ou de bases qui pourraient éventuellement se trouver sur les parois. Des tests chimiques et microbiologiques sont enfin réalisés pour confirmer l'état de propreté de la surface des équipements prête pour des productions futures.

### **Capacité d'encrassement de la FMF**

La concentration de  $\beta$ -lactoglobuline native était évaluée pour le fluide d'essai avant et après le chauffage processus. La dénaturation de cette protéine lorsqu'elle est chauffée est connu pour régir le phénomène d'encrassement des produits laitiers pasteurisation et stérilisation [61]

**Évaluation de la masse de dépôt**

Après chaque étape d'encrassement et de nettoyage, le PHE a été démonté. Toutes les plaques ont été pesées et photographiées.

Pour pouvoir négliger l'effet de vieillissement du FMF, un rapport pondéral ( $R_p$ ) a été calculé avec la quantité totale de masse de dépôt dans les canaux (surfaces modifiées) divisée par la masse de dépôt dans les canaux non revêtus après encrassement et après nettoyage.

$$R_p = \frac{\sum m_{mc}}{\sum m_{nmc}} \quad \text{(équation II.8)}$$

Avec  $\sum m_{mc}$  Dépôt de masse total sur les canaux modifiés.

$\sum m_{nmc}$  Dépôt de masse total sur les canaux non modifiés.

**. Modèles prédictifs de l'encrassement**

Dans ce qui suit, nous présentons d'abord les principaux modèles d'encrassement de la littérature, quelle que soit le type de processus encrassant. Nous revenons ensuite sur les modèles mis au point pour décrire les encrassements laitiers.

**2.21.1. Travaux sur les encrassements laitiers**

**II .22.3.Modèle type Kern et Seaton**

[62] ont élaboré un modèle de formation de dépôt pour une solution de protéines circulant dans un échangeur de chaleur à des températures inférieures à 110 °C.

Le nombre de Biot (défini comme le rapport entre la résistance thermique d'encrassement et la résistance thermique de l'échangeur propre) a été utilisé comme variable cible.

$$Bi = R_f U$$

(Equation II.9)

Avec :

$R_f$  Résistance d'encrassement,  $m^2.K.W^{-1}$

$U$  Coefficient de transfert de chaleur global de l'échangeur,  $W.m^2.K^{-1}$ .

Après une phase d'induction et selon leurs expériences, la valeur initiale de la vitesse d'encrassement,  $\left(\frac{dBi}{dt}\right)_0$  (correspondant à  $\phi_d$ ) est donnée par :

$$\left(\frac{dBi}{dt}\right)_0 = \frac{4.85}{Re} \cdot 10^{13} \cdot \exp\left(\frac{-87 \cdot 10^3}{RT_f}\right) \quad (\text{Equation II.10})$$

Dans ce modèle, la variation de la résistance d'encrassement est liée à la vitesse du fluide et à la température à la surface du dépôt  $T_f$ . [63] ne précisent toutefois pas quelle est la valeur du terme d'élimination. Quand l'encrassement est quantifié par l'évolution au cours du temps du nombre de Biot, la forme générale attendue est :

$$\frac{dBi}{dt} = \frac{K_d}{Re} \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - K_r Bi \quad (\text{Equation II.11})$$

$k_d, k_r$  Constantes de dépôt et d'arrachement

$E$  Énergie d'activation,  $J \cdot \text{mole}^{-1}$

$R$  Constante universelle des fluides,  $J \cdot K^{-1} \cdot \text{mole}^{-1}$

$Re$  Nombre de Reynolds

$T_f$  Température à la surface du dépôt en contact avec le fluide ( $^{\circ}K$ )

Les expériences réalisées par [63] montrent que les réactions ayant lieu dans le volume fluide doivent cependant être prises en compte pour modéliser correctement l'encrassement protéique et non pas uniquement les réactions en paroi.

#### **II .22.4.Modèle type Bilan de population - 1D**

[64] ont développé un modèle mathématique dans lequel sont considérées à la fois les réactions en surface et celles en solution. La dénaturation de la BLG a été décrite comme une cinétique de réactions consécutives de dépliement de l'espèce native et d'agrégation qui inclue la formation du dépôt en surface sous la forme d'une cinétique réactionnelle. Le modèle a été appliqué aux ECP en utilisant les données empiriques de cinétiques de dépliement et d'agrégation de la BLG.

En prolongeant le travail de [65] ont développé un modèle dans lequel ils font l'hypothèse que pour chaque protéine présente, le transfert de matière a lieu entre le fluide et la paroi. Néanmoins, ces auteurs ont indiqué que seuls les agrégats peuvent adhérer à la paroi, de telle façon que la quantité déposée est proportionnelle à la concentration de BLG agrégée au sein de la couche limite thermique. Les travaux de [66] ont été approfondis par [67] en y ajoutant le comportement hydrodynamique dans l'échangeur.

### II .22.5. Modèle de simulation numérique - 2D et 3D

Les modèles dynamiques 2-D permettent de réaliser une étude exhaustive de l'encrassement laitier dans les ECP en tenant en compte l'effet des corrugations des plaques [68] à l'inverse des modèles d'encrassement cités ci-dessus qui sont basés sur une distinction 1-D de l'écoulement.

[69] ont développé un modèle d'encrassement 2-D en l'associant avec des équations d'équilibre de matière afin de prédire la distribution du dépôt laitier. Les équations de Navier-Stokes de dynamique des fluides ont été résolues et couplées avec l'équation de l'énergie d'équilibre et une cinétique d'encrassement à trois phases.

Plus récemment, [70] ont élaboré des modèles d'encrassement 3-D permettant d'évaluer l'importance de l'orientation des corrugations des plaques de l'échangeur de chaleur.

### II .22.6. Modèle intégrant des paramètres cinétiques

[71] ont étudié l'encrassement d'un ECP, sous plusieurs configurations, par un concentré de protéines de lactosérum en mesurant à la fois le coefficient de transfert de chaleur et la masse de dépôt sec. Un modèle empirique a ainsi été développé afin de prédire la masse de dépôt sec dans chaque canal par le biais du calcul de la dénaturation thermique de la BLG (équation II.12).

[71] propose de calculer la masse de dépôt du canal  $i$ , notée  $m_{d,i}$ , en utilisant la variation de la concentration en protéines natives entre l'entrée et la sortie de chaque canal d'échangeur par :

$$\frac{m_{di}}{SV} = 0,127 \sqrt{\Delta C_i} \quad (\text{Equation II.12})$$

Où  $S$  est la surface d'échange,  $V_i$  le volume du canal et  $\Delta C_i$  la différence de concentration en protéines native entre l'entrée et la sortie du canal numéro  $i$ .

Le modèle a été validé pour 3 configurations différentes de plaques d'échangeur. D'après les auteurs, le paramètre 0,127 est fonction de l'intensité du mélange liée à la géométrie des plaques d'échangeur utilisées. La valeur 0,127 est utilisée pour un échangeur utilisant des plaques à cannelures droites (type V7, Vicarb). Pour des plaques à chevrons (type V13, Vicarb), la constante a aussi été déterminée expérimentalement et vaut 0,060. Cela se traduit

par des masses de dépôt deux fois moins importantes. L'intensification du mélange provoquerait la formation plus rapide des agrégats protéiques dans le fluide plutôt qu'à la surface des parois. Cela expliquerait la réduction de l'encrassement dans le cas des plaques à chevrons. Dans ce modèle, le paramètre  $\Delta C_i$  est estimé par une méthode numérique qui utilise les paramètres cinétiques de dénaturation de la BLG proposés par [72] Il est possible de calculer l'évolution de la concentration en protéine native  $C(t)$  au cours du temps, noté  $t$ , en résolvant le modèle cinétique d'ordre 2 :

$$C(t) = \frac{C_0}{1+ktC_0} \quad (\text{Equation II.13})$$

$C_0$  représente la concentration initiale en protéine native. La constante  $k$  est obtenu avec les équations suivantes proposées par [74] puis utilisées par de nombreux auteurs :

$$\text{Log}_{10} K = 37.95 - \frac{14510}{T} = \text{pour } T \leq 363,15 \text{ K}$$

**(Equation II.14)**

$$\text{Log}_{10} K = 5.98 - \frac{2860}{T} \text{ pour } T \geq 363,15 \text{ K}$$

**(Equation II.15)**

Où  $T$  est la température de la solution en Kelvin. Cette température est calculée numériquement pour chaque canal à partir des conditions d'entrée.

## **CHAPITRE III :**

### **Formulation mathématique du problème**

**Introduction**

Cette partie du travail est consacrée à la mise en équations du problème physique considéré, en utilisant les équations de conservation gouvernant les transferts de chaleur dans un canal plan 2D en régime laminaire. La formulation mathématique est présentée dans ce chapitre en explicitant d'abord le problème physique et les principales hypothèses qui ont été introduites. L'étude est multi physiques : écoulement de fluide dans un milieu plan d'une part, et phénomène de transfert de chaleur d'autre part pour deux échangeurs à plaques. Le premier est saint et le deuxième avec encrassement.

Dans les deux cas, les équations de conservation, les hypothèses de travail et les conditions aux limites sont présentées.

**Position du problème physique**

Cette étude porte sur l'analyse de l'encrassement et sont influence dans un échangeur de chaleur à plaques. La géométrie considérée est un canal plan, entièrement remplie par un liquide ayant un fort pouvoir encrassant (le lait). Le transfert de chaleur peut affecter la composition chimique du fluide au cours du temps. Par conséquent, un dépôt minéral résultant de la transformation chimique des protéines du lait sous l'effet de la température, est formé sur les surfaces d'échanges du canal. C'est le phénomène d'encrassement.

Les simulations numériques sont basées sur la résolution des équations de transport modélisant des écoulements dans une conduite plane (espace entre deux plaques) partiellement remplie par un dépôt encrassant au cours du temps.

**Modèle géométrique**

Pour l'étude bidimensionnelle de l'encrassement coté fluide à traité dans un échangeur de chaleur à plaques nous avons choisis un modèle géométrique (2D) composé de trois domaines distincts figure III.1:

- ❖ une plaque en acier inoxydable d'épaisseur  $E_p$
- ❖ le dépôt encrassant d'épaisseur  $E_e$
- ❖ le domaine fluide ou coté froid (le lait) d'épaisseur  $E_f$

Le coté chaud (l'eau) est assimilé à un flux de chaleur convectif égale à :

$$\phi = h S [T_c - T_p]$$

Avec :

$S [m^2]$  surface de la plaque.

$T_p[K]$  température initiale de la plaque.

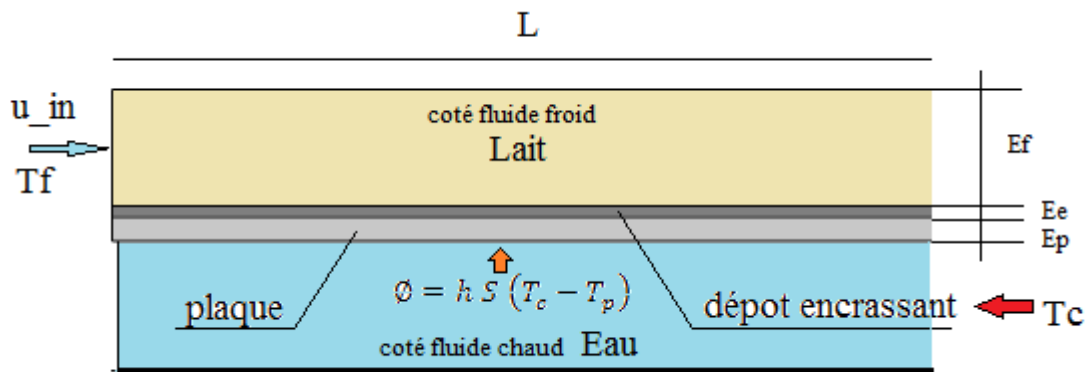


Figure III. 3 : Modèle géométrique

Les caractéristiques de chaque domaine sont présentées dans le tableau

Tableau III.6 : Caractéristiques et dimensions du modèle géométrique

Nom	Expression	Valeur	Description
L	728[mm]	0.728 m	longueur de la plaque
Ep	2[mm]	0.002 m	épaisseur de la plaque
Ee	1[mm]	0.001 m	épaisseur de l'encrassement
Efs	10[mm]	0.01 m	épaisseur domaine fluide saint
Ef	Efs-Ee	0.009 m	épaisseur domaine fluide
u_in	0.005[m/s]	0.005 m/s	vitesse d'entrée
Tc	353.15[K]	353.15 K	température d'entrée coté chaud
Tf	283.15[K]	283.15 K	température d'entrée coté froid
K_e	0.1[W/K*m]	0.1 W/K.m	Conductivity d'encrassement

Les propriétés thermo-physiques de chaque domaine

- ❖ la plaque en acier inoxydable



**Tableau III. 7 :** Les propriétés de la plaque

Nom	Valeur	Unit
Conductivité thermique	45	W/(m·K)
Densité	7800	kg/m <sup>3</sup>
Capacité calorifique à pression constante	300	J/(kg·K)

❖ le dépôt encrassant

**Tableau III. 8 :** Les propriétés dépôt encrassant

Nom	Valeur	Unit
Conductivité thermique	K_e	W/(m·K)
Densité	900	kg/m <sup>3</sup>
Capacité calorifique à pression constante	4300	J/(kg·K)

❖ le domaine fluide ou coté froid (le lait)

**Tableau III. 9 :** les propriétés du lait

Nom	Valeur	Unit
Conductivité thermique	0.56	W/(m·K)
Densité	1030	kg/m <sup>3</sup>
Ratio de chaleurs spécifiques	1	1
viscosité dynamique	0.002	Pa·s
Capacité calorifique à pression constante	4000	J/(kg·K)

**Conditions aux limites**

Le fluide à traiter (le lait) entre dans l'échangeur à plaques avec une vitesse ( $u_{in}$ ) et à une température uniforme en moyenne,  $T_f$  tableau. La longueur  $L$  du canal est choisie de sorte que l'écoulement soit dynamiquement et thermiquement établi dans la section de sortie pour les nombres de Reynolds considérés. Les propriétés thermo-physiques du fluide sont évaluées à la température moyenne  $(T_c+T_f)/2$  ou  $T_c$  est la température d'entrée du fluide chaud (l'eau) figure. Un flux convectif est imposé le long de la plaque du coté du fluide chaud.

**Hypothèses**

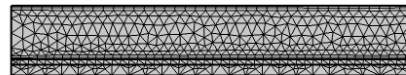
- Fluide Newtonien,
- Le régime d'écoulement est laminaire
- L'écoulement est incompressible, bidimensionnel en régime stationnaire
- le milieu fluide ainsi que le dépôt encrassant sont supposés homogènes et isotropes
- On suppose que les propriétés physiques du fluide restent constantes et évaluées à une température moyenne de référence
- L'accélération due à la pesanteur est négligée
- Pas de source interne de chaleur
- Toute la chaleur générée par les plaques est cédée au fluide
- La dissipation d'énergie par les forces visqueuses est négligée

Le modèle physique choisi ainsi que le système de coordonnées utilisé est représenté sur la Figure III.1.

**Maillage**

**Tableau III. 10 : type et nombre d'élément utilisé  
Pour la discrétisation du modèle**

Description	Value
Minimum element quality	0.2357
Average element quality	0.7731
Triangle	7440
Quad	1702
Edge element	1574
Vertex element	8



**Figure III. 4 : maillage du modèle**

**Equations gouvernantes**

**Equations de conservation**

Les équations de base représentant la physique du problème sont celles de Navier-Stokes qu'on peut trouver par exemple dans Hinze

**Equation de conservation de la masse**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{U}) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où « ρ » est la masse volumique du fluide et « U » sa vitesse.

En tenant compte des hypothèses précédentes, l'équation de continuité se réduit à:

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (\text{III.2})$$

**Equation de conservation de la quantité de mouvement**

$$\frac{D(\rho \cdot \vec{U})}{Dt} = -\nabla P + \vec{F} + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (\text{III.3})$$

$\frac{D}{Dt}$  Étant la dérivée particulaire définie par :

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial X_j}$$

En tenant compte des hypothèses précédentes, l'équation (III.3) se réduit à:

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial p}{\partial X_i} + \mu \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (\text{III.4})$$

**Equation de conservation de l'énergie**

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + q' + \beta T \frac{DP}{Dt} + \mu \zeta \quad (\text{III.5})$$

Où « ' q » est la génération interne de chaleur par unité de volume et « ζ » la fonction de dissipation visqueuse

En tenant compte des hypothèses précédentes, l'équation d'énergie se réduit à :

$$\rho C_p U_j \frac{\partial T}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial X_j} \right) \quad (\text{III.6})$$

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle physique considéré et les équations qui régissent le phénomène en régime laminaire et stationnaire à l'intérieur d'un échangeur de chaleur en prenant en considération les hypothèses et les conditions aux limites.

## **CHAPITRE IV:**

### **Résultats et discussions**

## Résultats et discussions

### Introduction

L'encrassement est défini comme la formation sur les surfaces de transfert de chaleur de dépôts indésirables, qui empêchent le transfert de chaleur et augmentent la résistance à l'écoulement du fluide, entraînant une chute de pression plus élevée. Les échangeurs de chaleur industriels fonctionnent rarement avec des fluides non polluants. Les échangeurs de chaleur cryogéniques à basse température sont peut-être la seule exception [1]. La croissance des dépôts entraîne une dégradation des performances thermo-hydrauliques de l'échangeur de chaleur avec le temps. L'encrassement affecte la consommation d'énergie des processus industriels et peut également décider de la quantité de matériau supplémentaire nécessaire pour fournir une surface de transfert de chaleur supplémentaire utilisée dans les échangeurs de chaleur pour compenser les effets de l'encrassement.

Nous exposons et discutons dans ce chapitre les résultats de notre étude qui a été faite en quatre parties :

-une première partie de validation de notre model numérique ou nous comparons les performances d'un échangeur de chaleur à plaques dans les deux cas (sans encastrement et avec encastrement).

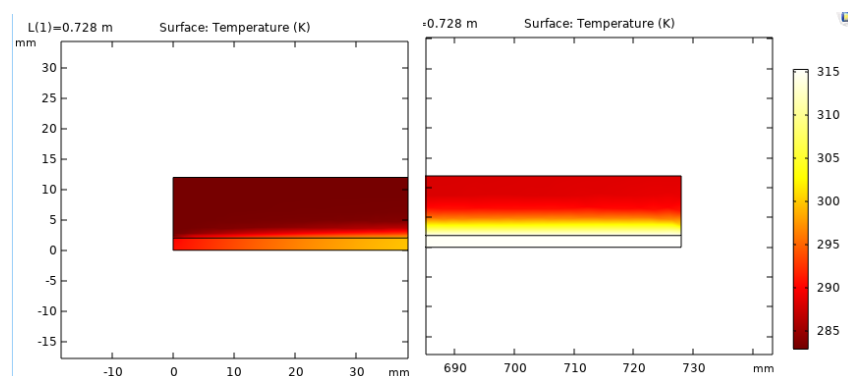
- une deuxième partie consacrée à l'effet de l'épaisseur du dépôt encrassant

-une troisième partie pour voir l'influence du type d'encrassement

-et une dernière partie consacrée à l'effet du débit du fluide traité.

### Comparaison entre l'échangeur saint et encrassé

L'étude de comparaison par simulation (menée grâce au code de calcul COMSOL version 5.4) de notre model avec et sans encrassement a donnée les résultats suivants :

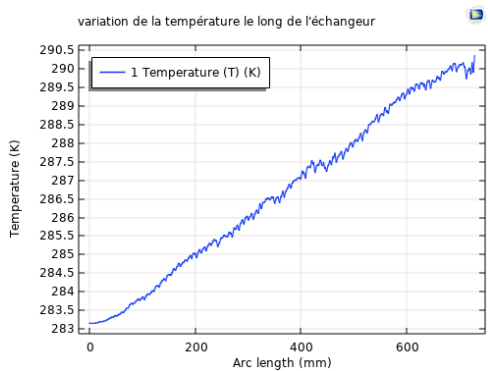


**Figure IV.1** : distribution de la température dans le lait le long de la plaque

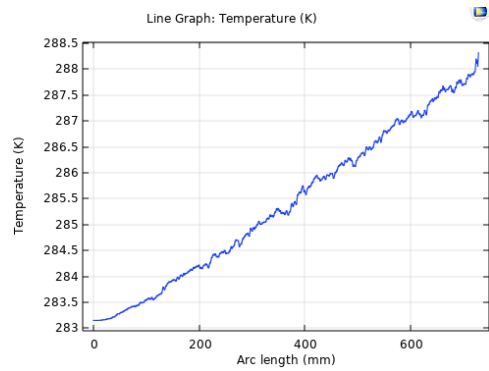
La figure IV.1 montre la distribution de la température le long d'une plaque dans les deux cas de figure (sans encrassement et avec encrassement).

Le fluide a traité (le lait) reçoit un flux de chaleur du fluide chaud (l'eau) à travers la plaque de l'échangeur ce qui augmente sa température (initialement  $T_f=283.15$ ) au fur et à mesure qu'on se dirige vers la sortie.

Cette augmentation diminue pour l'échangeur avec encrassement, chose que nous pouvons clairement voir dans la figure IV.2 qui illustre la variation de la température le long de la plaque .En effet la température de sortie du lait est de 290.5 K pour l'échangeur saint (sans encrassement) alors qu'elle n'atteint pas 288.5 K dans le cas de l'échangeur avec encrassement.

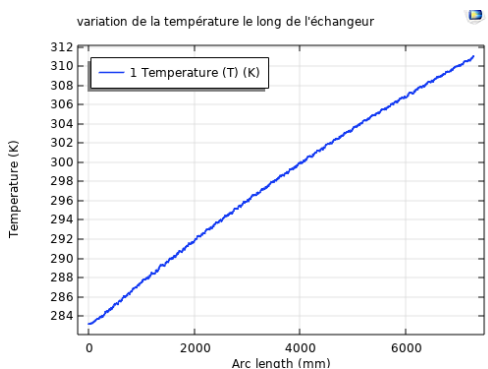


a) échangeur saint

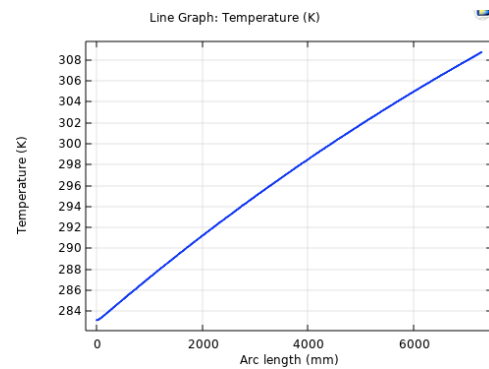


b) échangeur avec encastrement

**Figure IV.2 :** profil de la température le long a)d'une plaque saine et b) une plaque encrassé



a) échangeur saint



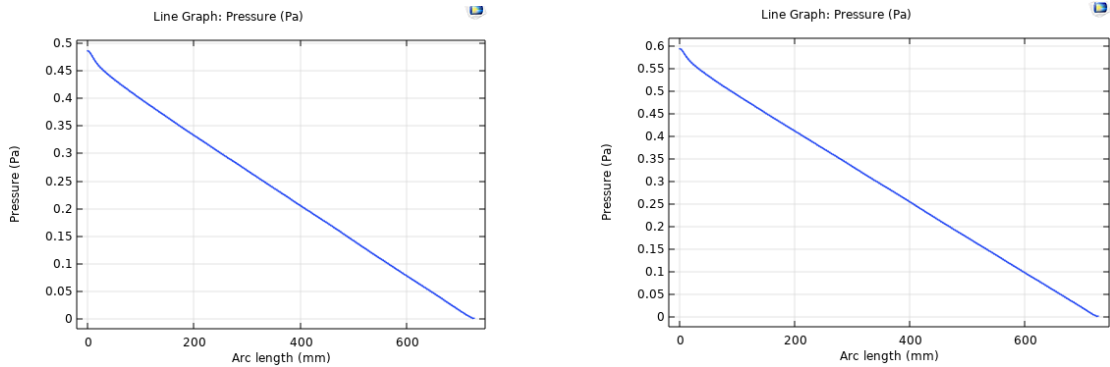
b) échangeur avec encastrement

**Figure IV. 3 :** profil de la température pour a)un échangeur à 10 passes saint et b) un échangeur à 10 passe encrasser

La figure VI.4 montre les pertes de charges le long d'une plaque dans les deux cas (sans et avec encrassement).

On remarque une augmentation des pertes de charges de 0.15 Pa dans la plaque encrassée par rapport à la même plaque sans encrassement.

Cette différence n'est pas négligeable pour une seule plaque (c.à.d. une seule passe) lorsqu'on sait qu'un échangeur de chaleur peut contenir des centaines de plaques.



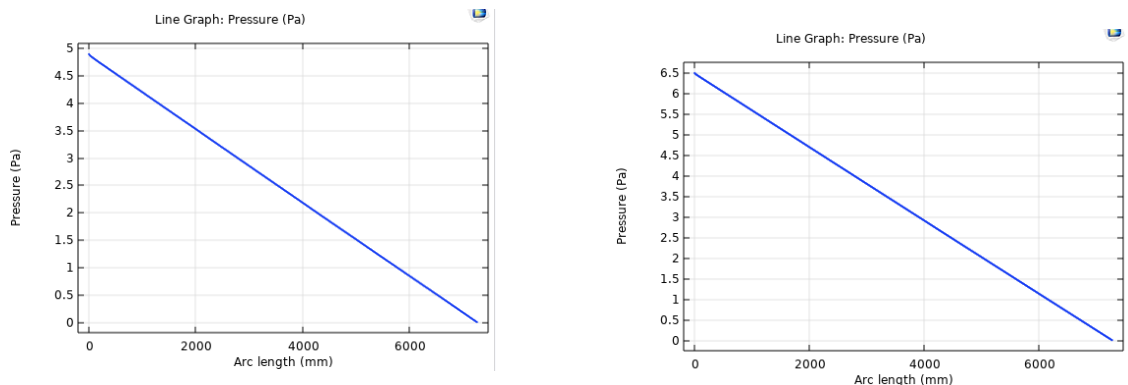
a) échangeur saint

b) échangeur avec encastrement

Figure IV.4 : pertes de charges le long a)d'une plaque saine et b) une plaque encrassé

Pour avoir une idée sur l'ampleur des pertes de charges causées par l'encrassement dans un échangeur de chaleur à plaques, la figure IV.5 montre les pertes de charges dans un échangeur à 10 passes du fluide traité (le lait).

La différence de pression entre l'entrée et la sortie de l'échangeur est multipliée par dix ( $\Delta p = 1.5 \text{ Pa}$ )



a) échangeur saint

b) échangeur avec encastrement

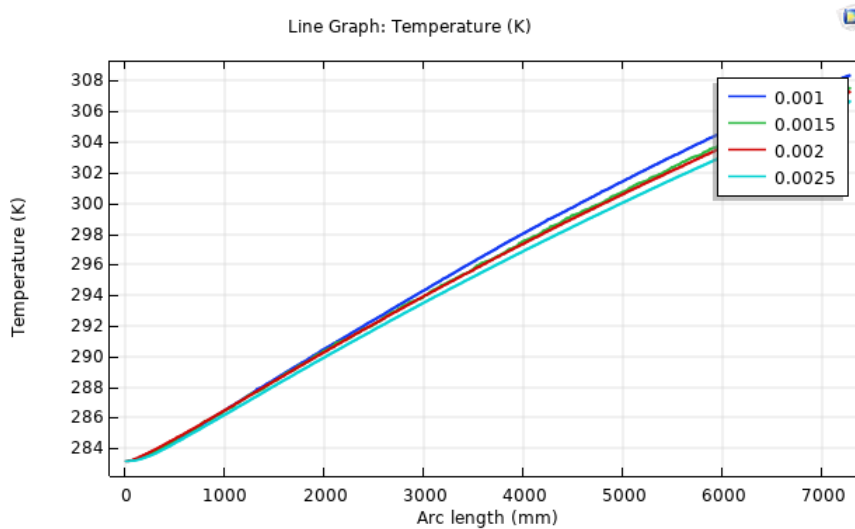
Figure IV. 5 : profil de la chute de pression pour a) un échangeur à 10 passes saint et b) un échangeur à 10 passe encrasser



### Effet de l'épaisseur du dépôt

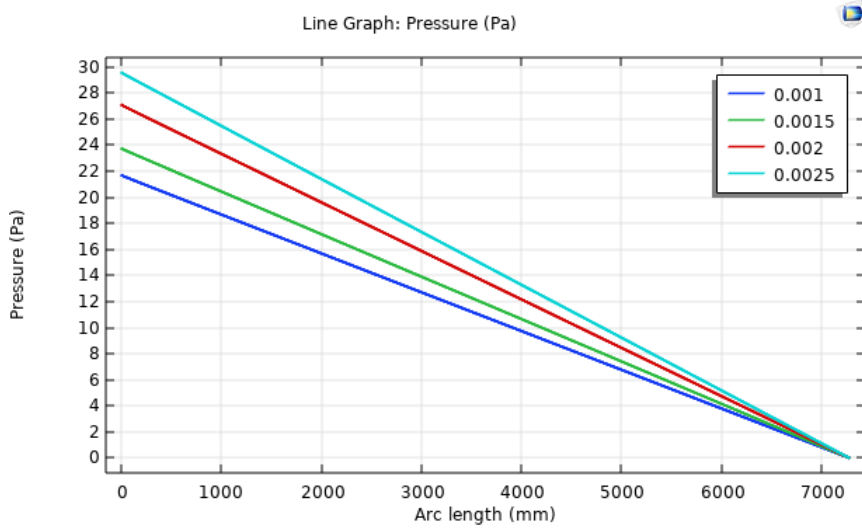
Cette partie de l'étude est faite pour plusieurs épaisseur du dépôt pour voir l'effet de l'ampleur de l'encrassement sur les performances de l'échangeur. Les résultats de la simulation sont illustrés ci-dessous.

La figure IV.6 montre le profil de la température le long de l'échangeur pour différentes valeurs de l'épaisseur du dépôt encrassant. On remarque que la température de sortie du fluide traité (le lait) diminue lorsque l'épaisseur du dépôt augmente ce qui donne une diminution de température de 3K pour une augmentation de l'épaisseur de 1.5mm pour un échangeur de chaleur à 10 passes.

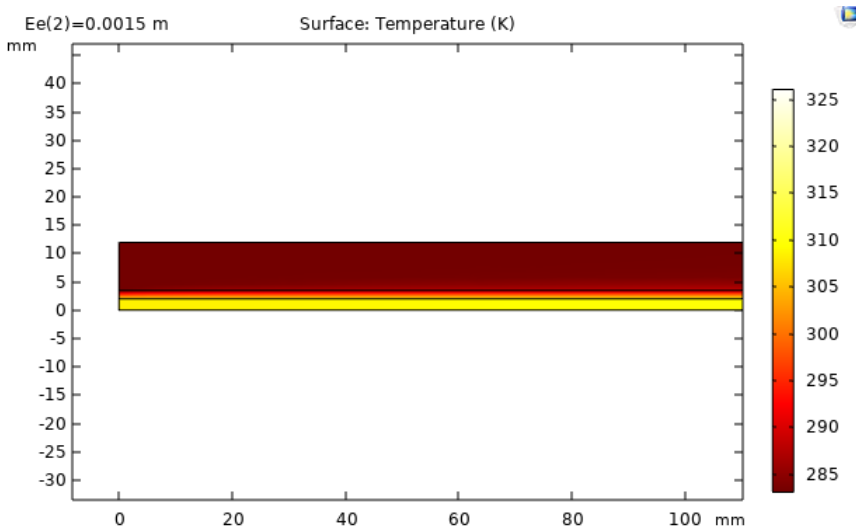
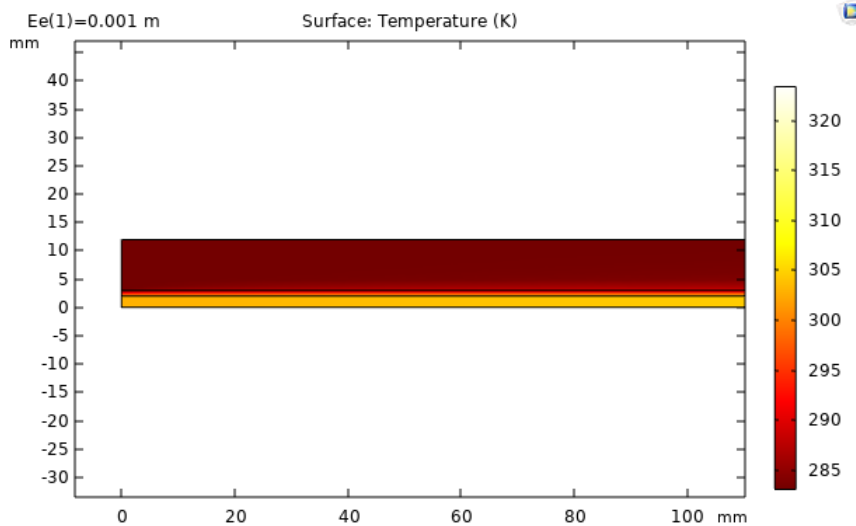


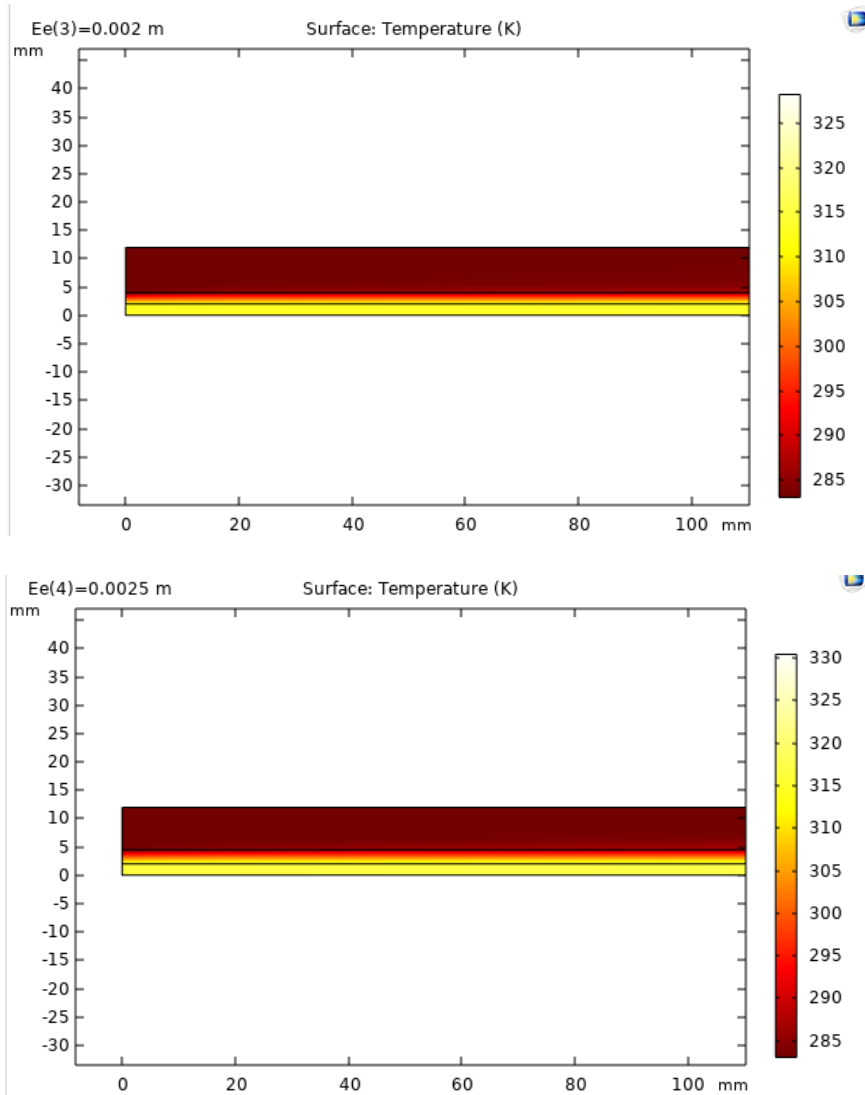
**La figure IV .6 :** Profil de la température le long de l'échangeur pour différentes valeurs de l'épaisseur du dépôt encrassant

La figure IV.7 montre les pertes de pressions dans un échangeur à chaleur à 10 passes pour différentes épaisseurs du dépôt. On remarque que les pertes de charges varient proportionnellement avec l'épaisseur du dépôt ; une augmentation de l'épaisseur de 1.5mm provoque une croissance des pertes de charges de 8Pa, ce qui est logique puisque les pertes de pression sont proportionnelles à la longueur et inversement proportionnelles au diamètre de l'écoulement.



La figure IV .7 : Les pertes de pressions dans un échangeur à chaleur à 10 passes pour différentes épaisseurs du dépôt

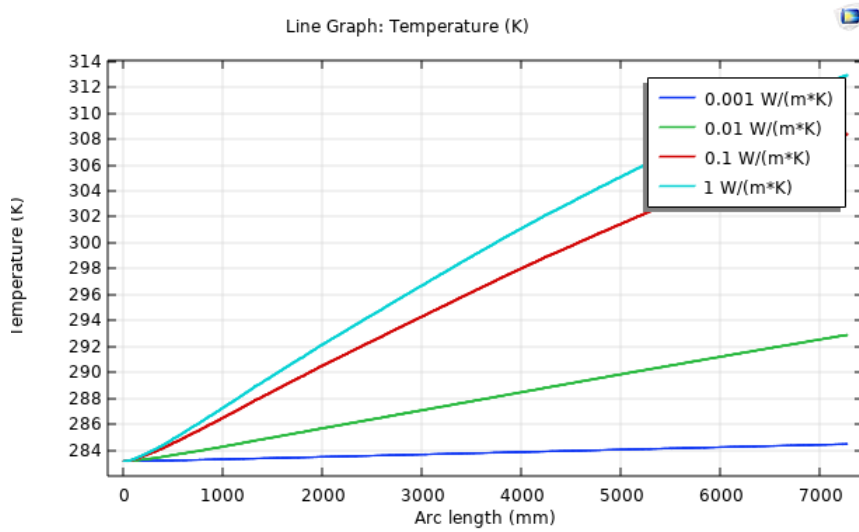




La figure IV .8 : La distribution des températures le long de notre modèle pour différentes épaisseurs du dépôt encrassant.

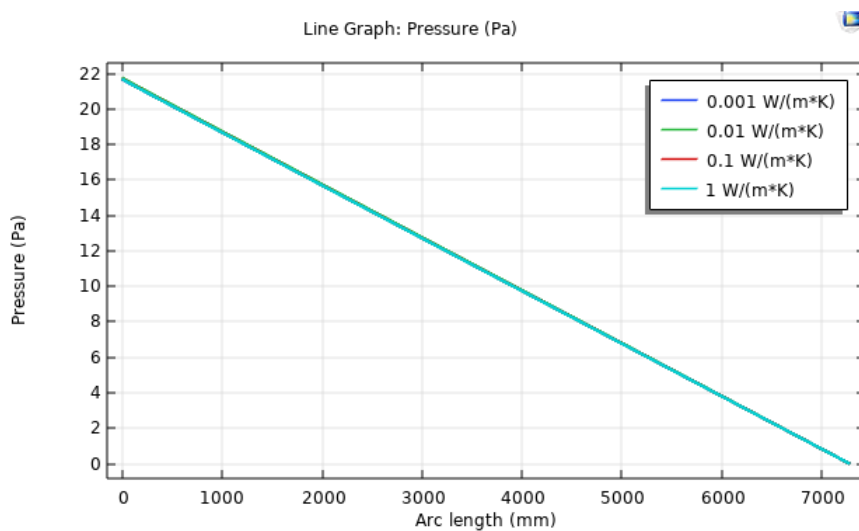
**Effet du type d'encrassement**

Pour voir l'effet du type d'encrassement sur le rendement de l'échangeur nous avons fait une étude sur notre model encrassé avec la même épaisseur du dépôt encrassant pour plusieurs conductivités thermiques.



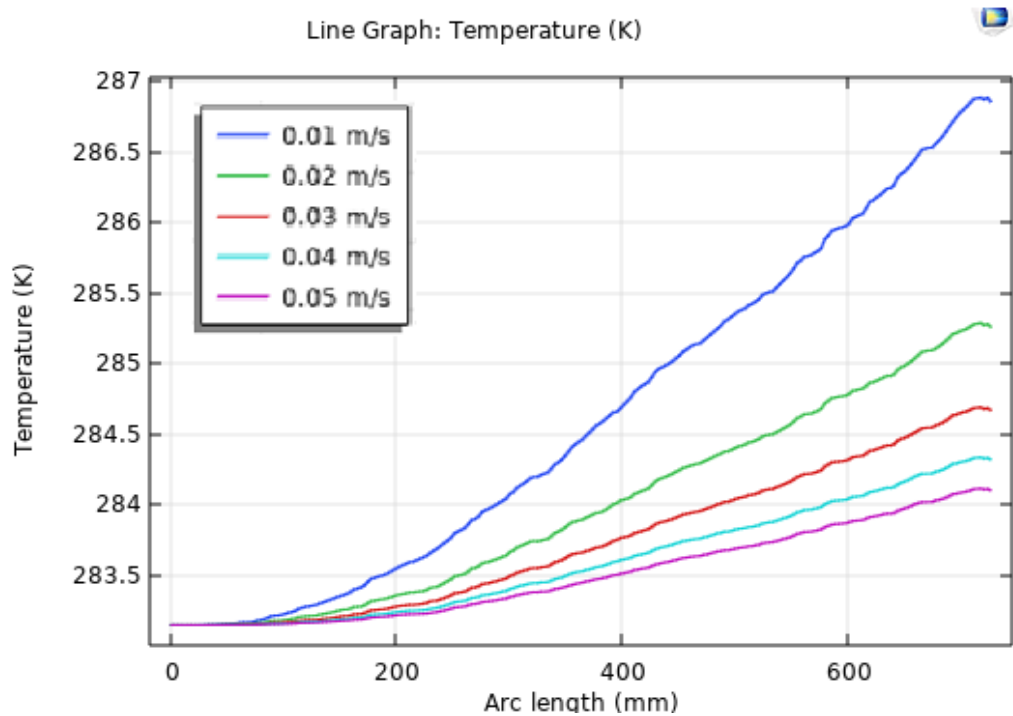
**La figure IV.9 :** Variation de la température le long de l'échangeur pour différent valeurs de la conductivité thermique du dépôt encrassant

La figure IV.9 montre la variation de la température pour différent types d'encrassement. On remarque que plus le dépôt est isolant (faible conductivité thermique) plus les performances de notre échangeur diminues puisque la température de sortie du lait décroît. Le flux de chaleur échangé diminue avec la conductivité thermique du dépôt.



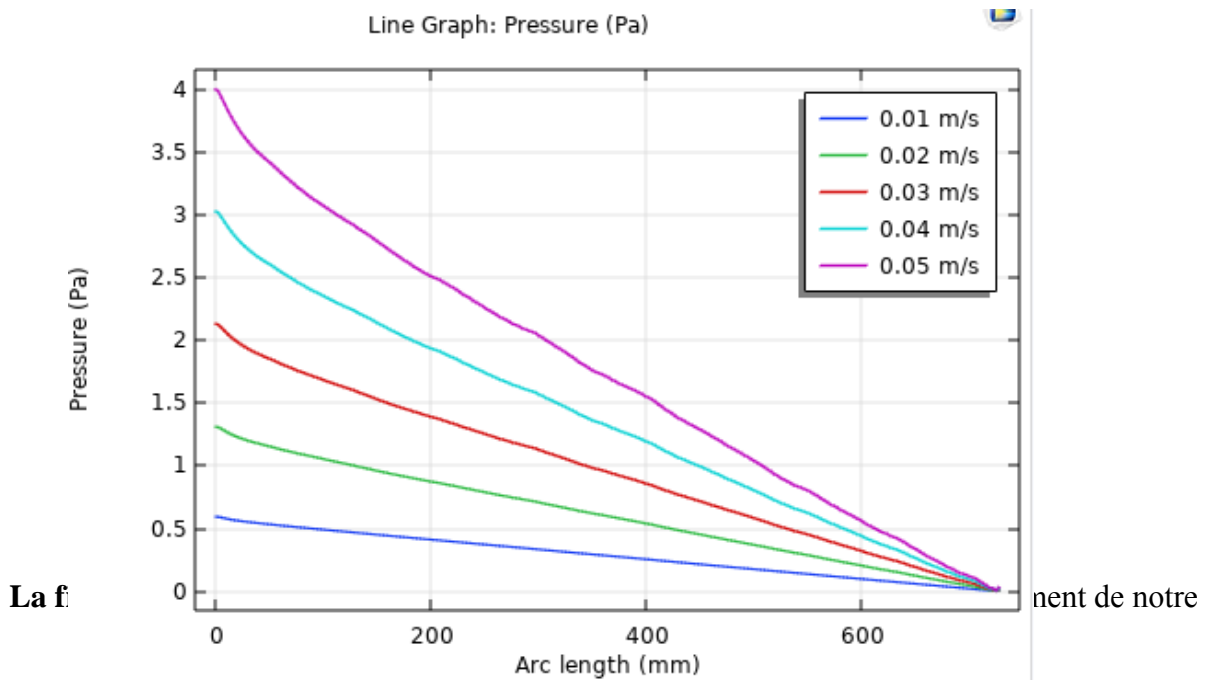
**La figure IV.10 :** Les pertes de charges le long de l'échangeur pour différent valeurs de la conductivité thermique du dépôt encrassant

## Effet de la vitesse d'entrée du fluide traité



**La figure IV.12 :** Profil de la température le long d'une plaque avec 1mm d'encrassement de notre échangeur pour différents débits du fluide traité

La figure IV montre le profil de la température le long d'une plaque avec 1mm d'encrassement de notre échangeur pour différents débits du fluide traité (le lait). plus la vitesse de l'écoulement du fluide est grande plus le flux de chaleur échangé diminue. Une augmentation de 0.4 m/s de la vitesse d'écoulement provoque une diminution de température de 3.5K au niveau de la sortie du lait.



Pour les pertes de charges, l'augmentation de 0.04 m/s de la vitesse d'écoulement du lait provoque une croissance de 4.5Pa dans les pertes de charges.

### Conclusion

Notre étude paramétrique bidimensionnelle menée grâce au code de calcul COMSOL version 5.4 nous a permis de déduire les conclusions suivantes :

- ✚ En comparant les performances d'un échangeur dans son état saint (sans encrassement) et dans son état encrassé, les résultats ont révélés que l'encrassement provoque une diminution variant entre 10 et 30 % des performances thermiques de l'échangeur et une augmentation allant jusqu'à 20% des pertes de charges.
- ✚ La température de sortie du fluide traité est fortement influencée par l'épaisseur du dépôt encrassant. Plus le dépôt est épais plus le flux échangé est faible et plus les pertes de charges sont importantes.
- ✚ La conductivité thermique du dépôt encrassant influe directement sur le transfert de la chaleur du fluide chaud (l'eau) vers le fluide froid (le lait). Plus le dépôt est isolant moins l'échangeur est performant.

Et enfin le flux de chaleur transmis est inversement proportionnel au débit du fluide traité. Le flux diminue lorsque la vitesse d'écoulement augmente.

# **CONCLUSION GENERALE**

### CONCLUSION GENERALE

A travers notre modeste travail, nous avons essayé de décrire et d'expliquer le phénomène de l'encrassement des échangeurs de chaleur en particulier les échangeurs à plaques et leurs influences sur leurs performances thermo-hydrauliques.

Notre étude paramétrique bidimensionnelle menée grâce au code de calcul COMSOL version 5.4 nous a permis de déduire les conclusions suivantes :

- ✚ En comparant les performances d'un échangeur dans son état saint (sans encrassement) et dans son état encrassé, les résultats ont révélés que l'encrassement provoque une diminution variant entre 10 et 30 % des performances thermiques de l'échangeur et une augmentation allant jusqu'à 20% des pertes de charges.
- ✚ La température de sortie du fluide traité est fortement influencée par l'épaisseur du dépôt encrassant. Plus le dépôt est épais plus le flux échangé est faible et plus les pertes de charges sont importantes.
- ✚ La conductivité thermique du dépôt encrassant influe directement sur le transfert de la chaleur du fluide chaud (l'eau) vers le fluide froid (le lait). Plus le dépôt est isolant moins l'échangeur est performant.

Et enfin le flux de chaleur transmis est inversement proportionnel au débit du fluide traité. Le flux diminue lorsque la vitesse d'écoulement augmente.



## **Référence**

- [1] MARIE-HELENE MATHONIERE, MARIE DOMINIQUE HAGELSTEEN, avis no99-A-02 du conseil de concurrence relatif à l'acquisition de société Vicarb par la société Alfa Laval Holding AB, janvier 1999.
- [2] Shah, R.K, Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley and Sons, Inc. New York. 2002.
- [3] Hewitt, G.F., Shires, G.L. and Bott, T.R., Process Heat Transfer. CRC press, Boca Raton, Florida. 1994.
- [4] Calcul et dimensionnement des échangeurs de chaleur. Université de M'sila Département de Génie Mécanique, Année universitaire 2016/2017.
- [5] André BONTEMPS, Alain GARRIGUE, Charles GOUBIER, Jacques HUETZ, Christophe MARVILLET, Pierre MERCIER, Roland VIDIL, « Description des échangeurs », technique de l'ingénieur [B 2 341].
- [6] A.MENIDJEL, « Exploitation des échangeurs à faisceaux et calandre », I.AP/ SPA. SKIKDA (2009).
- [7] SWEP International plate heat exchanger (PHE), 2003
- [8] R. VIDIL, les échangeurs à plaques et joints, « Description, éléments de dimensionnement » -paris : Lavoisier, février 1982.
- [9] Document GEA ECOFLEX GmbH, "Brassed and Gasketed plate heat exchangers", 2003
- [10] Plate heat exchangers, manuel des échangeurs de chaleur, « document CEVITAL »
- [11] [www.alfalaval.com](http://www.alfalaval.com).
- [12] [www.gea-phe.com](http://www.gea-phe.com).
- [13] JAQUE PADET, « Echangeurs thermiques, méthodes globales de calculs » -paris : Masson 1994.
- [14] VITHERM sas, « Échangeur de chaleur à plaques jointées», VT-MAN 1003 France (2005).
- [15] Padet « Principes Des Transferts Convectifs » Blytechnica Edition.
- [16] Kay, J.M 1964 « Introduction A La Mécanique Des Fluides Et La Transmission De La Chaleur » Editions Dunad. (1997).
- [17] Lachi, M, « Caractérisation Et Couplage Conduction –Convection En Régime Transitoire » Habilitation A Diriger Des Recherches. (2002).
- [18] Detrigne, « Evolution De L'encrassement Des Echangeur De Chaleur Par L'eau De Refroidissement », Heat Transfert. (1990).

- [19] Miller, J.A., Mechanisms of gas turbine regenerator fouling, n°67-LGT-26, ASME, New York, 1967.
- [20] ANGLARET, KAZMIERCZAK, « Technologie génie chimique », 1997.
- [21] JEAN FRANCOIS SACADURA « Initiation aux transferts de chaleur », Lavoisier 1982.
- [22] FRANCK KREITH, « Transmission de chaleur et thermodynamique », 1967
- [23] Leconte, J. « Echangeur de chaleur dimensionnement thermique », Technique de l'ingénieur traité mécanique et chaleur B2342.
- [24] MUNISH GUPTA, Numerical study of heat transfer enhancement in a plate-fin heat exchanger using rectangular winglet type vortex generator, department of mechanical engineering national institute of technology (Institution of National Importance) KURUKSHETRA-136119, INDIA March, 2010.
- [25] Tech Bontemps et al., Techniques de l'ingénieur, Traité Mécanique et Chaleur, B2340 à B2344, France, 1993.
- [26] Finkbeiner et al Echangeurs thermiques: Enjeux, marchés, technologie et politique d'innovation, Editions européennes Thermique et Industrie (EETI), France, 1993
- [27] Bott Bott, T.R., Fouling of Heat Exchangers, Editions Elsevier, Amsterdam-Lausanne-New-YorkOxford- Shannon-Tokyo, 1995.
- [28] Sheikh et al. A risk based heat exchanger analysis subject to fouling: Economics of heat exchangers cleaning, Energy 25, Elsevier Ed, p 445-461, 2000
- [29] Kern et Seaton Kern, A theoretical analysis of thermal surface fouling., Britanic Chemical Sciences 4, Volume 5, p 258-262, 1959.
- [30] Laque et Copson Laque, F. L. Corrosion resistance of metals and alloys. Reinhold Publishing Corporation, 1963.
- [31] Van Nostrand W.L. "Economic penalties associated with the fouling of Refinery heat transfer Equipment" Fouling of heat transfert equipment - J.G. KNUDSEN - EFC SOMERSCALES Hemisphere Publishing Corporation
- [32] Epstein Epstein, N., Thinking about heat transfer fouling : a 5x5 matrix, Heat Transfer Engineering, 4 (1), p 43- 56, 1983.
- [33] Glen et al. Measurement and modelling of fouling on finned tubes. Fouling mechanisms: Theoretical and Practical aspects, Eurotherm Seminar 23, Grenoble, p 181- 188, 1992
- [34] Bohnet et al. Fahmi Brahim, Wolfgang Augustin, Matthias Bohnet, Numerical simulation of the fouling process, International Journal of Thermal Sciences 42 (2003) 323–334.

- [35] Nishio et al. Thermophoretic deposition of aerosol particles in a heat-exchanger pipe. *Ind. Eng. Chem. Proc. Design Dev.*, Vol. 13, 408-415.
- [36] Rodliffe R.S et Means F.A., "Factors Governing Particulate Corrosion Product Adhesion to Surfaces in Water Reactor Cooling Circuits", CEGB Report RD/BN4525, Berkeley Nuclear Laboratories, UK, 1979.
- [37] TEMA Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Associations, (1988) 7th ed., TEMA, Tarrytown, New York.
- [38] Duffau, C, Grillot, J, M, « L'encrassement Dans Les Echangeurs, Description, Prévention, Remèdes », GRETH. (1991).
- [39] Muller-Steinhagen, M, Watkinson, P« Influence Of Operating Conditions On Particulate Fouling » *Can,J, Chem,Eng*,66 42-50. (1988).
- [40] Grillott, J, Icart, J« Fouling Of A Cylindrical Probe and A Finned Tube Bundle In A Diesel Exhaust Environment », *Exp, Thermal Fluid, Sci* 14.442- 454.(1997).
- [41] Rindt, C, Abd-Elhady,M, S. « Minimum Gas Speed In Heat Exchanger To Avoid Particulate Fouling » *Int, J, Of Heat And Mass Transfer*47.3943-3955. (2004).
- [42] Crittenden,B et Khater, E« Fouling From Vaporising Kerosene » *Fouling Of Heat Exchanger Equipment; ASME.HTD.VOL.35, ED.JW. SUTOR.AM A.M. PRITCHARD*, Pp 57-64.(1984).
- [43] Story,M.Knudsen, J.G. « The Effect of Heat Transfer Surface Temperature on the Scaling Behavior of Simulated Cooling Tower Water ». *Am.Inst. Chem.Engn Symp.*74 (124), 25-30. (1978).
- [44] Garret, Price « Problem Characterization, Economic Assessment And Review Of Prevention, Mitigation And Accommodation », *Techniques Pnl-4883*. (1983).
- [45] Marne,J,Webb,R,L« Worschop On An Assesment Of Gas Side Fouling In Fossing Fuel Exhaust Environment » *Doe/Id*,12138. (1982).
- [46] French, M,A. « Chemical Cleaning In Practice », *Proceedings Of A Conference At Nottingham University*. (1981).
- [47] Fouling in heat exchangers Hassan Al-Haj Ibrahim Department of chemical Engineering Al-Baath University, Homs, Sy.
- [48] Fouling of Heat Transfert Surfaces Mostafa M. Awad Mansoura University, Faculty Of Engineering, Lech.Power Eng.Dept. Egypt P4/5.
- [49] Fryer et al.The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling. *Journal of the Society of Dairy Technology*, 19, 119-139.

- [50] De Jong et al. Fouling of heat transfer equipment in relation to the denaturation of  $\beta$ -lactoglobulin. *Journal of the Society of Dairy Technology*, 45, 3-8.
- [51] Toyoda et al. A computational model for reaction fouling from whey protein solutions. In *Fouling and cleaning in food processing*, Jesus, College, Cambridge, March 23-25, 1994 (pp. 191-196).
- [52] **Rakes** et al. Deposition of dairy protein-containing fluids on heat exchanger surfaces ; *Biotechnology Progress*; 2 (4); (1986) pp 210–217.
- [53] **Delplace** et al. A reaction engineering approach to the analysis of fouling by whey proteins of a six-channel-per-pass plate heat exchanger; *Journal Food Engineering* ; 34 ; (1997) pp 91–108.
- [54] **Müller - Steinhagen** et al. Influence of operating conditions on particulate fouling; *Canadian Journal Chemical Engineering*; 66; (1988) pp 42–50.
- [55] **Blöchl** et **Müller - Steinhagen** Influence of particulate size and particle / fluid combination on particulate fouling in heat exchanger; *Canadian Journal Engineering*; 68; (1990) pp 588–591.
- [56] **Visser** et al. Fouling of heat treatment equipment; *Bulletin of the IDF*; 328; (1997) pp 7–31.
- [57] **Riverol** et **Napolitano**, Estimation of fouling in a plate heat exchanger through the application of neural networks; *Journal of Chemical Technology and Biocology*.80; (2005) pp 594–600).
- [58] **Leroy**, Les échangeurs à plaques ALFA-LAVAL : une technologie en mutation ; *International Chimie* n° 291 (1988).]
- [59] **Bailer**, Etude des différents mécanismes de dépôt conduisant à l'encrassement particulaire en phase gazeuse des tubes d'échangeurs de chaleur ; Thèse de l'INPG (France); (1998).
- [60] **Dannenberg**, Zur reaktionskinetik der molkenproteindenaturierung und deren technologischer bedeutung; Ph.D thesis; Technical university Munchen weihenstephan; (1986).
- [61] Delplace et al., Fouling of heat treatment equipment. *Bulletin of the IDF*, Vol. 328, pp. 7-31).
- [62] Changani S et al « Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing ». *Exp. Therm. Fluid Sci.* [En ligne]. mai 1997. Vol. 14, n°4, p. 392- 406.

- [63] Belmar-Beiny M et al « The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling ». *J. Food Eng.* [En ligne]. 1 janvier 1993. Vol. 19, n°2, p. 119- 139.
- [64] De Jong P. Modelling and optimization of thermal processes in the dairy industry [En ligne]. Wageningen : [s.n.], 1996. 175p.
- [65] Jong P et al « Fouling of heat treatment equipment in relation to the denaturation of beta-lactoglobulin ». *J. Soc. Dairy Technol. U. K.* [En ligne]. 1992.
- [66] Toyoda I., Fryer P. J. « A computational model for reaction and mass transfer in fouling from whey protein solutions ». In : *Fouling Mitig. Ind. Heat Exch. Equip.* New York : Begell House, 1997. p. 589–600.
- [67] Georgiadis M. C., Macchietto S. « Dynamic modelling and simulation of plate heat exchangers under milk fouling ». *Chem. Eng. Sci.* mai 2000. Vol. 55, n°9, p. 1605- 1619.
- [68] Jun S., Puri V. M. « Plate heat exchanger: thermal and fouling analysis ». In : *Comput. Fluid Dyn. Food Process.* [s.l.] : CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007. p. 417–432
- [69] Jun S., Puri V. M., Roberts R. F. « A dynamic 2D model for thermal performance of plate heat exchangers ». *Trans. Asae.* janvier 2004. Vol. 47, n°1, p. 213- 222.
- [70] Choi W., Jun S., Nguyen L. T., Rungraeng N., Yi H., Balasubramanian S., Puri V. M., Lee J. « 3-D Milk Fouling Modeling of Plate Heat Exchangers with Different Surface Finishes Using Computational Fluid Dynamics Codes ». *J. Food Process Eng.* [En ligne]. août 2013. Vol. 36, n°4, p. 439- 449.
- [71] Delplace F., Leuliet J. C. « Modeling fouling of a plate-heat exchanger with different flow arrangements by whey-protein solutions ». *Food Bioprod. Process.* septembre 1995. Vol. 73, n°C3, p. 112- 120.
- [72] Lyster R. L. J. « The denaturation of  $\alpha$ -lactalbumin and  $\beta$ -lactoglobulin in heated milk ». *J. Dairy Res.* [En ligne]. juin 1970. Vol. 37, n°02, p. 233–243.