République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar. El Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies
Filière: Raffinage et Pétrochimie
Option: Raffinage et Pétrochimie

Présenté par:
LEGSEIR Mouhamed Ismail
TOUAHRI Ismahan

Thème

Dimensionnement Et Etude De Pertes De Charge Dans Un Echangeur De Chaleur En Présence Du Phénomène D'encrassement

Soutenu le 26 /05/2016

Devant le Jury:

Mr BOUDHIAF Moussa	Président	Université d'El Oued.
Mr BEN Meya Omar	Examinateur	Université d'El Oued.
Mr ATIA Abdelmalek	Rapporteur	Université d'El Oued.

2015/2016

Table De Matière

Titre	N° page
Remercienments	
Dedicas	
Listes des tableaux	
Listes des figures	
Symboles et notation	
Abrévention	
Introduction genérale	1
Chapitre I : GENERALITES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR	1
I.1 Définition:	1
I.2 Le Phénomène de conduction thermique :	2
I.3 Le Phénomène de convection thermique	4
I.4. Le Phénomène de rayonnement thermique :	6
Chapitre II : GENERALITES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR	
II.1. Introduction :	9
II.2.Définition :	9
II.3. Appareils tubulaires d'échangeur de chaleur	9
II.4. Principe de réalisation technologique et modes de circulation :	12

II.5. Critères de classement des échangeurs :	15
II.6. Les différents types d'échangeurs de chaleur :	16
II.7.L'échangeur à tubes (faisceaux) et calandre :	21
II.8 .Notion fondamental mécanique de fluide et perte de charge	28
II.9. Etude des pertes de charge dans les échangeurs de chaleur:	30
Chapitre III: Phénomène d'encrassement :	36
III.1-Introduction:	36
III.2- Définition :	36
III.3.L'encrassement des Échangeurs de chaleur:	36
III.4.L'effet de l'encrassement dans l'industrie pétrolière:	37
III.5.Classification des différents types d'encrassement :	37
III.6.L'effet économique de l'encrassement:	39
III.7.Les recherches sur ce problème:	42
III.8. Processus encrassement	42
III.9.Détection de l'encrassement	43
III.10.Nettoyage de l'échangeur	43
III.11. Paramètres influençant l'encrassement	46
Chapitre IV: Partie Calcul	
IV.1. Calcul des pertes de charge des échangeurs P10-GA-21-02avec les données du constructeur "Design"(voir les données après l'annexe n°1):	48
IV.2.Calcul des pertes de charge de l'échangeur P10-GA-21-02 avec les données actuelle (Mars.2016°):	52

CHAPITRE V : Simulation HYSYS	58
V.1. Présentation de HYSYS	58
V.2. Définition de HYSYS	58
V.3. Étapes de simulation:	59
V.4. Conditions opératoire:	59
CONCLUSION	
Références Bibliographie	
RESUMES	

Remerciements

Nous tenons à remercier le ALLAH qui nous a donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Toutes nos reconnaissances pour notre encadreur Mr. ***ATIA ABDEMALEK****,pour son aide très précieuse, sa disposition, sa gentillesse, et ses conseils.*

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciement BOUDHIAF ET BEN MEYA OMER et tous le personnel du RAFFINAGE et à toutes les personnes qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation et la réussite de ce travail.

DEDICAS

Je dédie ce modeste travail en guise de respect et de reconnaissance

A mes très chers parents qui ont été toujours à mes côtés.

A ma grand-mère que dieu la protège

A mes frères

A mes chère sœurs

A toute la famille TOUAHRI ET LEGSEIR

A tous mes amis sans exception

et

À tous les amoureux de la pensée pour qui le plaisir croît

avec l'ouverture d'esprit.

Ismahane et Ismail

Liste des Tableaux

Chapitre I

Généralités sur le transfert de chaleur

Chapitre II

Echangeurs de chaleur

Tableau-II.01 : symboles de méthode kern……31

Chapitre III

Le Phénomène d'encrassement

Tableau-III.01: Activité de brevet international…….33

Chapitre IV

Partie Calcul

Tableau-IV.01: Présente les données réelles de l'échangeur P10-GA-21-02…….42

Tableau- IV.02: Résultats de l'échangeur P10-GA-21-02……..…46

Chapitre V

Simulation HYSYS

Tableau-V.01: conditions opératoire de l'échangeur P10-GA-21-02.....48

Tableau-V.02: Résultas de simulation pour échangeur P10-GA-21-02 …….…....49

Listes Des Figures

Chapitre I

Généralités sur le transfert de chaleur

Figure I.01: Conduction de chaleur à travers une paroi 4
Figure I.03: Phénomène de convection thermique.....4
Figure I.04: Phénomène de rayonnement thermique.....6
Figure I.05 : Rayonnement thermique du soleil.....7

Chapitre II

Echangeurs de chaleur

Figure II.01: Principe de fonctionnement d'un échangeur 11
Figure II.02 : Résistance au transfert de chaleur.....12
Figure II.03: Circulation à Co-courant.....13
Figure II.04.a : Circulation à contre-courant.....13
Figure II.04.b : Circulation associant Co-courant et contre-courant.....14
Figure II.05.a : Courant croisés avec faisceaux tubulaires 14
Figure II.05.b : Courant croisés avecappareils plaques.....14

Figure II06.a: Échangeur monotube en serpentin 16
Figure II.06.b: Échangeur coaxial.....16
Figure II.06.c : Echangeur multitubulaires. 17
Figure II.06.d : Échangeur à tube séparé 17
Figure II.06.e: Échangeur à tube rapproché.....17
Figure II.06.f : Échangeur à tube ailette.....18
Figure II.07.a: Catégories de l'échangeur de chaleur.....18
Figure II.07.b : Echangeur double tube.....19
Figure II.08.a : Echangeur à plaques.....19
Figure II.08.b: Échangeur à plaque et joint.....20
Figure II.09 : Échangeur brasée 20
Figure II.10.a : Schéma simplifié d'un échangeur à tube et calandre 21
Figure II.10.b : schéma simplifié d'un échangeur à faisceaux et calandre 22
Figure II.11 : Faisceau tubulaire 22
Figure II.12 : la calandre 22
Figure II.13 : Les calottes 23

Figure II.14.a : Faisceau tubulaire d'un échangeur à tube et calandre..... 23
Figure II.14.b : Les tubes ..... ……..……24
Figure II.15 : dispositions des tubes..... …24
Figure II.16.a : Différents types de chicanes…….25
Figure II.16.b : chicane ……..……..……25
Figure II.16.c : La calandre……..……..26

Chapitre III

Le Phénomène d'encrassement

Figure III.01 : l'encrassement de échangeur ……...……..……...…….28
Figure III.02: Faisceau encrassé …….……...32
Figure III.03 : Formation de dépôt ……...…….…..…….34
Figure III.04 : Nettoyage mécanique ……..……...35
Figure III.05 : Nettoyage hydraulique ……..……..…...35
Figure II.06 : Nettoyage par projectile ……..…….36

Chapitre IV

Partie Calcul

Chapitre V

Simulation HYSYS

Figure V.01 : Schéma de simulation…….……...…….…..…...35
Figure V.02 : les propriétés de la charge ……..…….36

Symboles et notation

Symbole	désignation	unité
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
υ	Viscosité cinématique du brut	m^2/s
μ	Viscosité dynamique du brut	Kg/h.m
D_c	Diamètre de la calandre	m
B	Espace entre chicane	m
d_i	Diamètre intérieur des tubes	m
m	Débit massique	Kg/s
E	Efficacité thermique	/
R	Capacité thermique	/
R_e	Nombre de Reynolds	/
T_1	température d'entrée fluide chaud	°C
T_2	température de sortie fluide chaud	°C
d_e	Diamètre extérieur des tubes	m
N_t	Nombre des tubes	/
L	Longueur des tubes	m
P	Pas des tubes	m
n_c	Nombre de passe côté calandre	/
n_t	Nombre de passe côté tube	/
ΔP	Pertes de charge	bar
λ	Conductivité thermique	Kcal/h.m °C
d	Densité	/
Cp	Chaleur spécifique	Kcal/kg °C
R_s	Résistance d'encrassement	$h.m^2$ °C/kcal
ϕ_t	Coefficient correctif de viscosité de brut	/
a	Surface d'échange d'un tube	m^2
Us	Coefficient de transfert global de transfert salle	$Kcal/h.m^2$ °C
Fc	fraction calorique	/
Tc	température calorique côté calandre	°C
tc	température calorique côté tubes	°C
a_t	Section par passe	m^2
Gt	Vitesse massique côté tubes	$Kg/h.m^2$
G_{CT}	Vitesse massique côté calandre	$Kg/ h.m^2$
J_h	coefficient de transfert de chaleur	/
h_{io}	coefficient de film interne	/
h_o	coefficient de film externe	/
e	Epaisseur des tubes	m
U_p	Coefficient de transfert propre	/
D_e	Diamètre équivalent	m
t_t	Température de tube	°C

ΔP_c	pertes de charge côte calandre	Kg/m^2
ΔP_t	pertes de charge côte tube	Kg/m^2
A	Surface d'échange globale	m^2
ΔTLM	Température moyenne logarithmique	ºC
Φ	Quantité de chaleur échangée	Kcal/h
R_{si}	Résistance due au film d'encrassement déposé à l'interieur des tubes	$h.m^2$ ºC/kcal
R_{io}	Résistance dans le fluide à l'extérieur	$h.m^2$ ºC/kcal
R_{sio}	Résistance due au film d'encrassement déposé à l'extérieur des tubes	$h.m^2$ ºC/kcal
R_{st}	Résistance due à la paroi métallique du tube(négligeable)	$h.m^2$ ºC/kcal
A	Surface d'échange globale	m^2

Abréviation

A.P.I : American Petroleum Institute

ρ_{15}^{15}: La densité à T= 15°C

AES: Advanced Encvyption Standard

CKT: Canoe Kayak Toulousain

ASME: American Society of Mechanical Engineers

CODAP: Code de Construction des Appareils à Pression

AD: Active Directory

BS : British Standards

BWG: Birmingham Wire Gage

cst: Centistokes

cP: Centipoises

SI : Système International

TEMA: Tubular Exchanger Manufacturers Association

ft : foot

NRTL: No Random Two Liquids

INTRODUCTION GENERALE

Les échangeurs de chaleur représentent de 30 jusqu'à 40% des équipements pétrochimiques, on trouve les échangeurs dans toutes les unités pétrochimiques. Environ 15% des coûts d'entretien d'une usine de traitement peut être attribuée à des échangeurs de chaleur et les chaudières, et de ce fait, la moitié est probablement causée par l'encrassement. Les coûts associés à l'échangeur de chaleur encrassé comprennent les pertes de production dues à la perte de la production pendant les arrêts planifiés ou dues à l'encrassement, et les coûts de maintenance découlant de la suppression de l'encrassement des dépôts avec des produits chimiques et / ou des dispositifs antisalissure mécaniques ou le remplacement de l'équipement corrodé. En règle générale, les coûts de nettoyage sont dans la gamme de 40.000 $ à 50.000 $ par échangeur de chaleur pour le nettoyage [15].

L'accumulation des dépôts indésirables sur les surfaces des échangeurs de chaleur est habituellement appelée l'encrassement. La présence de ces dépôts représente une résistance au transfert de chaleur et réduit l'efficacité de l'échangeur. Les problèmes liés à l'encrassement des échangeurs thermiques sont connus depuis que le premier échangeur de chaleur a été inventé[15].

L'encrassement des surfaces de l'équipement de traitement peut avoir un impact négatif significatif sur l'efficacité opérationnelle de l'unité. Sur la plupart des industries d'aujourd'hui, un drain économique majeur peut être causé par l'encrassement. Les coûts totaux d'encrassement liés pour les principaux pays industrialisés est estimé à 4,4 milliards $ annuellement[15].

Dans notre sujet nous allons essayer d'étudier l'échangeur H de l'unité 101 de la raffinerie de Skikda. Le but de cette étude est de savoir l'impact de l'encrassement sur cet échangeur et savoir aussi si l'encrassement affecte son rendement.

Cette étude sera en quatre chapitres :

Le premier chapitre : définir la notion de base de transfert de chaleur aussi décrire les différents modes de transferts de chaleur.

Le deuxième chapitre : description des classements des échangeurs de chaleur avec une description spécifiée pour les échangeurs à tubes et calandre. On va décrire la mythologie des calculs.

Troisième chapitre : description une généralité sur le phénomène d'encrassement effectué dans les échangeur

Quatrième chapitre :

on a fait une étude par le simulation hysys V8.8 sur l'échangeur P10-GA-21-02 EN finira notre mémoire par une conclusion générale et perspective

I. GENERALITES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR :

La connaissance des lois de la transmission de la chaleur est essentielle pour tous les ingénieurs et techniciens qui ont à connaître des problèmes thermiques : frigoristes, thermiciens, spécialistes en génie des procédés, etc. Lorsque deux corps, ou deux milieux, ne sont pas à la même température, ils ne sont pas en équilibre thermique. On peut alors observer un passage d'énergie calorifique de chaleur, du corps, ou du milieu, le plus chaud vers le corps, ou le milieu, le plus froid. On sait que le transfert de chaleur spontané est impossible d'un milieu froid vers un milieu chaud[1].

Pour se transmettre, la chaleur fait appel à trois mécanismes fondamentaux :

- La conduction.
- La convection.
- Le rayonnement.

I.1 Définition:

I.1.1 La température (T):

Le chaud et le froid sont appréciés par des sensations d'où une évaluation irrationnelle de ces grandeurs. La température caractérise le niveau auquel la chaleur se trouve dans un corps permettant ainsi de dire qu'un corps est plus ou moins chaud qu'un autre [1] .

Les températures dans le S.I. sont exprimées en °C (degrés Celsius) mais dans la littérature, on rencontre les degrés Fahrenheit (°F) et les degrés Kelvin (°K) Conversion entre les différentes unités de températures [1].

°K = °C +273

°C = 5/9 (°F – 32)

I.1.2 La chaleur (Q)

La chaleur est une forme d'énergie (énergie de mouvement des molécules)qui va d'un point chaud (température plus élève) vers un point froid(température moins élevée).

C'est la sensation perçue par nos organes de sens lorsque nous sommes placés devant un corps incandescent par exemple.

L'unité légale est le Joule (J) mais la Kcal(Kilocalorie) est également utilisée[1].

Une Kcal est la qualité de chaleur qu'il faut fournir à un Kg d'eau pour augmenter sa température de 1°C.

1 Kcal = 4.185 KJ=-1FG (frigorie).

1 BTU = 1.053 KJ (BTU: British thermal unit) [1].

I.1.3 La puissance (W)

La puissance est rapport de énergie fournie ou absorbée sur l'unité de temps.

L'unité légal est le Watt(W).

Conversion d'unité :

1KW=860Kcal/h

1Kcal/h =-1Fg/h =1.163 W

1cv (cheval) =736 W[1].

I.1.4 Flux de chaleur (Q)

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses température. La qualité de chaleur transîmes par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [2]:

$$¤ = \frac{1}{s}\frac{dQ}{dt} \quad \text{.....(I.01).}$$

Ou S est l'aire de la surface (m^2).

I.1.5 L'équilibre thermique

Lorsque l'on place deux objets, l'un chaud, l'autre froid, dans une enceinte qui n'échange pas de l'énergie avec le milieu extérieur (on a donc affaire à un système isolé), le corps chaud se refroidit tandis que le corps froid se réchauffe et jusqu'à un état d'énergie d'équilibre pour lequel les température des deux corps s'égalisent . Si l'un est un thermomètre, on a ainsi pour déterminé la température de l'autre corps. Les température des corps n'étant pas égales, un flux de chaleur apparait qui persiste jusqu' au moment où le système attient l'équilibre thermique[3].

I.2 Le Phénomène de conduction thermique :

I.2.1 Définition:

La conduction est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel (solide, liquide, gaz),sans mouvement de matière, et qui fait passer la chaleur des zones chaudes aux zones froides à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations atomique ou moléculaires, diffusion électronique,…) . La conduction est le seul mécanisme qui permet à la chaleur d'être transmise dans un solide [3].

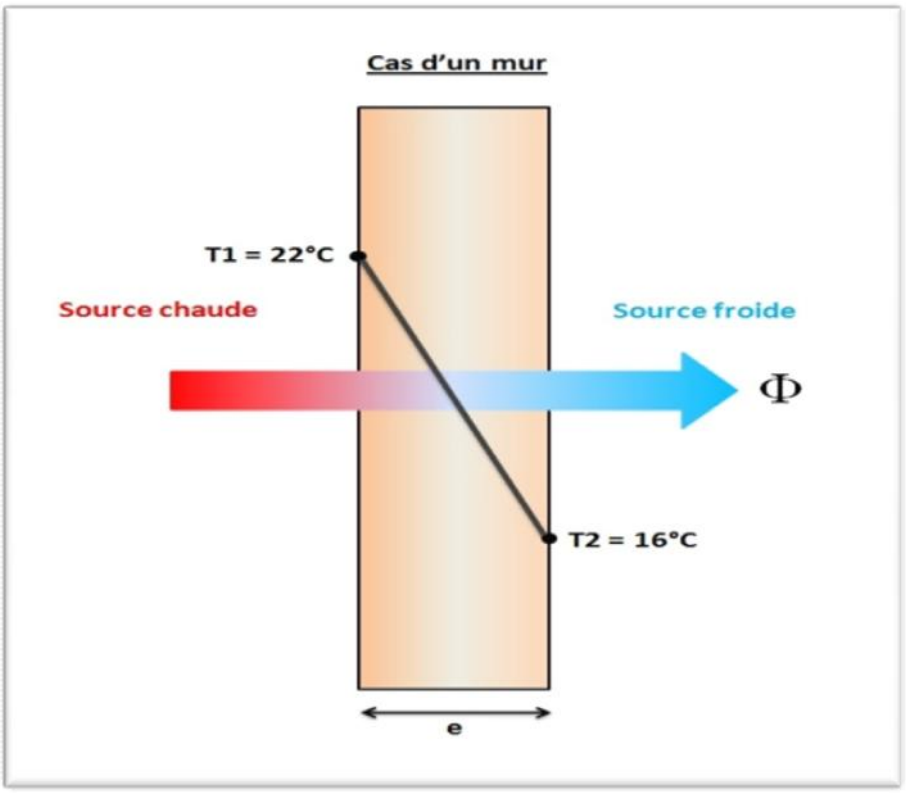


Fig.I.01:*Conduction de chaleur à travers une paroi[3].*

I.2.2 Loi de fourier :

Le coefficient de proportionnel k représente la conductivité thermique du matériau.

En limitant le cas ou $\Delta x \rightarrow 0$, l'équation ci-dessus se réduit à la forme différentielle suivante:

La loi énoncée par Fourier s'écrit :

$$Q = - k A (dt/dx) \quad \text{.....(I.02).}$$

Qui est appelé la loi de Fourier de conduction thermique. Le terme dT/dx est appelé le gradient de température, ce qui est la pente de la courbe de température (la vitesse de variation de la température T par la longueur x) [4].

Dont:

Q: quantité de chaleur échangée (KW).

A: Surface d'échange de chaleur (m^2).

dT/dx :gradient de température (pour la longueur x).

K :Le coefficient de proportionnalité (kw/m.k).

I.2.3 Exemple de conduction thermique

Un échangeur de chaleur à contre-courant, à double tube et à paroi mince est utilisée pour refroidir l'huile de 150 à 40°C à un débit 4Kg/s par l'eau (qui entre à 22 °C à une vitesse de 2Kg /s afin de sortir à 80 °C.

Fig.1.2 *Exemple de conduction thermique[5].*

La chaleur fournit par huile chaude est transférée vers la paroi du tube intérieur puis vers l'eau (le principe est représenté dans la figuer1)[5].

I.3 Le Phénomène de convection thermique

I.3.1 Définition :

Jusqu'à maintenant nous avons considéré les échanges convectifs seulement comme une condition aux limites pour traiter les problème de conduction de la chaleur **.** Le terme«convection » est utilisé pour décrire le transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide en mouvement par rapport à cette surface. Pour ce transfert, le transport d'énergie par conduction a toujours lieu, néanmoins le monde dominant est celui du aux mouvement de particules fluides[3].

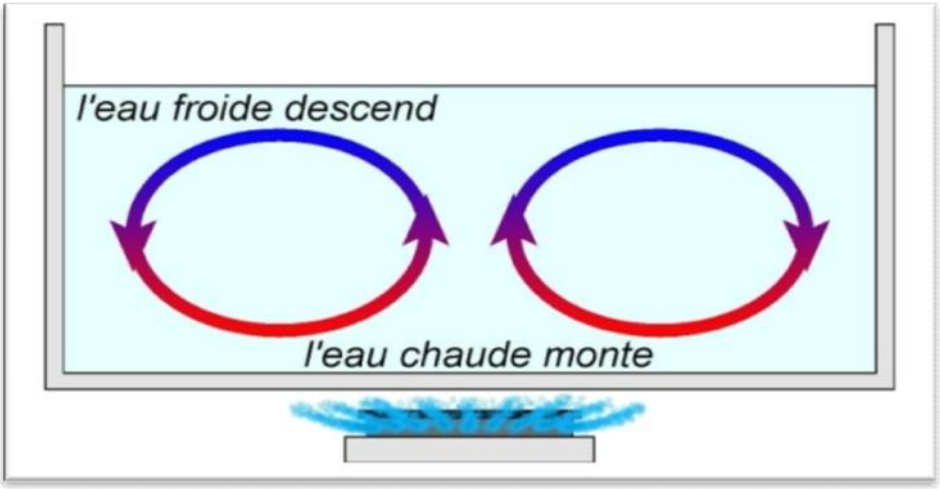


Fig.I.03: *Phénomène de convection thermique[3].*

I.3.2 loi de Newton:

La convection est un processus physique de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel avec mouvement de matière . On ne peut donc avoir de convection que température T1 et un fluide à température T2 (température loin de la paroi), peut s'écrire la forme[4]:

C'est la loi fondamental de la convection thermique donnée par la loi de Newton :

$$Q=h\,A\,(T_1- T_2))\ldots\ldots\ldots

I.4. Le Phénomène de rayonnement thermique :

I.4.1. Définition :

Tous les corps, quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur [2].

Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différents longueurs d'onde.

Un corps C émettent des photons dans toutes les directions possibles, certaines d'entre eux sont reçus par l'autre corps C' et éventuellement absorbés, en tout ou partie. Bien entendu, le corps C' émet aussi des photons dont certains seront reçus et absorbés par C. le bilan net se traduit par un échange d'énergie entre Cet C' [6] .

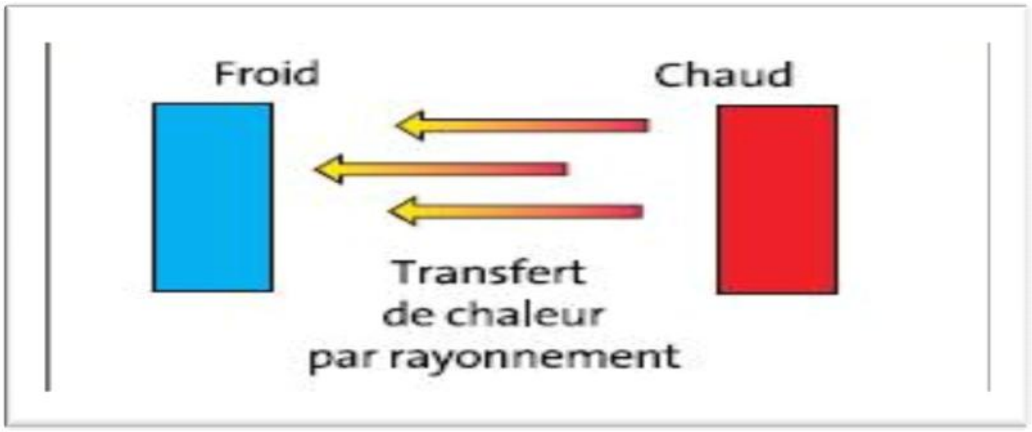


Fig.I.04: *Phénomène de rayonnement thermique[6] .*

1.4.2. loi de Boltzmann :

Le taux auquel un objet émet de l'énergie de est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température absolue, ceci est connu comme la loi de Stefan et est exprimé [7] .

$$P = \sigma A e T \quad \text{.....(I.04).}$$

Ou :

P : est la puissance en watts

A : est la surface de l'objet en mètres carrés.

e : est l'émissivité de l'objet qui dépend de la nature de l'objet.

T : est la température en Kelvins.

σ : est une constant appelée constant de Stefan-Boltzmann .

I.4.3. Exemple de rayonnement thermique :

Le cas de l'énergie qui nous vient du soleil, il n y a aucun contact physique entre la terre et le soleil ni de matière alors il n y'a pas de conduction ou de convection. Le soleil transportent. Le soleil émet des particules désignées par "photo"; ceux-ci se déplacent à la vitesse de la lumière et transport une énergie fonction de leur "longueur d'onde" comme radiation ce qui provenir de la chaleur sur terre [7].

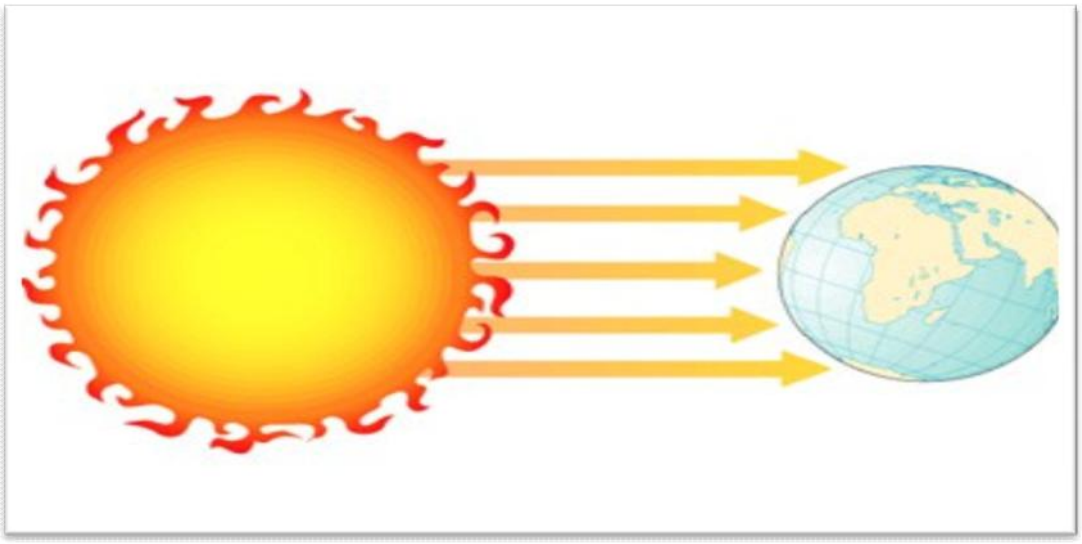


Fig.I.05: *Rayonnement thermique du soleil[7].*

Conclusion :

Le transfert de chaleur décrit l'échange d'énergie thermique entre les systèmes physiques, en fonction de la température, en dissipant la chaleur. Les modes fondamentaux de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement.

La conduction :

Le transfert d'énergie entre les objets qui sont en contact physique. La conductivité thermique est la propriété d'un matériau à conduire la chaleur.

La convection :

Le transfert d'énergie entre un objet et son environnement, en raison de mouvement fluide. La température moyenne, est une référence pour l'évaluation des propriétés relatives au transfert de chaleur par convection.

Le rayonnement :

Le transfert d'énergie à partir du mouvement des particules chargées à l'intérieur des atomes est converti en rayonnement électromagnétique.

II. ECHANGEURS DE CHALEUR :

II.1. Introduction :

L'industrie du raffinage des pétroliers demandent souvent un réchauffage et un refroidissement des fluides traités, avec ou sans changement de phase. On utilise un équipement très important pour le raffinage, les «ECHANGEURS DE CHALEUR».

Afin de choisir un échangeur de chaleur pour une application donnée on doit étudier les paramètres suivants: les propriétés physiques des fluides, leur agressivités, les températures, les pressions de service les contraintes d'encrassement et de maintenance, les considérations économiques[8].

II.2.Définition :

Un échangeur de chaleur est un appareil destiné à réchauffer ou refroidir un fluide au moyen d'un autre fluide circulant à une température différent . ceci se traduit par le passage d'un flux de chaleur du fluide chaud vers le fluide froid.

Le problème le plus complexe c'est l'optimisation de l'échangeur de chaleur ,ce dernier est lié à la dualité du transfert de chaleur et la perte de charge. Le bilan de calcule de tout appareil ce base sur deux études parallèles: transfert de chaleur et parte de charge[8].

II.3. Appareils tubulaires d'échangeur de chaleur

II.3.1. Les fonctions des échangeurs de chaleur:

En dehors des fours et des chaudières présentés par ailleurs, les appareillages utilisés sont des échangeurs de chaleur souvent improprement appelés échangeurs de températures. Ces appareillages peuvent avoir à assurer des fonctions différentes, éventuellement simultanées relativement aux objectifs concernant l'un des fluides ou les deux fluides participant à l'échange. En général, la terminologie utilisée renseigne généralement sur la fonction de l'appareil. Sans prétendre à supprimer toute ambiguïté ni à fournir la liste exhaustive des différents termes utilisés tant en langue française qu'en langue anglaise, une classification par fonction peut être établie[7].

a. Fonction réfrigération:

Les réfrigérants (coolers) refroidissent un liquide ou un gaz par circulation d'un fluide auxiliaire qui peut être un fluide de procédé ou de l'eau. Associés au fonctionnement de compresseurs pour la réfrigération des gaz comprimés, ils sont qualifiés de réfrigérants intermédiaires (intercoolers) et de réfrigérants finals (after coolers) selon les divers étages de compression.

Réfrigérant intermédiaire (intercooler) , final (aftercooler) : ces termes sont plutôt réservés aux réfrigérants de gaz comprimés au divers étages de compression.

Réfrigérant final (trim cooler) : réfrigérant qui termine la réfrigération d'un produit. Souvent, ce terme désigne le réfrigérant à eau qui assure les conditions de sécurité requises pour le stockage des produits ; par extension, il désigne aussi l'association aéroréfrigérant suivi d'un réfrigérant à eau fréquemment utilisés pour cette fonction [7].

b. Fonction réchauffage:

Les réchauffeurs (heaters) réchauffent un fluide de procédé par de la vapeur d'eau ouun autre fluide de procédé; ces termes sont surtout employés dans le cas du réchauffage d'un produit stocké pour en assurer sa pompabilité dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes.

Les préchauffeurs (preheaters) préchauffent un fluide de procédé, la chauffe se pour suivant souvent dans un four en aval. Les réchauffeurs et préchauffeurs d'air sont les échangeurs, cycliques ou non, qui assurent la préchauffe de l'air de combustion d'une chaudière ou d'un four par récupération d'une partie de la chaleur contenue dans les fumées ou dans un autre fluide auxiliaire [7].

c. Fonction condensation:

Les condenseurs (condensers) assurent la condensation totale ou partielle de vapeur par circulation d'eau ou de fluide de procédé suffisamment froid.Les aérocondenseurs assurent cette fonction en utilisant l'air comme fluide froid. Subcooler : il assure simultanément la condensation de vapeur et le refroidissement des condensats généralement par circulation d'eau [7].

d. Fonction vaporisation:

Les vaporiseurs (vaporizers) assurent la vaporisation totale ou partielle d'un liquidede procédé, l'apport de chaleur étant fait part de la vapeur d'eau ou un fluide chaud deprocédé éventuellement en condensation.

Les bouilleurs (boilers), les rebouilleurs (reboilers) vaporisent une partie des produitsde fond de colonnes de distillation pour les renvoyer au fractionnement.

Les évaporateurs (evaporators) concentrent des solutions aqueuses par évaporation, cependant, ils peuvent désigner aussi des vaporiseurs ou chillers.

Générateur de vapeur(Steam generator) : il produit de la vapeur par récupération dechaleur sensible contenue dans les fluides de procédés, des fumées de fours ou des litscatalytiques (Waste heat boiler) ou par combustion de gaz ou de liquides résiduels [7].

II.3.2. Principe de fonctionnement:

Généralement, sauf cas très particuliers d'échange fluide-solide (ou assimilé), les échangeurs permettent un échange de chaleur entre deux fluides en mouvement. Ils sont dits:

- à surface lorsque les deux fluides sont séparés par une paroi.
- à contact direct ou à mélange lorsque les deux fluides sont mélanges [7].

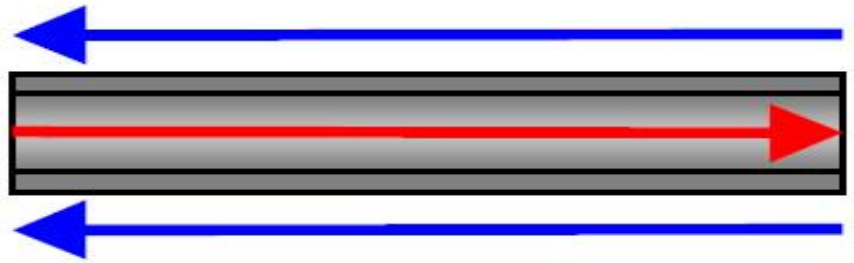


Fig II.01: *Principe de fonctionnement d'un échangeur [8].*

a. Les échangeurs á surface:

L'échange de chaleur entre deux fluides séparés par une paroi est caractérisé localement par:

- Le potentiel thermique local Δθ , différence de température entre les deux fluides.
- L'élément de surface d'échange dA mise en œuvre.
- la résistance au transfert R,qui est la résultant de diverses résistances en série et correspondant au:
  - Transfert par convection entre le fluide chaud et la paroi.
  - Transfert conduction à travers la paroi.
  - Transfert par convection entre la paroi et le fluide froid.
  - Salissement éventuel de chaque côté de la paroi.

En régime permanent la loi de transfert caractérisant l'échange s'exprime sous la forme : Flux = potentiel/résistance, le flux Φ étant le débit de chaleur par unité de surface d'échange.

$$\Phi = \frac{dQ}{dA} = \frac{\Delta^{-}}{R} = U.\Delta^{-} \quad \text{.....(II.01)}$$

U, inverse de la résistance R est le coefficient de transfert global [8].

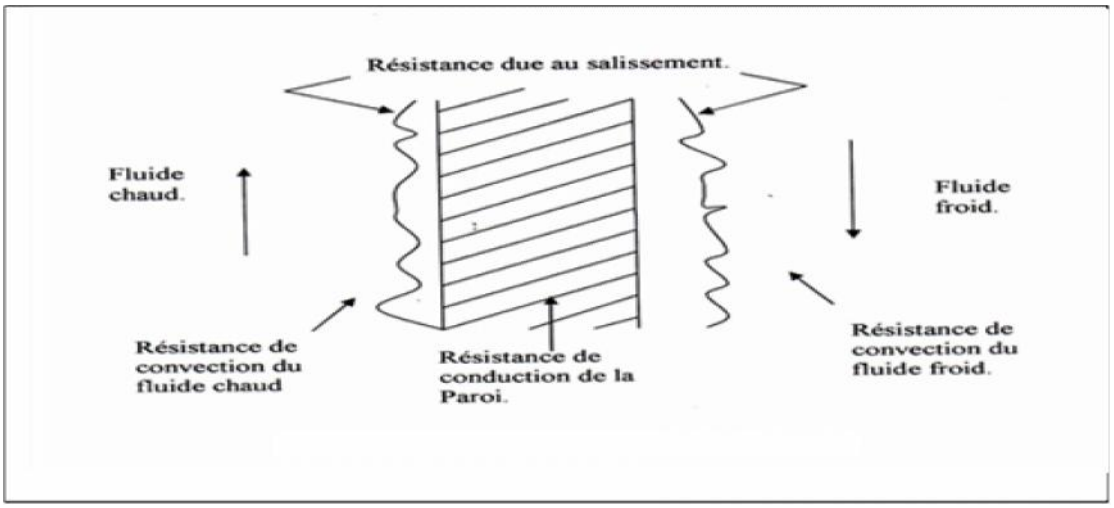


Fig II.02: *Résistance au transfert de chaleur[8].*

b. Les échangeurs á contact direct (ou échangeurs à mélange):

Les deux fluides sans paroi de séparation .Les application dans le domaine du raffinage sont en conséquence limitées.

Le débit de chaleur transféré est conditionné localement par:

- Le potentiel thermique local $\Delta\theta$, différence de température entre les deux phases
- L'élément de volume de contact entre les deux phases dv.
- La résistance au transfert, Résultant de:
  - La résistance due à la phase liquide.
  - La résistance due à la phase gazeuse[7].

c. Les Echangeurs de chaleur à contact indirect:

Dans un échangeur de chaleur à contact indirect, les courants de fluide restent séparés, et les transferts de chaleur continuent à travers une paroi séparatrice imperméable. Ainsi, thermiquement, il y a un contact entre les fluides. Ce type d'échangeur de chaleur, appelé aussi un échangeur de chaleur de surface [8].

II.4. Principe de réalisation technologique et modes de circulation :

La surface d'échange est la circulation des fluides sur chaque côte de la paroi, ceci correspond à différents modes de base :

II.4.1. Circulation à co-courant :

Les deux fluides qui circulent dans l'échangeur sont dans le mémé sens de chaque côté de la paroi

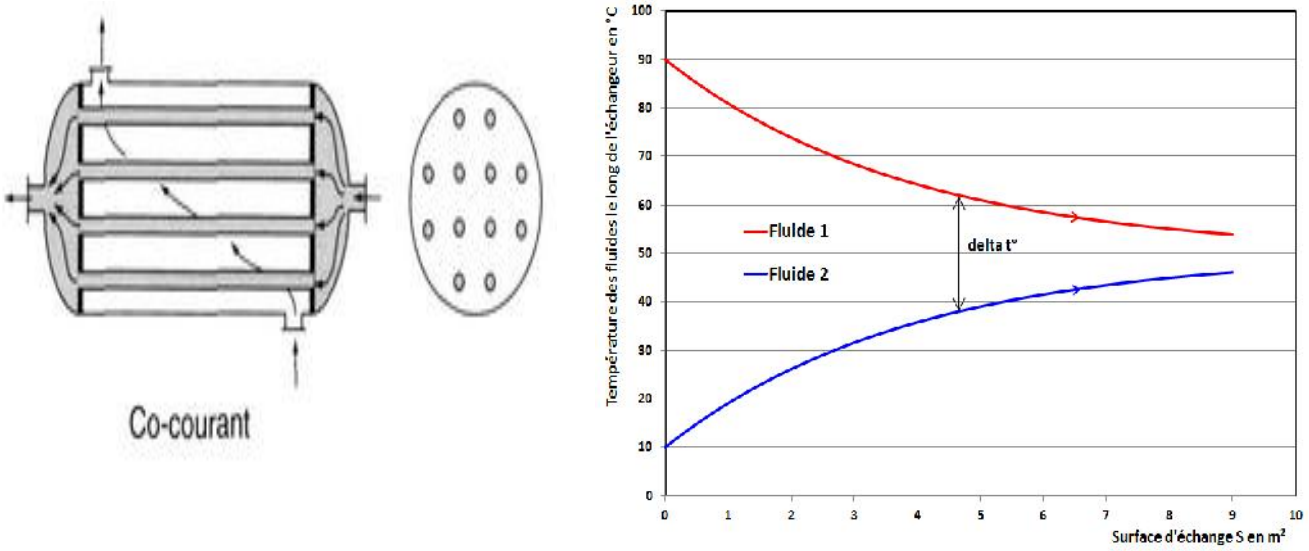


***Fig.II.03**: Circulation à Co-courant[8]*

II.4.2.Circulation à contre-courant :

Les deux fluides circulent en sens opposés dans l'échangeur de la chaleur .

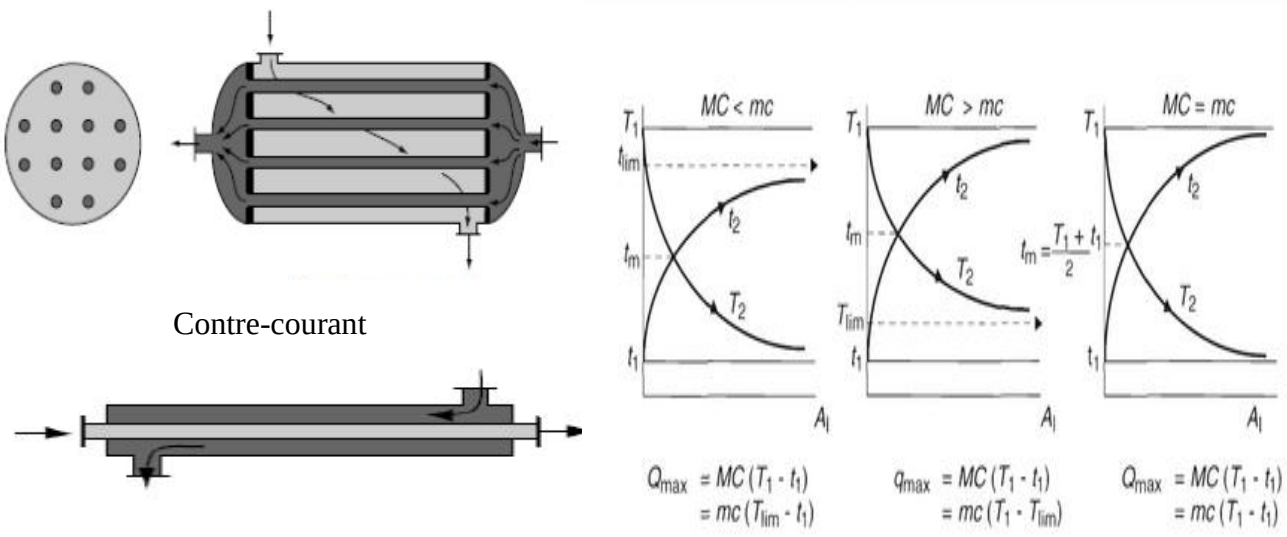


***Fig. II.04.a:** Circulation à contre-courant[10].*

Evolution des températures dans un échangeur tubulaire fonctionnant à contre-courant[10].

qc<qc2 :On dit que le fluide chaud commande le transfert. Si L→ ∞ alors T1s → T2e et T2s ≠ T1e

qc1>qc2 : On dit que le fluide froid commande le transfert. Si L → ∞ alors T2s → T1e et T1s ≠ T2e

II.4.3. Circulation associant Co-courant et contre-courant :

Ce type de circulation est réalisé le plus souvent dans les appareils tubulaires à faisceaux et calandre

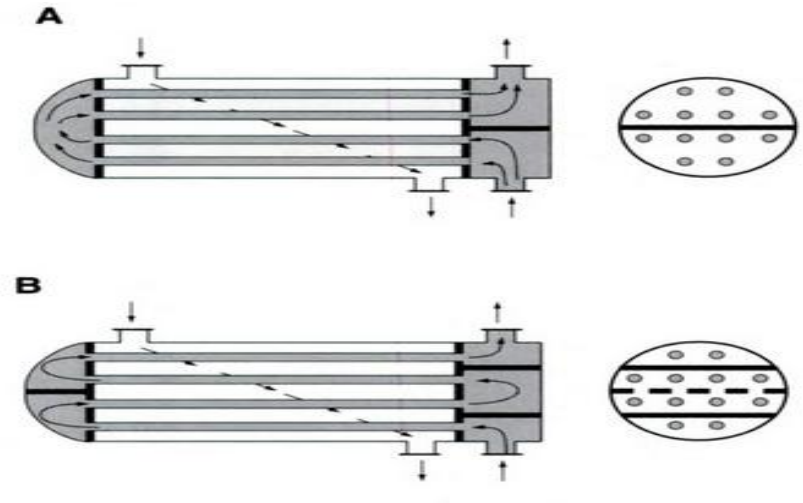
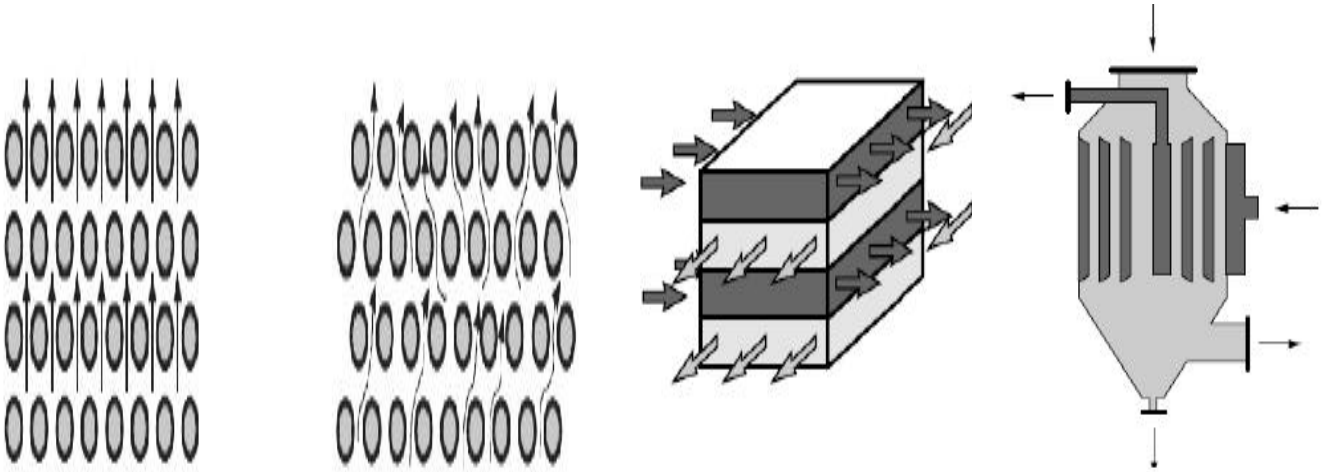


Fig. II.04.b: *Circulation associant Co-courant et contre-courant[8].*

II.4.4. Circulation à courants croisés :

L'écoulement des deux circulant dans l'échangeur de chaleur se fait dans deux directions perpendiculaires.



Faisceau à pas carré. Faisceau à pas triangulaire.

Fig II.05.a: *Courant croisés avec faisceaux tubulaires[9].* ***Fig.II.05.b:****Courant croisés avec appareils plaques[9].*

II.5. Critères de classement des échangeurs :

Les principaux critères de classement des différents types d'échangeurs sont:

II.5.1. Classement technologique :

Les principaux types d'échangeur rencontrés sont les suivants :

- A tubes : Monotubes, coaxiaux ou multibulaires.
- A plaque : A surface primaire ou à surface secondaire.

Autre types : Contact direct ou à lit fluidisé.

II.5.2. Classement suivants le mode de transfert de chaleur :

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des application (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à traverse une paroi, la conduction intervient[8].

II.5.3. Classement suivant le procédé de transfert de chaleur :

On définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de la chaleur suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur :

- Transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou 'n' passages et un écoulement en générale en générale continu.
- Transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique [8].

II.5.4. Classement fonctionnel :

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

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique.
- Un seul fluide a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseur .
- Les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase[9].

II.5.5. Classement suivant la compacité de l'échangeur :

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K.Shah propose qu'un échangeur soit considré comme compact si sa compacité est supérieure à 700 m^2/m^3, cette valeur est susceptible de la varier de 500 à 800 m^2/m^3[10].

II.5.6. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange :

On retiendra deux type de paroi :

- Les échangeur métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériau spéciaux :Superalliages, métaux ou alliages réfractaires.
- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc…

II.6. Les différents types d'échangeurs de chaleur :

II.6.1.Échangeurs tubulaires:

Les échangeur utilisant les tubes comme constituent principal de la paroi d'échange sont les plus répandus, pour des raisons historiques et économiques.

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leurs arrangements toujours réalise pour avoir la meilleur efficacité possible pour une utilisation donnée :

a- Echangeur monotube: Dans lequel le tube est place à l'intérieur d'un serpentin.

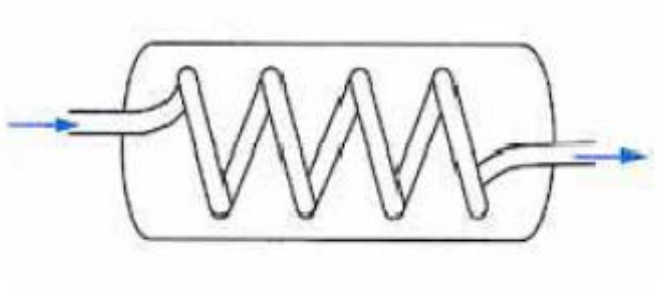


Fig.II.06.a: *Échangeur monotube en serpentin[8].*

b- Echangeur coaxial: Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés. En générale, le fluide chaud ou le fluide à haute pression spécula dans le tube intérieur

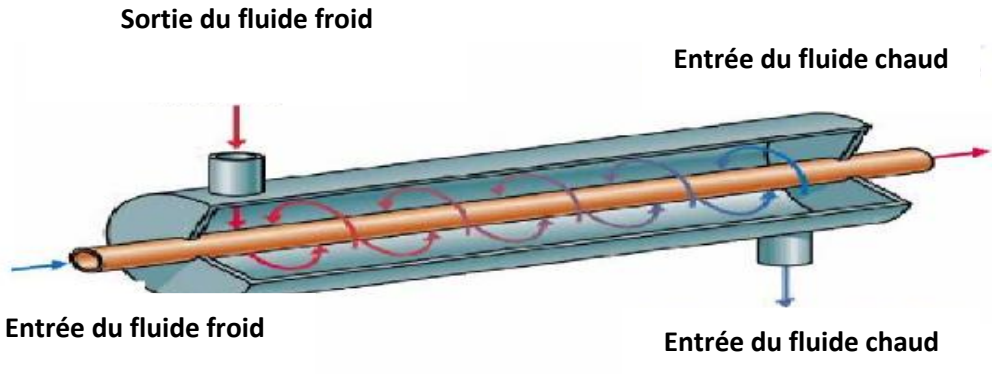


Fig.II.06.b: *Échangeur coaxial[8].*

c- Echangeur multitubulaires: Existant sous quarte formes :

Fig.II.06.c: *Echangeur multitubulaires[8].*

↳ **Echangeur à tube séparé :**À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) setrouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises.

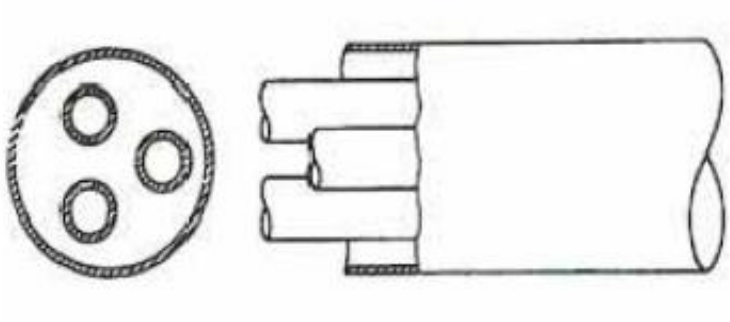


Fig.II.06.d: *Échangeur à tube séparé[8].*

L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

↳ **Échangeur à tubes rapprochés :**Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un rubanenroulé en spiraleautour de certainsd'entre-deux[14]..

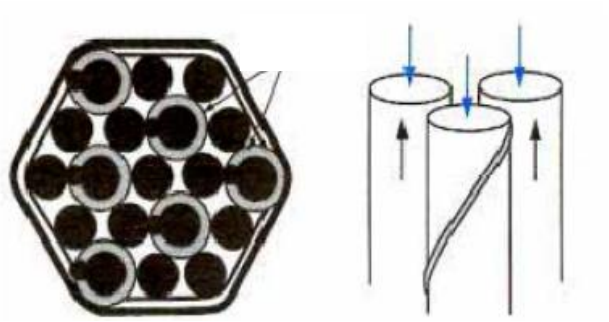


Fig.II.06.e: *Échangeur à tube rapproché[14].*

↳ **Échangeur à tubes ailettes :** Ces tubes permettant d'améliorer le coefficient d'échange**,** différents types d'ailettes sont toutefois présentés si contre[14].

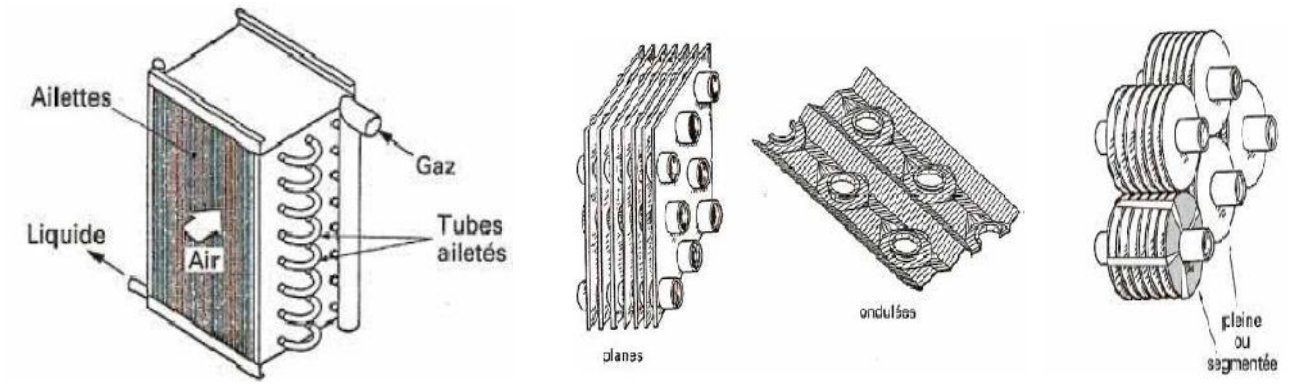


Fig.II.06.f: *Échangeur à tube ailette[14].*

↳ **Échangeur à tubes et calandre :** C'est l'échangeur actuellement le plus répandu.

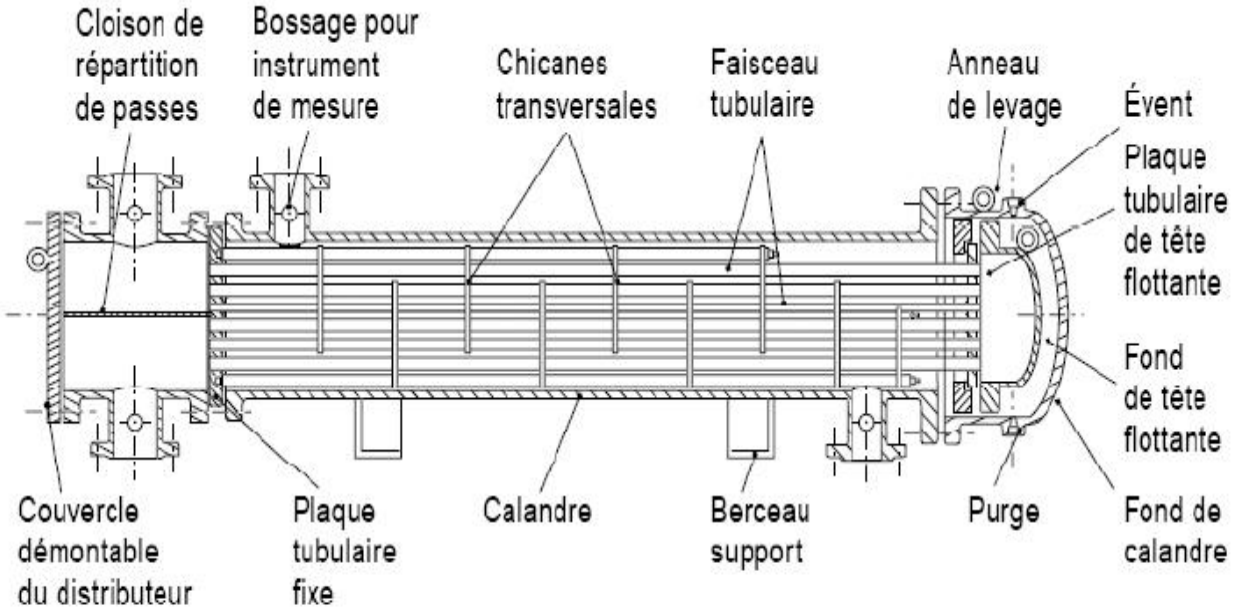


Fig. II.07.a: *Catégories de l'échangeur de chaleur[15].* **.**

II.6.2.Echangeurs double tube:

Un échangeur double tube est constitué par deux tubes concentriques, un fluide (généralement le chaud) circulant dans le tube intérieur, l'autre dans l'espace compris entre les deux tubes[14].

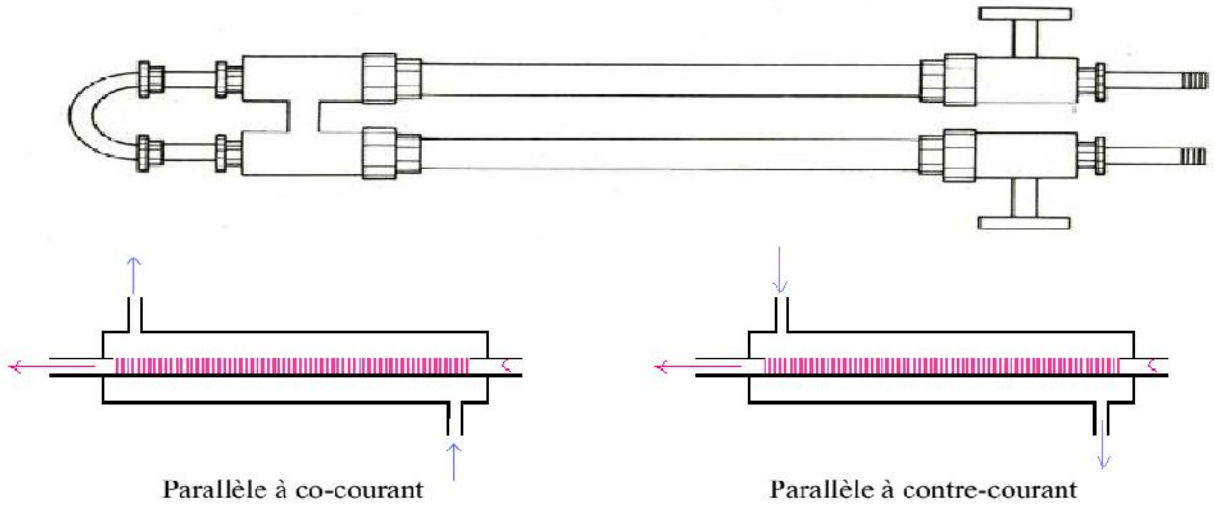
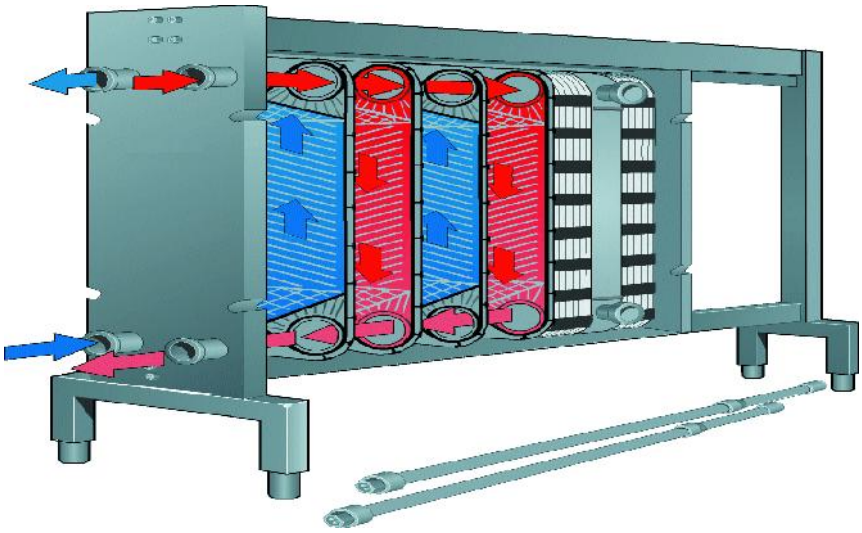


Fig.II.07.b: *Echangeur double tube [14].*

II.6.3.Echangeur à plaques :

Le concept d'échangeurs à plaques date du début du siècle. Ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour réponde au besoin de l'industrie laitière, puis utilisé par la suite dans diverses branches de l'industrie (chimique, nucléaire, etc.).Suivants la géométrie de canal utilisée, on distingue les échangeurs à surface première et les échangeurs à surface secondaire



:

Fig.II.08.a:*Echangeurà plaques [16].*

II.6.3.1Echangeur à surface primaire : ces échangeurs peuvent être :

↳ **Echangeur à plaque et joint** : Ils sont utilisée pour les transfert de chaleur entre fluide monophasique ou double phase, condensation ou vaporisation

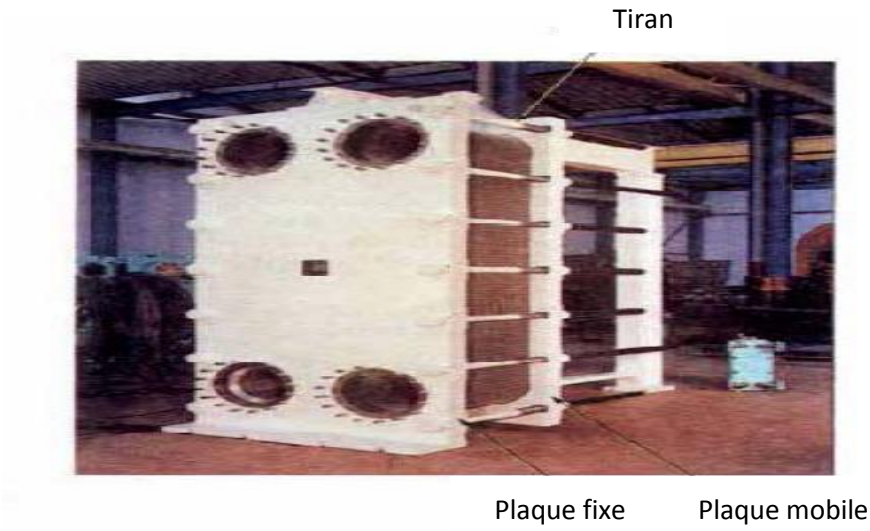


Fig. II.08.b:*Échangeur à plaque et joint[16].*

↳ **Échangeurs à plaque soudéeou brasée :** ils sont utilisée en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agroalimentaire etc. Ces échangeurs peuvent être: échangeurs lamellaires, échangeurs à spirale ou échangeurs brasé

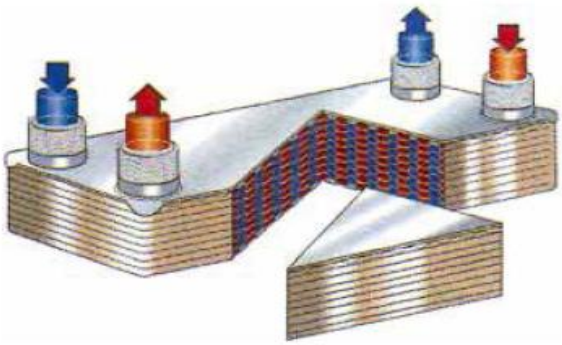


Fig. II.09:*Échangeur brasée[16].*

II.6.3.2.Echangeur à surface secondaire : Ils sont réalisés en aluminium ou en acier inoxydable. On distingue, suivant le mode de fabrication et les matériaux utilisés : les échangeurs à plaque serties et les échangeurs à plaques brasés.

II.6.4Echangeur avec un fluide changeant de phase :

L'un des deux fluides peut subir un changement de la phase à l'intérieur de l'échangeur. C'est le cas des évaporation si fluide chaud se condenseur de l'état vapeur à l'état liquide.

Les déférant types d'évaporateur et condenseur tubulaires recoupent la classification générale des échangeurs, nous décrivons donc les évaporateurs et condenseurs tubulaires et les évaporateurs et condenseurs à plaques[14].

II.7.L'échangeur à tubes (faisceaux) et calandre :

Un échangeur à tubes et calandre est une classe d'échangeurs de chaleur. Il est le type le plus commun des échangeurs de chaleur dans les raffineries de pétrole et d'autres grands

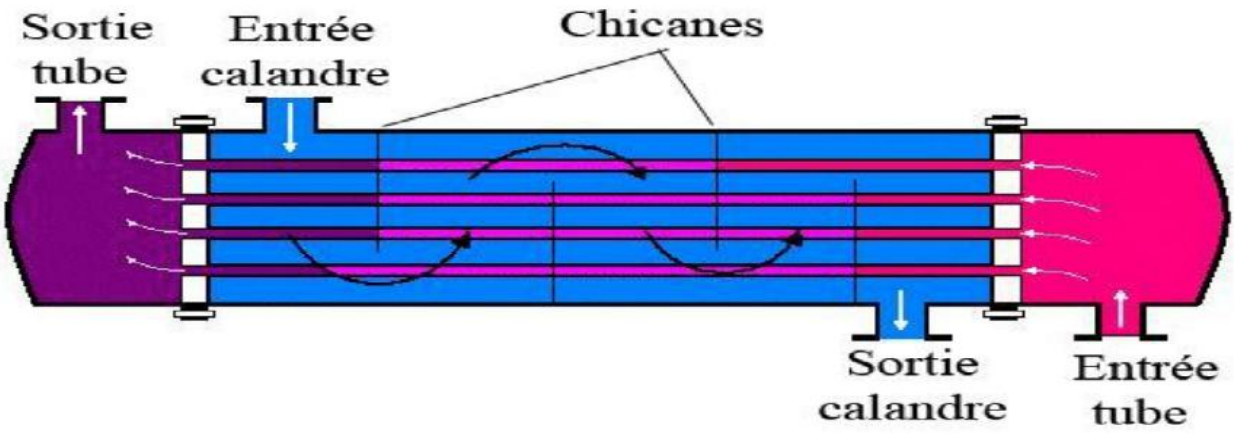


***Fig.II.10.a**:Schéma simplifié d'un échangeur à tube et calandre[14].*

procédés chimiques, il est adapté pour les applications à haute pression. Comme son nom l'indique, ce type d'échangeur de chaleur est constitué d'une calandre (un grand récipient sous pression) avec un faisceau de tubes à l'intérieur. Un fluide circule dans les tubes, et un autre fluide circule sur les tubes (à travers la calandre) pour transférer la chaleur entre les deux fluides. L'ensemble des tubes est appelé un faisceau tubulaire, et peut être composé de plusieurs types de tubes: plaine, longitudinalement à ailettes, etc…[14].

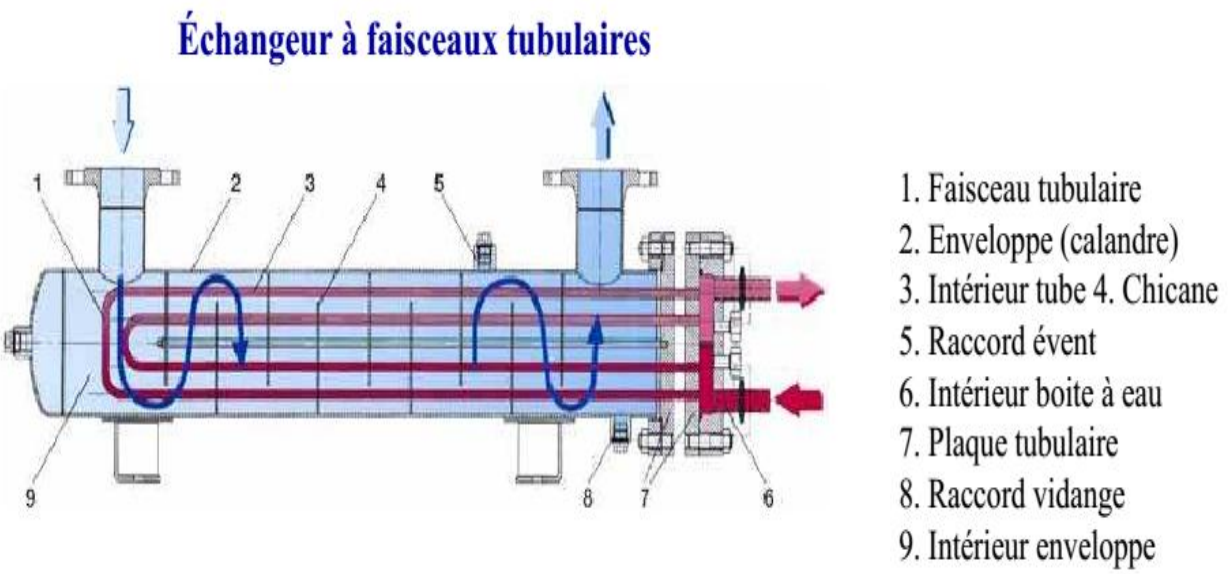


Fig.II.10.b: *Schéma simplifié d'un échangeur à faisceaux et calandre[12].*

a. Les échangeurs tubulaires sont constitués :

- ✓ d'un faisceau tubulaire
- ✓ d'une calandre
- ✓ de boites de distribution et de retour

Le faisceau tubulaire est composé de deux à plusieurs centaines de tubes soudés ou dudgeonnés à leur extrémité sur une plaque[6].

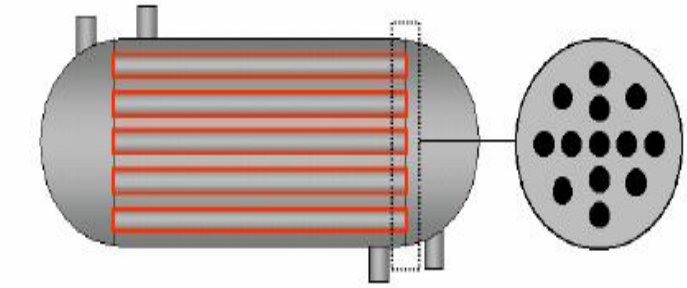


Fig II.11: *Faisceau tubulaire[6].*

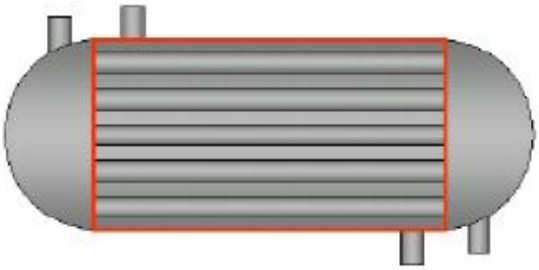


Fig II.12: *la calandre [6].*

La calandre est un tube cylindrique de gros diamètre dans laquelle est placé le faisceau tubulaire. Les boites de distribution et de retour sont fixées aux extrémités et servent de collecteur pour le fluide circulant dans les tubes.

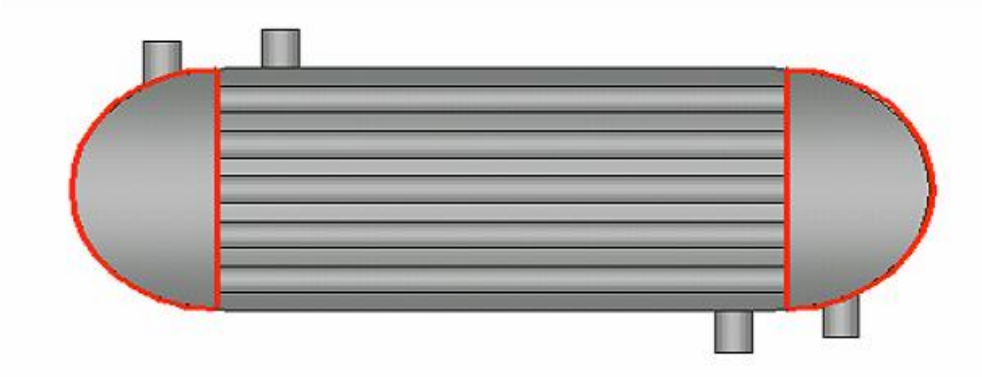


Fig II.13: *Les calottes [6].*

II.7.1. Classification et différents types des échangeurs à tubes et calandre

Il y a beaucoup de critères pour choisir un échangeur à tubes et calandre. Fondamentalement, sa fonction peut être pour une seule phase (tel que le refroidissement ou le chauffage d'un liquide ou gaz) ou pour deux phases (tels que la vaporisation ou la condensation). Puisque il y a deux côtés à un échangeur à tubes et calandre, cela peut conduire à plusieurs combinaisons de services [9].

Les services peuvent être classés comme suit:

- Monophasé.
- Condensation.
- La vaporisation.
- Condensation / vaporisation (condensation d'un côté et vaporisation dans l'autre côté).

Fig.II.14.a: *Faisceau tubulaire d'un échangeur à tube et calandre[16].*

II.7.2 Les tubes

Ce sont généralement des tubes normalisés dont le diamètre annoncé correspond exactement au diamètre extérieur(à la différence des tubes utilisés en tuyauterie).Ces tubes sont généralement de longueur standard:2.44-3.05-4.88-ou6.10m

Le démontage du faisceau de tubes est de plus en plus difficile au fur et à mesure que sa longueur s'accroît (problème de rigidité du faisceau). Pour tous les condenseurs démontables, il convient de laisser un espace libre suffisant dans l'axe du condenseur pour permettre la sortie du faisceau de tubes.

Les matériaux utilisés dépendent des fluides choisis ; les plus courants sont les aciers ordinaires, les aciers inoxydables, le cuivre, le laiton, les cupronickels.

Fig.II.14.b: *Les tubes[15].*

II.7.3 La disposition des tubes

Il y a quatre disposition des tubes, comme indiqué dans la figure: triangulaire (30 °), tourné triangulaire (60 °), carré (90 °), et faire tourner carré (45 °). Une triangulaire (ou triangulaire rotation) modèle pourra accueillir plusieurs tubes d'un motif carré (ou place tournée).

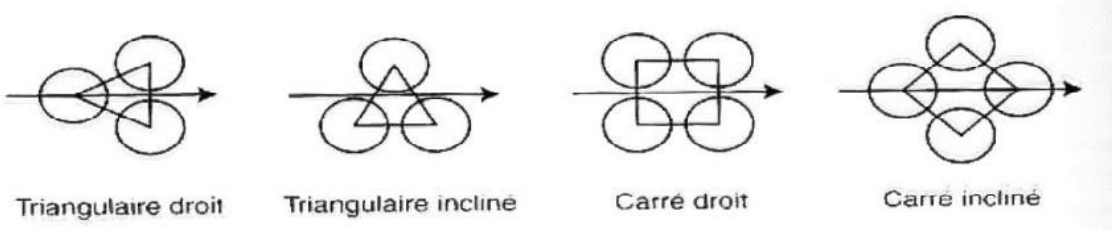


Fig.II.15:*dispositions des tubes[15].*

II.7.4 Les chicanes

Les rôles principaux d'une chicane dans un échangeur de chaleur à tubes et calandre sont les suivants:

- Tenez les tubes en position, à la fois dans la production et l'exploitation.
- Prévenir les effets des vibrations, qui sont augmentées par la vitesse du fluide et la longueur de l'échangeur.

La mise en œuvre des chicanes est décidée sur la base de la taille, le coût et leur capacité à apporter un soutien aux faisceaux de tubes.

Les chicanes sont de mémé matériau que la calandre. Elle peuvent être plusieurs types : chicanes classique ou chicanes à barreaux ,dont le développement et l'utilisation sont relativement récents

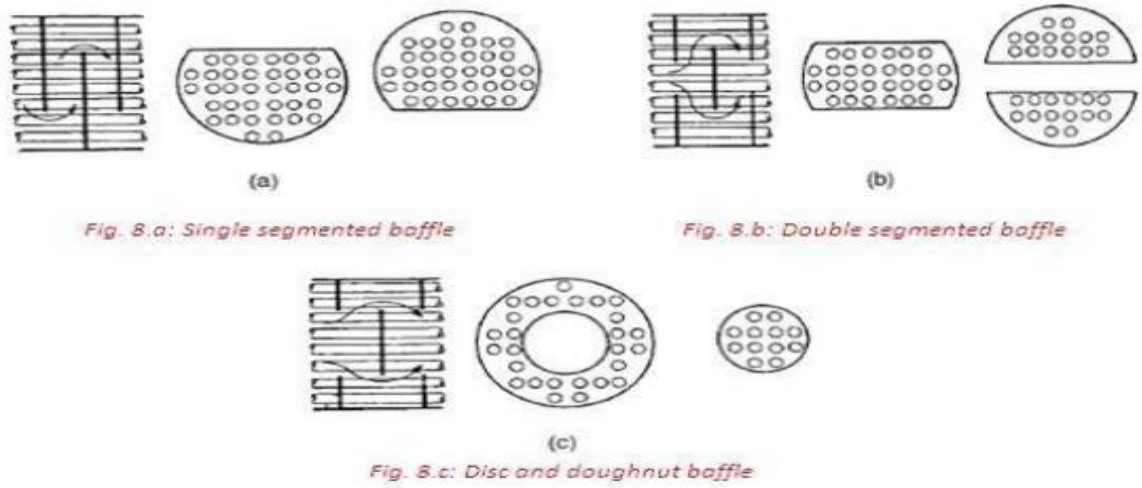


Fig.II.16.a: *Différents types de chicanes[15].*

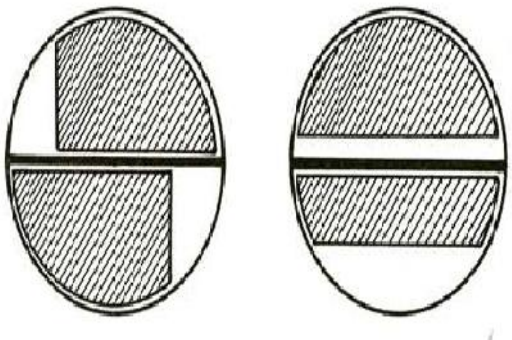


Fig.II.16.b: *chicane[15].*

II.7.5 La calandre:

C'est l'enveloppe métallique cylindrique entourant le faisceau tubulaire. Son matériau doit être compatible avec le fluide utilisé. Les matériaux les plus courants sont les plus courants sont les aciers ordinaires, les aciers inoxydables, le cuivre ou les matières plastique. Il semble que la limite technologique des calandre se trouve aux alentours d'un diamètre de deux mètres. Certains très gros condenseurs sous vide sont réalisés avec une calandre parallélépipédique(solution d'ailleurs favorable pour limiter les pertes de pression en entrée)[12].

Fig.II.16.c: *La calandre[16].*

II.7.6 Organisation de la circulation côte tubes/côte calandre:

Il est des cas particuliers pour lesquels la circulation s'impose : dans un kettle le fluide à vaporiser est côté calandre; il en est de même pour le fluide à condenser dans un condenseur à eau horizontal. Sinon, le côté tubes est de préférence affecté au :

- fluide sous la plus haute pression : un tube résiste mieux à la pression intérieur qu'à la pression extérieur; une plus grande épaisseur de paroi ne s'applique qu'aux chambres de distribution et de retour de dimensions plus modestes que celle de la calandre.
- fluide à température élevée: à plus haute température le taux de travail admissible pour le matériau diminue, nécessitant une plus grande épaisseur; cela peut conduire à prendre un acier pour lequel la contrainte admissible est supérieur; par ailleurs les pertes thermiques sont limitées.
- fluide corrosif : le coût des matériaux à mettre en œuvre ne se répercute pas côté calandre.

➢ fluide salissant : le nettoyage mécanique de l'intérieur des tubes est plus facile que celui du faisceau côté calandre.

➢ fluide entraînant dépôts et sédiments : entraînement et le nettoyage sont plus faciles **.**Le côté calandre est généralement réservé au:

➢ fluide visqueux pour lequel il est plus facile de régler la vitesse de circulation, donc transfert et perte de charge, en jouant sur le type et le nombre de chicanes transversales.

➢ fluide de plus haut débit pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment[7]. Par ailleurs, il faut prendre en compte d'éventuels impératifs de sécurité face aux risques de ruptures et aux risques de fuites (dont le sens doit être apprécié selon les niveaux de pression) dans le cas de fluide inflammable, toxique, polluant pour l'environnement ou l'autre fluide, ou encore susceptible de réaction chimique avec l'autre fluide. Dans certains cas, il y a une compétition entre les fluides ; par exemple, lorsque du gaz naturel sous haute pression est refroidi par de l'eau de mer, les deux fluides sont justiciables du côté tubes, ce qui amène, sauf choix du titane très onéreux, à utiliser un circuit intermédiaire d'eau de réfrigération traitée pour échapper à la problématique [7].

II.7.7 Arrangement des échangeurs:

a. En série sur les deux fluides: Les échangeurs peuvent être mis en série sur les deux fluides en organisant une circulation à contre-courant d'ensemble, le fluide froid entrant du côté de la sortie du fluide chaud. Si chacun des appareils de la série est lui-même un échangeur à contre-courant, il est évident que l'ensemble de l'arrangement est régi par la loi de transfert caractéristique de la circulation à contre-courant. C'est une solution qui s'impose en particulier lorsque le débit de chaleur à échanger et la qualité du transfert amènent à définir des surface d'échange d'une importance telle que la taille unitaire des échangeurs à mettre en place est trop grande pour être techniquement réalisée où pose des problèmes d'implantation, d'installation et de maintenance.

L'argument reste par ailleurs valable pour échangeurs qui ne sont pas à contrecourant avec l'avantage pour l'arrangement d'échapper aux limites de performance inhérentes à chacun des autres modes de circulation pour l'échangeur unitaire. Les performances obtenues comparées font apparaître l'intérêt de multiplier le nombre d'échangeurs de la série [7].

b. En parallèle sur les deux fluides: Les pertes de charge admissible ou économique pour l'un ou l'autre des deux fluides représentent un facteur limitant à prendre en compte dans la conception d'une série. Les dispositions en parallèle permettent de réduire les débits par ranche et de respecter les contraintes.

Elles peuvent également s'imposer dans le cas de débits importants sans pour autant qu'une série soit nécessaire.

Le choix du nombre d'échangeurs en série et des branches en parallèle prend également en compte les limites de taille des appareils unitaires [7].

II.8.Notion fondamental mécanique de fluide et perte de charge

II.8.1. Importance de perte de charge:

Lors de l'écoulement des fluides réels, il apparaît des frottements entre les particules de fluide et entre fluide et paroi. Ces frottements ont pour origine la vitesse et la viscosité du fluide. Partant de la paroi d'une conduite par exemple, le frottement entre les particules en mouvement et les aspérités de la surface interne du tube génère des forces de frottement retardatrices qui s'opposent à l'avancement du fluide.

La perte d'énergie correspondante est dissipée sous forme de chaleur est appelée perte de charge. Les pertes de charge dépendent essentiellement :

- la nature du fluide véhiculé et plus spécialement de sa viscosité.
- caractéristiques des appareillages dans lesquels s'effectuent l'écoulement : section de passage, état de surface, encrassement, "accidents" de tuyauterie (vanne, robinet, filtre, clapet, orifice, etc.), longueur d'écoulement.
- conditions de l'écoulement et notamment de la vitesse moyenne de circulation du fluide. En pratique, et en première approximation, les pertes de charge se manifestent le plus souvent par une chute de pression le long de l'écoulement mais il faut prendre garde au fait qu'une baisse de pression n'est pas toujours une perte de charge [11].

II.8.3. Caractéristiques physiques de fluide

- **La masse volumique:** La masse volumique d'un produit est la masse de l'unité de volume de ce produit. Elle est noté ρ (Rhô).

masse volumique $° = \frac{m}{¬}$ ……..……...……..(II.02)

L'unité SI de masse volumique est le kg/m3 mais dans la pratique on utilise aussi d'autres unités : kg/l ou kg/dm3, g/cm3, g/l.

- **La densité:**

Elle est définie par rapport à l'eau. La densité d'un corps solide ou liquide est le rapport de la masse volumique du corps à la masse volumique de l'eau.

Densité d'un corps solide ou liquide = $\frac{\text{masse volumique d'un corps à température donnée}}{\text{masse volumique}}$ ……..(II.03).

En pratique la masse volumique de l'eau est prise à la température de 4°C.

- **Le Débit:**

Dans les tuyauteries et capacités (colonnes, ballons, réacteurs, fours, etc ...) d'une unité de fabrication en fonctionnement, des fluides (gaz ou liquides seuls ou en mélange) circulent souvent en continu.

La quantité de produit qui passe en un point d'une tuyauterie pendant un temps donné est appelée Débit.

Qm(kg/h) = masse volumique (kg/m^3) × débit volume Qv(m^3/h)……..…....(II.04)

↳ le débit massique qui s'exprime le plus souvent : en tonnes par heure t /h, tonnes par jour t/j ou kilogrammes par seconde kg/s (Unité system SI).

↳ le débit volumique qui s'exprime le plus souvent : en mètres cube par heure m3/h, mètres cube par jour m3/j, mètres cube par seconde m3/s (Unité system SI) [12].

- **La viscosité:**

La viscosité est généralement définie comme caractérisant la résistance à l'écoulement d'un fluide.

Elle intervient dans tous les phénomènes liés à l'écoulement des fluides :

*****pertes de charge dans les tuyauteries.

*****écoulement dans les vannes, les soupapes et tous les types de restrictions.

*****pompage.

* filtration.

* décantation.

La viscosité est d'autant plus grande que la résistance à l'écoulement est élevée et, en raison des différentes méthodes de mesure utilisées pour la déterminer, on distingue deux types de viscosité : la viscosité dynamique et la viscosité cinématique [13].

- **La viscosité dynamique:**

La viscosité dynamique µ (Mû), appelée encore viscosité absolue, traduit les interactions moléculaires au sein du fluide en mouvement. Traditionnellement, la viscosité dynamique était exprimée en poises (P) ou en centipoise (cP). Elle est maintenant mesurée dans le système international d'unités en pascal x seconde (Pa.s). En pratique, la correspondance entre les 2 systèmes d'unités est simple puisque le centipoise correspond exactement au millipascal seconde (mPa.s). 1 cP = 1 mPa.s = 0,001 Pa.s

- **La viscosité cinématique:**

La viscosité cinématique υ (Nû), d'utilisation courante pour les liquides, prend en compte la masse volumique du fluide à la même température. Cette dernière intervient chaque fois que l'on détermine une viscosité en mesurant un temps d'écoulement sous charge, c'est-à-dire le temps mis par un liquide pour s'écouler à travers un orifice sous l'action de son propre poids. On conçoit en effet que le temps obtenu dépend non seulement de la viscosité propre du liquide mais aussi de sa densité. La viscosité cinématique est obtenue à partir de la viscosité dynamique par la formule :

viscosité cinématique $\neg = \frac{«}{°}$ .....(II.05)

Habituellement exprimée en stokes (St) et en centistokes (cSt), la viscosité cinématique dans le système SI doit être mesurée en mètres carré par seconde (m2/s). La correspondance avec les unités habituelles est la suivante [13]:

1 St = 10–4 m2/s.

1cSt = 0,01 St = 10–6 m2/s = 1 mm2/s.

1 cSt = 1 mm2/s.

II.8.4. Modes des pertes de charge:

•**Pertes de charge singulières:** Quand la conduite subit de brusque variation de section ou de ,direction, il se produit des pertes de charges dites singulières, elles sont généralement mesurable et font partie des caractéristiques de l'installation[14].

•**Pertes de charge linéaires:** Les pertes de charges linéaires, sont des pertes de charge réparties, régulièrement le long des conduites [14].

II.9. Etude des pertes de charge dans les échangeurs de chaleur:

Les deux fluides qui traversent l'appareil s'écoulent sous l'effet d'un potentiel mesuré par la différentielle de pression entre l'entré et la sortie et que l'on appelle la perte de charge. La valeur de cette perte de charge est fonction de la vitesse de circulation des fluides et de leur caractéristique physique : densité et viscosité, ainsi que de la géométrique de l'appareil [15].

II.9.1. Calcul des pertes de charge d'un échangeur à faisceau et calendre (méthode de Kern):

Pour le calcul d'un échangeur à faisceaux et calandre, c'est une méthode semi empirique, basé sur un travail expérimental sur des échangeurs commerciaux [15].

Donnes nécessaires pour le calcul :

Tableau-II.01 : *symboles de méthode kern.*

Caractéristiques des fluides		Chaud	Froid
Débit massique	kg/h	M	m
Chaleur massique moyenne	kcal/kg°C	Cp’	Cp
Température d’entrée	°C	T_1	t_1
Température de sortie	°C	T_2	t_2
Conductivité thermique	kcal/h.°C	a′	a
Viscosité cinématique	kg/h.m	«′	«
Densité		d'	d

II.9.1.1. Principe de la méthode: [15]

- Bilan thermique:

$Q = M.Cp'(T_1 - T_2) = m.Cp(t_2 - t_1)$……..…. (II.05)

- Calcul de la température moyenne logarithmique ΔTLM

$$\Delta TLM = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}} \text{……..……..……...(II.06)}$$

- Calcul de la température moyenne corrigée:

$\Delta TLM_{corrigée} = \Delta TLM.\ F$ ……..……..…..(II.07)

Ou : F est déterminée à partir de graphe $F = f(R, E)$ (voir l’annexe n°02).

Avec :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{.....(II.08)}$$

$$E = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad \text{.....(II.09)}$$

↳ Détermination de la température calorique T_C.t_C:

$T_C = T2 + F_C(T1 - T2)$ .....(II.10)

$t_C = t1 + F_C(t2 - t1)$ .....(II.11)

Où $F_c = f(k_c, r)$, $k_c = f(\Delta t, d)$ et $r = \frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2} = \frac{\Delta t_{fr}}{\Delta t_{ch}}$ sont déterminer d'après le graphe (voir l'annexe n°03).

- Calcul de la surface d'échange globale :

$$A = \frac{Q}{U_S . \Delta TLM} \quad \text{.....(II.12)}$$

- Surface d'échange globale :

$a = \pi . de . L$ .....(II.13)

➢ **Faisceau :**

Section par passe :

$$a_t = \frac{N_t}{n_t} \frac{®.d_1^2}{4} \quad \text{.....(II.14)}$$

- Vitesse massique :

$$G_t = \frac{m}{a_t} \quad \text{.....(II.15)}$$

.

- Caractéristique du fluide a Tc et tc :C,d,,λ .

- Nombre de Reynolds :

$$R_e = \frac{d_i G_t}{«} \quad \text{.....(II.16)}$$

- Détermination de$J_h$et f d'après le graphe (voir annexe n°08).

$$\frac{h_i}{\varphi_t} = j_h \frac{\lambda}{d_i}\left(\frac{Cp.\mu}{\lambda}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{.....(II.17)}$$

.

$$\frac{h_{i0}}{\varphi_t} = \left(\frac{h_i}{\varphi_t}\right)\frac{d_i}{d_0} \quad \text{.....(II.18)}$$

➢ **Calandre :**

- Section par calandre :

$$a_{CT} = \sqrt{a}.\frac{D_C}{p}\left(p - d_0\right)B \quad \text{.....(II.19)}$$

- Vitesse massique :

$$G_{CT} = \frac{M}{a_{CT}} \quad \text{.....(II.20)}$$

- Diamètre équivalent :

$$D_e = \frac{4.p^2}{\pi.d_e} - d_e \quad \text{.....(II.21)}$$

- Caractéristiques du fluide àT_C : Cp', d',λ',μ'**:**

$$R_{eCT} = \frac{D_C.G_{CT}}{\mu'} \quad \text{.....(II.22)}$$

- Détermination de $j_h^{'}$ et f ' d'après le graphe :

$$\frac{h_0}{\varphi_C} = j_h^{'}.\frac{\lambda'}{D_C}\left(\frac{Cp'.\mu'}{\lambda'}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{.....(II.23)}$$

- Le calcul de la température du tube :

$$t_t = T_C - \frac{\frac{h_{i0}}{\varphi_t}}{\frac{h_0}{\varphi_C} + \frac{h_{i0}}{\varphi_t}}\left(T_C - t_C\right) \quad \text{.....(II.24)}$$

- Détermination de μ_t a t_t :

$$\varphi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t}\right)^{0,14} \quad \text{.....(II.25)}$$

$$h_{i0} = \left(\frac{h_{i0}}{¤_t} \right) ¤_t \quad \text{.....(II.26)}$$

- Détermination de « $_t^{'}$ à t_t :

$$¤_C = \left(\frac{«}{«_t^{'}} \right)^{0,14} \quad \text{.....(II.27)}$$

$$h_0 = \left(\frac{h_0}{¤_C} \right) ¤_C \quad \text{.....(II.28)}$$

- Calcul de coefficient de transfert propre :

$$U_P = \frac{h_0 . h_{i0}}{h_0 + h_{i0}} \quad \text{.....(II.29)}$$

- Coefficient de la résistance d'encrassement :

$$R_S = \frac{U_P - U_S}{U_P . U_S} \quad \text{.....(II.30)}$$

- Calcul des pertes de charge au niveau des tubes :

$$\Delta P_t = \frac{n_c . n_t . G_T^2}{1,272.10^{15} . d} \left[\frac{f_t . L}{d_i . ¤_t} + 2 \right] \quad \text{.....(II.31)}$$

Calcul des pertes de charge côte calandre:

$$\Delta P_C = \frac{n_C . f_{CT} . G_{CT}^2 (N_C + 1) . D_C}{1,271.10^{15} . d' D_C . ¤_C} \quad \text{.....(II.32)}$$

Conclusion :

Vu l'importance industrielles des échangeurs de chaleur, il existe une diversité des différents types des échangeurs de chaleur qui ont de nombreuse applications dans les différentes domaines.

On s'intéresse dans cette étude aux échangeurs à tubes et calandre qui sont très utilisés dans le domaine raffinage [16].

III. Phénomène d'encrassement :

III.1-Introduction:

L'utilisation industrielle des échangeurs de chaleur ne pose pas de problèmes particuliers dans le cas où les parois des surfaces d'échanges restent propos pendent toute la durée du fonctionnement de l'appareil. Mais dans de nombreuses application , il n'en est pas ainsi la circulation de l'un des fluides est souvent accompagnée de la formation des dépôts l'épaisseur de ce dernier croit avec le temps.

La présence de ces dépôts réduit le flux thermique et empêche de réalise entièrement l'opération désirée.il est donc indispensable de procéder à un nettoyage périodique d'un tel échangeur.

L'encrassement reste l'un des phénomène les moins compris de l'industrie. La hausse important du cout de l'énergie et des métiers premiers durant ces derniers années et le besoin pour les l'industries de devenir plus compétitives, ont rendu nécessaire une approche plus approfondie de ces mécanismes[17].

III .2- Définition :

L'encrassement est un phénomène qui se produit avec ou sans gradient de température dans un grand nombre de processus naturels, domestique et industriels .

Quelque exemples sont l'obstruction des vaisseaux sanguins par le cholestérol, la catalyse de l'hydrogène, les fluides dans les conduites des échangeurs de chaleur .

L'encrassement dans sa forme la plus générale, peut étre défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une surface, affect une grande variété d'opérations industrielles. Dans le cas des échangeurs, la présence d'un fort gradient thermique près de la surface peut perturber les mécanismes d'encrassement isotherme rencontrés, par exemple, lors de l'utilisation de membrane ou de filtre.

Le dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué des cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces élément[17].

III.3.L'encrassement des Échangeurs de chaleur:

L'accumulation des dépôts indésirables sur les surfaces des échangeurs de chaleur est habituellement appelée l'encrassement. Ces dépôts engendrent une résistance au transfert de chaleur et réduit donc l'efficacité de l'échangeur de chaleur. L'encrassement peut être, une matière cristalline, des produits de réactions chimiques y compris la corrosion, ou de particules. La nature du dépôt dépend du fluide (liquide ou gaz) passant à travers l'échangeur de chaleur. Il peut être la masse de fluide lui-même qui provoque le problème de la formation

de dépôts, par exemple, la décomposition d'un liquide organique, dans les conditions de température dans l'échangeur de chaleur. Le problème d'encrassement est produit par une certaine forme de contaminant dans le fluide, souvent à très faible concentration, par exemple, des particules solides ou des micro-organismes [12].

III.4.L'effet de l'encrassement dans l'industrie pétrolière:

Augmente la surface d'échange de chaleur - réduit l'efficacité thermique, diminue le flux de chaleur, augmente la température sur le côté chaud, diminue la température sur le côté froid, induit la corrosion, augmente l'utilisation de l'eau de refroidissement; réduit le débit, augmente la chute de pression, augmente la pression en amont, augmente la dépense d'énergie, peut entraîner des oscillations dans l'écoulement bi phasique, cavitation; peut augmenter la vitesse d'écoulement, peut induire des vibrations, peut provoquer le blocage du flux [13].

Fig.III.1: *l'encrassement de échangeur[17].*

III.5.Classification des différents types d'encrassement :

Six différentes formes d'encrassement peuvent se produire dans les applications industrielles, qui comprennent[14]:

III.5.1Encrassement particulaire:

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

- L'eau des chaudières contenant des produits de corrosion, celle des tous de refroidissement, des particuliers transportées par l'air et des produits de corrosion (oxydes et hydroxydes de fer).

- Les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de poussières.
- Les fumées industrielles de résidus solides de combustion[17].

III.5.2. Encrassement par corrosion :

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une rection chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement. les produits de la réaction qui se forment et restant sur la surface d'échange créent l'encrassement. Il s'agit là d'un mécanisme de corrosion. Lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion génères**,** en amont l'encrassement correspondant est de type particulaire [17].

III.5.3.Encrassement par entartage :

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc de la composition de l'eau industrielle. Lorsque le sels dissous sont, comme le carbonate de calcium, à solubilité inverse, le liquide devient sursaturé au voisinage de la surface d'échange plus chaud; la cristallisation se produit alors sur la surface et le dépôt est dur et adhérent ; dans le cas contraire d'une cristallisation se produisant au sein même d'un liquide plus chaud que la surface, le dépôt est plus mou et friable. L'encrassement par les sels à solubilité normale existe, mémé s'il est plus rare; il faut signaler le cas des saumures géothermales à forte teneur en silice.

L'entartrage peut se produire dans les échangeurs refroidis à l'eau, dans les unités de dessalement d'eau de mer ou saumâtre, dans les chaudières, dans les échangeurs de l'industrie agroalimentaire, et dans les système géothermique[17].

III.5.4.Encrassement biologique :

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

Les traitements correspondants utilisent des biocides et il est essentiel de maintenir la concentration du produit pendant le temps de réaction. Le biocides le plus utilisé est le chlore qui est toxique pour la plupart des micro-organismes et a une action rapide. Le choix final du traitement à adopter est en générale un compromis entre les problèmes de toxicité, de pollution, du cout et de maintenance.

La tendance à l'encrassement biologique est naturelle puisque les bactéries sont omniprésentes dans l'eau; en outre, les conditions physico-chimiques rencontrées dans les échangeurs sont le plus souvent favorables à son développement [17].

III.5.5. Encrassement par réaction chimique :

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

Les domaines concernés sont essentiellement l'industriel pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds).l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les circuits de chauffage utilisation des fluides organiques[17].

Les paramètres influant sur ce type d'encrassement sont :

- Les température de la surface ;
- La température moyenne du fluide ;
- L'augmentation de ta pression qui provoque la formation des composés *ROO*" ;
- La vitesse du fluide ;
- La composition : à côté du constituant principal, les constituant secondaires mémé à l'état de traces, en particulier, les oléfines, l'oxygène moléculaire et l'air, les composés complexes organométalliques dissous et les produits de corrosion peuvent affecter le dépôts ;
- L'état de surface du métal et dépôts ainsi que la géométrie de l'écoulement qui affecte les distribution de vitesse, de température set de concentration près de la surface[14].

III.5.6.Encrassement par solidification :

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace à l'intérieur des conduites forcées ou de givre) ou du dépôt d'un constituant à haut point délusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide (dépôt d'hydrocarbures paraffinées). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation du givre)[14].

III.6.L'effet économique de l'encrassement:

L'encrassement des surfaces de l'équipement de traitement peut avoir un impact négatif significatif sur l'efficacité opérationnelle de l'unité. Sur la plupart des industries aujourd'hui, un drain économique majeur peut être causé par l'encrassement. Les coûts totaux d'encrassement liés pour les principaux pays industrialisés sont estimés à $ 4,4 milliards annuellement. En suite[14]:

- L'encrassement diminuant le coefficient de transfert thermique, le coût pour obtenir un coefficient de transfert thermique voulu augmente.

- L’encrassement peut provoquer un écart de température supérieur à la normale et ainsi augmenter les consommations énergétiques. Ceci peut aussi engendrer des pannes des équipements (surchauffe des compresseurs).
- Les coûts d’entretien sont plus élevés afin de supprimer les dépôts d’encrassement avec des produits chimiques et des dispositifs antisalissure ou mécanique ou encore le remplacement des équipements corrodés.
- Les coûts de consommation d’eau, d’électricité et de carburant augmentent pour compenser les effets de l’encrassement.
- Des pertes de production liées aux arrêts d’exploitation − planifiés ou non − causés par l’encrassement entraînent une augmentation des coûts d’exploitation.
- L’encrassement apporte aussi un risque environnemental. En effet, dans la référence (T.Casanueva-Robles and Bott 2005), il est montré que, lorsqu’il y a de l’encrassement, pour compenser la perte d’efficacité des échangeurs, la production est activée entrainant ainsi une augmentation de l’émission de dioxyde de carbone. Ainsi, l’existence d’un bio-film microbien d’une épaisseur de 300m dans les condenseurs d’une station thermique au charbon de 550MW peut entrainer une production supplémentaire de 970 kg par heure de dioxyde de carbone[17].

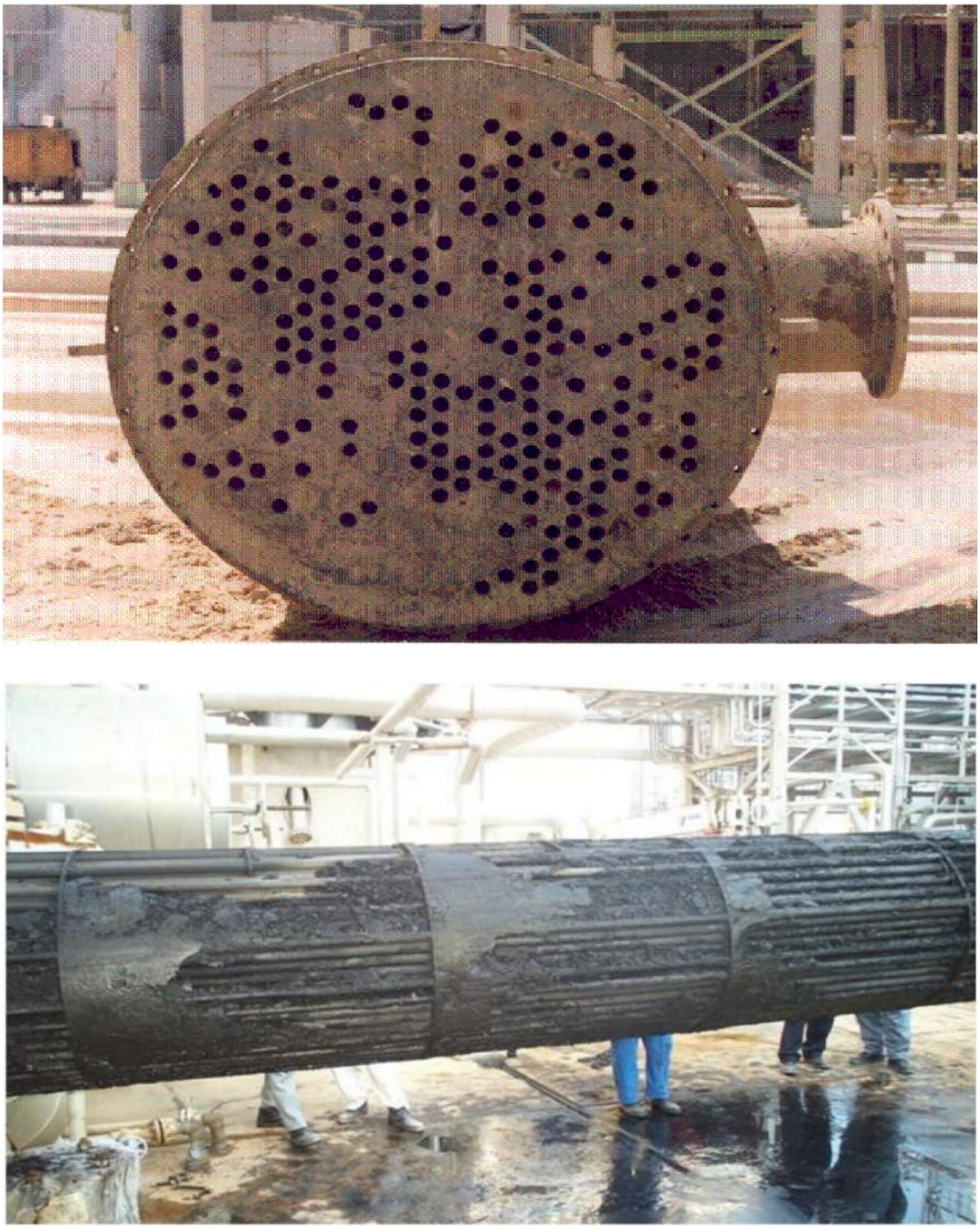


***Fig.III.02**:Faisceau encrassé[15].*

III.7.Les recherches sur ce problème:

Les recherches sur le problème d'encrassement dans les échangeurs de chaleur et des méthodes pratiques pour prédire le facteur d'encrassement, faisant appel notamment à des techniques numériques modernes. L'activité des brevets internationaux actuels sur l'encrassement [15].

Tableau.III.01: *Activité de brevet international[18].*

Pays	Nombre de brevets	% Des Brevets
USA	147	63.6
Allemagne	22	9.5
Japon	21	9.1
Suèdes	9	3.9
Suisse	8	3.5
Autre	24	10.4
Total	**231**	**100.0**

III.8. Processus encrassement

L'ensemble du processus d'encrassement est généralement considéré comme le résultat net de deux sous-processus simultanés; un processus de dépôt et un processus de suppression.

Une représentation schématique du processus d'encrassement est donnée dans la Fig. III.03.

Tous les sous-processus peuvent être résumés comme suit:

- Formation de matériaux d'encrassement dans la masse du fluide.
- Transport de matières d'encrassement à l'interface dépôt-fluide.
- Réaction Attachement / formation à l'interface dépôt-fluide.
- Suppression du dépôt d'encrassement.
- Transport à partir de l'interface liquide-dépôt à la masse du fluide [16].

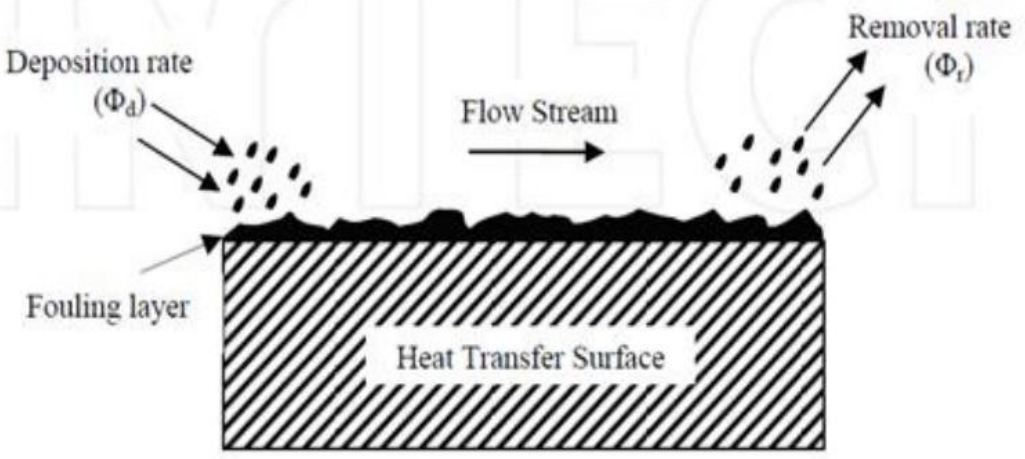


Fig.III.03:*Formation de dépôt[16].*

III.9.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 fabriquant, aussi que la surface d'échange, la capacité thermique et le coefficient de transfert sale[16].

III.10.Nettoyage de l'échangeur

Pour améliorer la performance des échangeurs de chaleur il faut réduire l'encrassement périodiquement, il faut éliminer toutes les substances afin d'avoir un échangeur presque neuf, rendant les tubes à un nouveau cycle de vie[16].

II.10.1.Nettoyage mécanique

Les procédures de nettoyage des tubes pour échangeurs à tubes et calandre sont réalisées hors ligne, le plus fréquemment choisi et le plus rapide c'est le nettoyage mécanique. Cependant, cette méthode n'est pas efficace à 100%, laissant certaines substances d'encrassement et elle endommage la paroi du tube par le frottement de l'axe de nettoyage avec la paroi du tube[18].

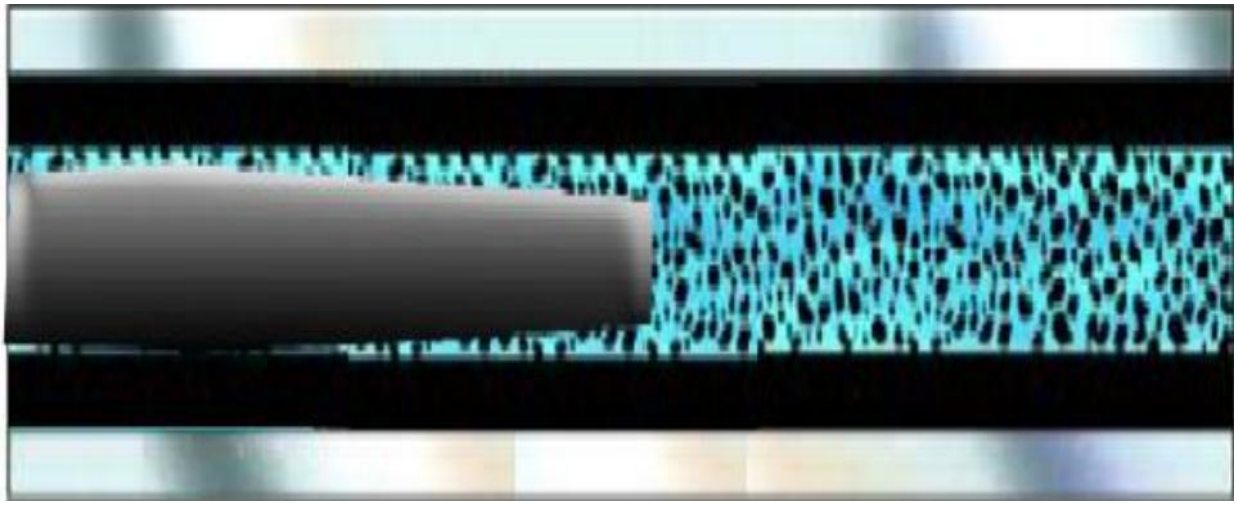


Fig.III.04: *Nettoyage mécanique[18].*

III.10.2.Nettoyage hydraulique

Parmi les autres méthodes hors ligne l'utilisation de l'eau à très haute pression, le temps nécessaire pour nettoyer un échangeur de chaleur peut devenir long. Un grand soin doit êtrepris pour ne pas endommager les revêtements de plaques tubulaires ou les tubes mêmes; sinon la suppression réussie de dépôts d'encrassement peut devenir associé à de nouvelles fuites dans le tube ou l'augmentation de la feuille de corrosion des tubes, qui ne peuvent être révélés qu'après que l'appareil n'ait été ramené en ligne[18].

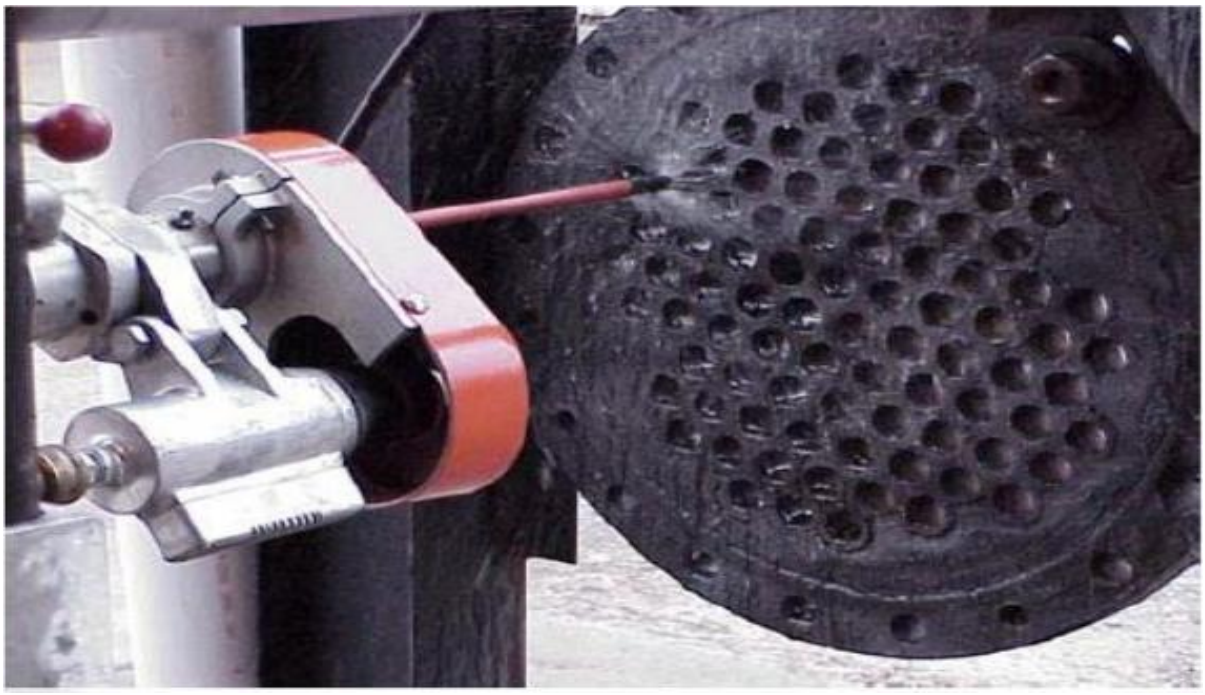


Fig. III.05: *Nettoyage hydraulique[18]..*

III.10.3. Nettoyage chimique

Les produits chimiques sont également utilisés pour le nettoyage hors ligne des tubes d'échangeur de chaleur. Plusieurs produits légèrement acides sont disponibles et peuvent éliminer plus de dépôt que la plupart des autres méthodes; mais ils sont coûteux, prennent plus de temps pour que l'opération soit terminée, et l'élimination ultérieure des produit chimiques peut se révéler un danger pour l'environnement. On a également trouvé, assez fréquemment, que certaines matières résiduelles ont besoin d'être enlevé par des méthodes de nettoyage mécanique[18].

III.10.4.Nettoyage par projectile

Pour le nettoyage hors ligne, l'outil sélectionné doit être le plus approprié pour retirer un type particulier de dépôt. Nettoyeurs plastique moulé sont très populaires pour certaines applications. Les brosses peuvent également être utilisées pour enlever ces dépôts mous ainsi que certains types de dépôt microbiologique. Les brosses sont également utiles pour le nettoyage des tubes avec des surfaces améliorées (par exemple en spirale ou en retrait à ailettes).

Avec les types de dépôts plus durs, les nettoyants de métaux de différents modèles ont été développés, souvent avec un dépôt particulier. Une version actuelle d'un produit de nettoyage constitué de plusieurs bandes en acier trempé en forme de U disposés de façon à former des paires de lames à ressort... Une version de ce nettoyant pour acier inoxydable est également disponible [18].

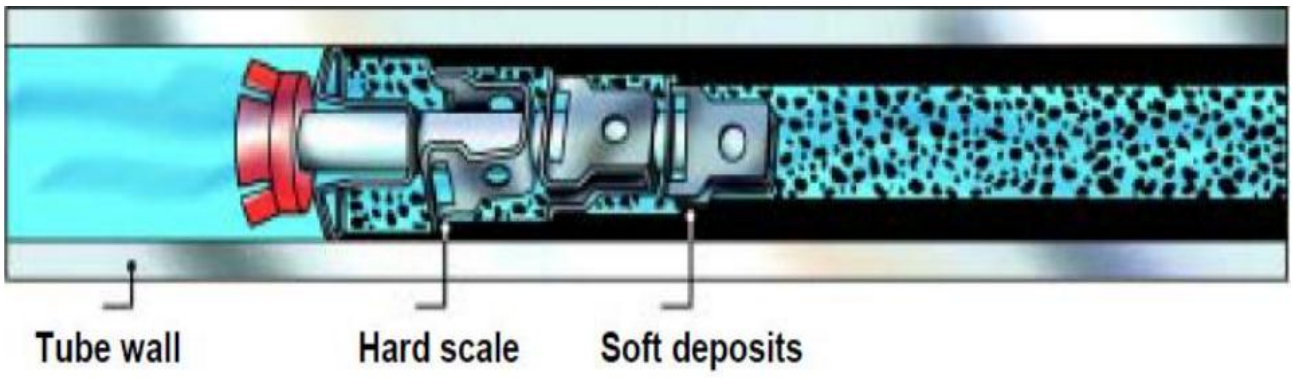


Fig. III.06: *Nettoyage par projectile[16].*

III.11. Paramètres influençant l'encrassement :

Il existe plusieurs paramètres influençant l'encrassement. Ces paramètres sont liés en générale au fluide d'alimentation ou à la surface d'échange[19].

III.11.1 la vitesse d'écoulement du fluide d'alimentation :

La vitesse d'écoulement a une influence très importante sur la formation du dépôt sur une paroi. L'augmentation de cette dernière, due au débit élève du fluide, fait décroitre la résistance d'encrassement. D'autre part, pour une faible température de surface, l'augmentation de la vitesse d'écoulement est une méthode efficace pour réduire le phénomène d'encrassement des équilibre thermiques[19].

III.11.2. Température de la surface d'échange de chaleur :

La température de la surface d'échange est aussi un paramétré très important, car la déposition des particules solides sur une surface d'échange est favorisée lorsque la température est élève, d'où la formation d'un encrassement plus rapide et plus sévère[19].

III.11.3. Nature et matériaux de construction de la chaleur :

Les surfaces rugueuse ont tendance à favoriser l'initiation de l'encrassement. Le dépôt formé par la suite modifie cette rugosité. D'où un bon choix des matériaux de construction devra éviter l'encrassement par corrosion[19].

IV.1. Calcul des pertes de charge des échangeurs P10-GA-21-02avec les données du constructeur "Design"(voir les données après l'annexe n°1):

➢ **Bilan thermique:**

Q =m.Cp(T_{c1}–T_{c2})=38689.2,6281(200-179.9)= 20,44.10^5 kcal/h.

Q = M.Cp'(t_{t2}– t_{t1}) = 30342.2,3167(90-59.7)= 20,44.10^5 kcal/h.

➢**Température moyenne logarithmique:**

$$\Delta TLM = \frac{(T_{c1}-t_{t2})-(T_{c2}-t_{t1})}{\ln\frac{T_{c1}-t_{t2}}{T_{c2}-t_{t1}}} = \frac{(200-90)-(179.9-59.7)}{\ln\frac{200-90}{179.9-59.7}} = 115,12\ °C.$$

$\Delta TLM_{corrigé}$ =ΔTLM. F = 115,12.0,98 = 112,8 C° ou F= 0,98 (F: d'après l'annexe n°2).

Avec:

$$E = \frac{t_{t2}-t_{t1}}{T_{c1}-t_{t1}} = \frac{90-59,7}{200-59,7} = 0,22\ .$$

$$R = \frac{T_{c1}-T_{c2}}{t_{t2}-t_{t1}} = \frac{200-179,9}{90-59,7} = 0.67\ .$$

➢**Température calorique :**

Fluide visqueux brut: Kc= $kc = \frac{U_{ch}-U_{fr}}{U_{fr}}$ =2 Kc=2 ou Kc , Fc (d'après l'annexe n°4).

$$\frac{\Delta t_{fr}}{\Delta t_{ch}} = \frac{T_{c2}-t_{t1}}{T_{c1}-t_{t2}} = \frac{179,9-59,7}{200-90} = 1,09 \quad \Rightarrow \quad Fc = 0,42$$

➢ **Détermination de la température calorique Tc .tc :**

T_C= T_{c2}+ F_C(T_{c1}–T_{c2}) = 179.9 + 0.83(200-179.9) = 196,549 C°

t_C= t_{t1} + F_C(t_{t2}– t_{t1}) = 59,7 + 0.83(90-59,7) = 84,849 C°

➢**Surface d'échange global:**

Us = 200 Kcal / h.m2°C…… …(*Us*: d'après l'annexe n°3).

$$A = \frac{Q}{U_S.\Delta TLM} = \frac{20,44.10^5}{200.115,12} = 88.77 m^2\ .$$

➢**Surface d'échange d'un tube:**

a = $\pi.de.L = 3{,}14.0{,}0254.3 =$ 0.239268 m^2

➢**Nombre de tubes pour une surface d'échange :**

$$Nt = \frac{A}{a.n_c} = \frac{88.77}{0{,}239268\ .4} = 96 \text{ tubes}$$

Côté faisceau : brut

Caractéristiques de brut tc Z 84,849 C°:

Cp= 0,579 kcal /kg.°C ……..(d'après l'annexe n°5).

d = 0,6862……...……..(d'après l'annexe n°6).

λ = 0,116 kcal/h.m² (°C/m) …...……...…(d'après l'annexe n°7).

υ = 1,04 cP= 3,748 kg/h.m.

➢**Section par passé:**

$$a_t = \frac{N_t}{n_t}\frac{®.d_1^2}{4} = \frac{96}{4}® \frac{0.023292^2}{4} = 1{,}078 m^2$$

➢**Vitesse massique:**

$$G_t = \frac{m}{a_t} = \frac{30342}{9{,}901.10^{-3}} = 3064538{,}935 \text{ kg/h.m}^2$$

➢**Nombre de Reynolds:**

$$R_e = \frac{d_i G_t}{g} = \frac{0.023292.30645{,}935}{3.748} = 19044{,}62136$$

J_h = f(Re, L/di)

$$\frac{L}{d_i} = \frac{3}{0.023292} = 128{,}799$$

On a : J_h=70 et f = 0,019……..……...……(d'après l'annexe n°8).

$$\frac{h_i}{¤_t} = j_h \frac{a}{d_i}\left(\frac{Cp.g}{a}\right)^{\frac{1}{3}} = 70.\frac{0{,}116}{0{,}023292}\left(\frac{0{,}579.3{,}748}{0{,}116}\right)^{\frac{1}{3}} = 916.86415 \text{ kcal/h.m}^2\text{.C°}$$

$$\frac{h_{i0}}{¤_t} = \left(\frac{h_i}{¤_t}\right)\frac{d_i}{d_0} = 916{,}86415\frac{0{,}023292}{0{,}025400} = 840.7716 \text{ kcal/h.m}^2\text{.C°}$$

➢**Côté calandre :brut (même fluide)**

➢**Caractéristiques brut Tc= 196,549C°**:

Cp' = 0,692 kcal /kg.°C ……..……...(d'après l'annexe n°5).

d' = 0,701……...(d'après l'annexe n°6).

λ' = 0,167 kcal/h.m² (°C/m)……...……..…….(d'après l'annexe n°7).

υ' = 0.657 cP= 2.3639 kg/h.m

➢**Section par passé:**

$$a_{CT} = \sqrt{2}.\frac{D_C}{p}(p - d_e)B = \sqrt{2}.\frac{0,45}{0,032}(0,032 - 0,0254)0,513549 = 0,724104\ m^2$$

➢ **Vitesse massique :**

$$G_{CT} = \frac{M}{a_{CT}} = \frac{38689}{0,724104} = 53430,17025 kg/h.m^2$$

➢ **Diamètre équivalent:**

$$D_{eq} = \frac{4.p^2}{®.d_e} - d_e = \frac{4.0.032^2}{®.0,0254} - 0,0254 = 0,026778343\ m$$

➢ **Nombre de Reynolds:**

$$R_{eCT} = \frac{D_C.G_{CT}}{g} = \frac{0,45.53430,17025}{2,3639} = 10171,14794.$$

On a : J_h= 57et f = 0,72……..……..…..…(d'après l'annexe n°9).

$$\frac{h_0}{¤_C} = j_h^{'}.\frac{a^{'}}{D_{eq}}\left(\frac{Cp'.«^{'}}{a^{'}}\right)^{\frac{1}{3}} = 57.\frac{0,167}{0,026778343}\left(\frac{0,692.2,3639}{0,167}\right)^{\frac{1}{3}} = 754,820707\ kcal/h.m^2.C°$$

➢**Température de tube:**

$$t_t = T_C - \frac{\frac{h_{i0}}{¤_t}}{\frac{h_0}{¤_C} + \frac{h_{i0}}{¤_t}}(T_C - t_C) = 196{,}549 - \frac{840{,}7716}{754.820707 + 840{,}7716}(196{,}549 - 84{,}849)$$

Alors: $t_t = 137{,}69C°$

➢**Viscosité du brut à t_t =137.69 °C**

υ =0.798 cP=2.873 kg/h.m.

➢ **Détermination de υ_t a t_t :**

$$¤_t = \left(\frac{g}{gt}\right)^{0,14} = \left(\frac{3{,}748}{2{,}873}\right)^{0,14} = 1{,}038$$

$$h_{i0} = \left(\frac{h_{i0}}{¤_t}\right)¤_t = 840{,}7716.1{,}038 = 872{,}720 \text{ kcal/h.m}^2\text{.C°}$$

➢**Viscosité du brut à t_t=137,69 °C**

$$¤_c = \left(\frac{g'}{gt}\right)^{0,14} = \left(\frac{2{,}3639}{2{,}873}\right)^{0,14} = 0{,}9731$$

$$h_0 = \left(\frac{h_0}{¤_C}\right)¤_C = 754{,}820707 .0{,}9731 = 734{,}52 \text{ kcal /h m² °C}$$

➢**Coefficient de transfert propre Up:**

$$U_P = \frac{h_0.h_{i0}}{h_0 + h_{i0}} = \frac{734{,}52 .872{,}720}{734{,}52 + 872{,}720} = 398{,}84 \text{ kcal /h m² °C.}$$

➢**Résistance d'encrassement R_S:**

$$R_S = \frac{U_P - U_S}{U_P.U_S} = \frac{398{,}84 - 200}{398{,}84.200} = 2{,}50.10^{-3} \text{ h m² °C / kcal.}$$

➢**Perte de charge à travers les tubes**

$$\Delta P_t = \frac{n_c.n_t.G_T^2}{1{,}272.10^{15}.d}\left[\frac{f_t.L}{d_i.¤_t} + 2\right] = \frac{1 .4 .3064538 ,935^2}{1{,}272 .10^{15}.0{,}6862}\left[\frac{0{,}019 .3}{0{,}023292 .1{,}038} + 2\right]$$

Alors:ΔP_t = 0,187542528 kg /cm²

➢**Perte de charge côté calandre:**

$$\Delta P_C = \frac{n_C . f_{CT} . G_{CT}^2 (N_C + 1) . D_C}{1{,}271.10^{15} . d' D_C . ¤_C} = \frac{1.0{,}72 .53430 ,17025^{\,2} (10 + 1) . 0{,}45}{1{,}271 .10^{15} . 0{,}701 . 0{,}45 . 0{,}9137}$$

Alors: ΔP_c = 0,277 kg /cm²

IV.2.Calcul des pertes de charge de l'échangeur P10-GA-21-02 avec les données actuelle (Mars.2016°):

Tableau-IV.01: Présente les données réelles de l'échangeur P10-GA-21-02.

Démission		Calandre	Faisceau
Produit		**BRUT**	**BRUT**
Débit (kg / h)		**18875**	**15855**
Densité		**0,6862**	**0,7481**
Chaleur spécifique (k cal / kg °C)		**0,624**	**0,601**
Températures (°C)	**In**	**140**	**55**
	Out	**115**	**85**
Résistance d'encrassement (h m² °C / k cal)		**0.0004**	**0.0004**

➢ **Bilan thermique:**

Brut coté tube : Q= m. Cp (t_{t2}-t_{t1})= 15855.0,601(85-55)= 2,8925.10^5 ≈ 2,90.10^5 k cal /h.

Brut coté calandre: Q= M.Cp'(T_{c1}-T_{c2})=18875.0,624(140-115) = 2,91562.10^5 ≈ 2,90.105 k cal /h.

➢**Température moyenne logarithmique:**

$$\Delta TLM = \frac{(T_{c1} - t_{t2}) - (T_{c2} - t_{t1})}{\ln \frac{T_{c1} - t_{t2}}{T_{c2} - t_{t1}}} = \frac{(140 - 85) - (115 - 55)}{\ln \frac{140 - 85}{115 - 55}} = 57{,}47\ ^{o}C$$

$\Delta TLM_{corrigé} = \Delta TLM. F = 57,47.0,96 = 55,1712$ °C…….…… (F: d'après annexe n°9).

$$E = \frac{t_{t2} - t_{t1}}{T_{c1} - t_{t1}} = \frac{85-55}{140-55} = 0,3529$$

$$R = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{t_{t2} - t_{t1}} = \frac{140-115}{85-55} = 0,833$$

On a : n_t= 4 passes

Et n_c = 1passe

} Facteur de correction F = 0,96… (d'après l'annexe n°2).

➢**Détermination de coefficient U_S pour une surface donnée A=22,98 m² :**

$$Us = \frac{Q}{A.\Delta TLM} = \frac{2,9.10^5}{22,98.57,47} = 226.48 \text{ kcal/h.m2.°C}$$

➢**Détermination de température calorique: T_C, t_C**:

Fluide visqueux brut:

F_C= f (K_C, r)

Avec K_C = f (Δt,d) et $r = \frac{T_{c2} - t_{t1}}{T_{c1} - t_{t2}} = \frac{\Delta t_{fr}}{\Delta t_{ch}} = \frac{115-55}{140-85} = 1,09$

Donc K_C= f(Δ t,d) = (140;0,7481)= 0,14

Alors F_C = f (K_C,r) = f(0,14,1,09)= 0,47. ……..……..(F_C et Kc d'après partir l'annexe n°4).

$T_C = T_{c2} + F_C(T_{c1} - T_{c2})$ = 115+0,47(140-115)= 126,75 °C

$t_C = t_{t1} + F_C(t_{t2} - t_{t1})$ =55+0,47(85–55) = 69.1°C

➢**Caractéristiques du brut á t_t=69.1°C (faisceau):**

Cp=0,482 kcal /kg.°C ……(d'après l'annexe n°5).

d=0,721……..……..……..…..(d'après l'annexe n°6).

λ =0,145 kcal/h.m² (°C/m)…….....……..…...(d'après l'annexe n°7).

υ = 1,17 cP = 4,195 kg / h.m

➢**Section par passe :**

Apres: $Nt = \frac{A}{a.n_t} = \frac{22.98}{0,239268.4} =$ 93 tubes

$a_t = \frac{N_t}{n_t} \frac{®.d_1^2}{4} = \frac{93}{4} ® \frac{0.023292^2}{4} =$ 0,010901 m²

➢**Vitesse massique:**

$G_t = \frac{m}{a_t} = \frac{15855}{0,01090} =$ 1454587,156 kg / h.m²

➢**Nombre de Reynolds:**

$R_e = \frac{0,023292 .1454587 ,156}{4,195} =$ 8076,33946

J_h = f(Re, L/di) et $\frac{L}{d_i} = \frac{3}{0.023292} =$ 128,799

J_h=f(8076,33946;128,799) = 30 et f =0,029……..…….....……(d'après l'annexe n°8).

$\frac{h_i}{¤_t} = j_h \frac{a}{d_i} \left(\frac{Cp.g}{a} \right)^{\frac{1}{3}} = 30 \frac{0,145}{0,023292} \left(\frac{0,482.4,195}{0,145} \right)^{\frac{1}{3}} =$ 445,5927 kcal / .m²°C h

$\frac{h_{i0}}{¤_t} = \left(\frac{h_i}{¤_t} \right) \frac{d_i}{d_e} = 445,5927 \frac{0,023292}{0,0254} =$ 408,612 kcal / h.m²°C

➢ **Caractéristiques de brut á T_C=126.75 C (calandre):**

Cp'= 0,624 kcal /kg.°C……(d'après l'annexe n°5).

d'=0,46……..…….……..…….(d'après l'annexe n°6).

λ′ =0,114 kcal/h.m² (°C/m) ……..…….……(d'après l'annexe n°7).

υ'=0,835cP =3,006kg /h.m

➢**Section par passe:**

$a_{CT} = \sqrt{2}.\frac{D_C}{p}(p - d_e)B = \sqrt{2}.\frac{0,45}{0,032}(0,032 - 0,0254)0,513549 =$ 0,724104 m²

➢**Vitesse massique:**

$G_{CT} = \frac{18875}{0,724104} =$ 6066,69 kg / h.m

➢**Diamètre équivalent**:

$$D_{eq} = \frac{4.p^2}{®.d_e} - d_e = \frac{4.0.032^2}{®.0,0254} - 0,0254 = 0,026778343 \text{ m}$$

➢**Nombre de Reynolds:**

$$R_{eCT} = \frac{D_C.G_{CT}}{g} = \frac{0,45.26066,69}{3,006} = 3902,20$$

J_h= 34 et f =0,35……...…..……...…(d'après l'annexe n°9).

$$\frac{h_0}{¤_C} = j_h^{'}.\frac{a^{'}}{D_{eq}}\left(\frac{Cp'.«^{'}}{a^{'}}\right)^{\frac{1}{3}} = 34.\frac{0,114}{0,026778343}\left(\frac{0,624\ .3,006}{0,114}\right)^{\frac{1}{3}} = 364,610 \text{ kcal / h.m²°C}$$

➢**Température de tube:**

$$t_t = T_C - \frac{\frac{h_{i0}}{¤_t}}{\frac{h_0}{¤_C} + \frac{h_{i0}}{¤_t}}(T_C - t_C) = 126,75 - \frac{735,504}{364,610 + 735,504}(126,75 - 69,1)$$

Alors : t_t = 88,206 °C

➢**Viscosité de brut á t_t= 88,206 °C (faisceau):**

υ_t = 1,018 cP = 3,667 kg /h.m

$$¤_t = \left(\frac{g}{gt}\right)^{0,14} = \left(\frac{4,195}{3,667}\right)^{0,14} = 1,02$$

$$h_{i0} = \left(\frac{h_{i0}}{¤_t}\right)¤_t = 735,504.0,973 = 715,65 \text{ kcal / h.m²°C.}$$

➢**Viscosité de brut á t_t=88,206 °C(calandre):**

Remarque c'est un le même fluide coté tube et coté calandre (brut).

Alors: υ_t = 1,02 cP = 3,667 kg /h.m

$$¤_c = \left(\frac{g^{'}}{gt}\right)^{0,14} = \left(\frac{3,006}{3,667}\right)^{0,14} = 0,9731$$

$$h_0 = \left(\frac{h_0}{¤_C}\right)¤_C = 364,610.0,9731 = 354,802 \text{ kcal / h.m²°C.}$$

➢**Coefficient de transfert :**

$$U_P = \frac{h_0.h_{i0}}{h_0 + h_{i0}} = \frac{354,802.715,65}{354,802 + 715,65} = 237,202 \text{ kcal /h m² °C.}$$

➢**Détermination de résistance globale d'encrassement:**

$$R_S = \frac{U_P - U_S}{U_P.U_S} = \frac{237,202 - 200}{237,202.200} = 6,80810^{-4} \text{ h m² °C / kcal.}$$

➢**Perte de charge côté tube:**

$$\Delta P_t = \frac{n_c.n_t.G_T^2}{1,271.10^{15}.d}\left[\frac{f_t.L}{d_i.¤_t} + 2\right] = \frac{1.4.16013,53399^2}{1,271.10^{15}.0,721}\left[\frac{0,029.3}{0,023292.1,02} + 2\right]$$

Alors: ΔP_t=0,6337kg/cm^2

➢**Perte de charge côté calandre:**

$$\Delta P_C = \frac{n_C.f_{CT}.G_{CT}^2(N_C + 1).D_C}{1,271.10^{15}.d'D_{eq}.¤_C} = \frac{1.0,35.26066,69^2(10+1).0,45}{1,271.10^{15}.0,46.0,026778343.0,9731}$$

Alors : ΔP_c= 0,4857 kg/cm^2

Tableau (IV.02): *Résultats de l'échangeur P10-GA-21-02.*

Caractéristique	Résultats des données du constructeur (design)	Résultats des données réelles (actuelle)
Quantité de chaleur (kcal/h)	$20,44.10^5$	$2.9.10^5$
ΔTLM (°C)	115, 12	57,47
Surface d'échange(m^2)	88.77	22,98
Température de tube (C°)	137,69	88,206
ΔP_c: Perte de charge coté calandre (kg /cm²)	0,277	0,4857
ΔP_t: Perte de charge coté tube (kg /cm²)	0,1875	0,6337
Rs: résistance globale d'encrassement (h m² °C / kcal)	$2,50.10^{-3}$	$6,80810^{-4}$

V.1. Présentation de HYSYS : [19]

HYSYS n'est pas le logiciel de simulation le plus flexible, ni le plus utilisé dans l'industrie, mais il a l'avantage d'être convivial et facile à utiliser une fois que les éléments de base sont compris. HYSYS a été développé pour l'industrie du pétrole, bien qu'il soit utilisé pour d'autres types de procédés chimiques. Les simulations sont accomplies en utilisant les outils des menus. En plus, il dispose d'une interface graphique pour la construction des diagrammes du procédé (*PDF – Process Flow Diagrams*). On présente ici les étapes nécessaires pour une simulation. [19]

V.2. Définition de HYSYS : [19]

Le Simulateur HYSYS est un ensemble de models mathématiques des opérations unitaire (ballon, colonne de distillation, compresseur, vanne…etc.), ces opérations sont connectées dans un schéma de procédé PFD par le courant d'information généré dans ces opérations.

Donc le HYSYS est un programme informatique pour la simulation des procédés de l'industrie de gaz, des procédés de raffinage et de la pétrochimie,

- A l'état stationnaire.
- En situation dynamique.

Le HYSYS peut être utilisé pour :

- Engineering.
- Établissement des bilans matière et d'énergie d'un procédé industriel.
- Dimensionnement des équipements.
- Réajustement des paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de composition de l'alimentation.
- Détermination des performances des équipements.

Pour l'utilisation du HYSYS l'utilisateur doit :

- Choisir un modèle thermodynamique et les constituants.
- Établir le schéma de procédées PFD.
- Spécifier les paramètres nécessaires de chaque opération.
- Il peut aussi dimensionner des équipements.

Le hysys résout le schéma du procédé, les résultats sont des bilans de matières et d'énergie.

V.3. Étapes de simulation:

-Utilisation HYSYS 7.2 comme un programme de simulation.

- Utilisations des composants prises de la salle controle en programme DCS (annexe1).
- Utilisations de la conception de l'échangeur prise de service technique de la unité CSC.

- Utilisations du modèle thermodynamique NRTL (No Random Two Liquids) car il est adapté pour les processus d'échange de chaleur.

- Conditions opératoire pris de la table .... Pour l'état de l'échangeur de chaleur idéale.

V.4. Conditions opératoire:

***Tableau-V.1*:** *conditions opératoire de l'échangeur P10-GA-21-02.*

	Fluide froid coté tube		**Fluide chaud coté calandre**	
Débit volumique (m^3/h)	Actuelle	Simulation	Actuelle	simulation
	30342	15855	38689	18875
Chaleur spécifique Cp KJ/Kg.°C	0.8249	0.7481	0.3702	0.6826
Température d'entré (°C)	59.7	55	200	-
Température de sortie	90	-	179.9	126.29
Pression (Kg/cm^2)	13.6	12.3	5.3	5.01

V.4.1. La simulation:

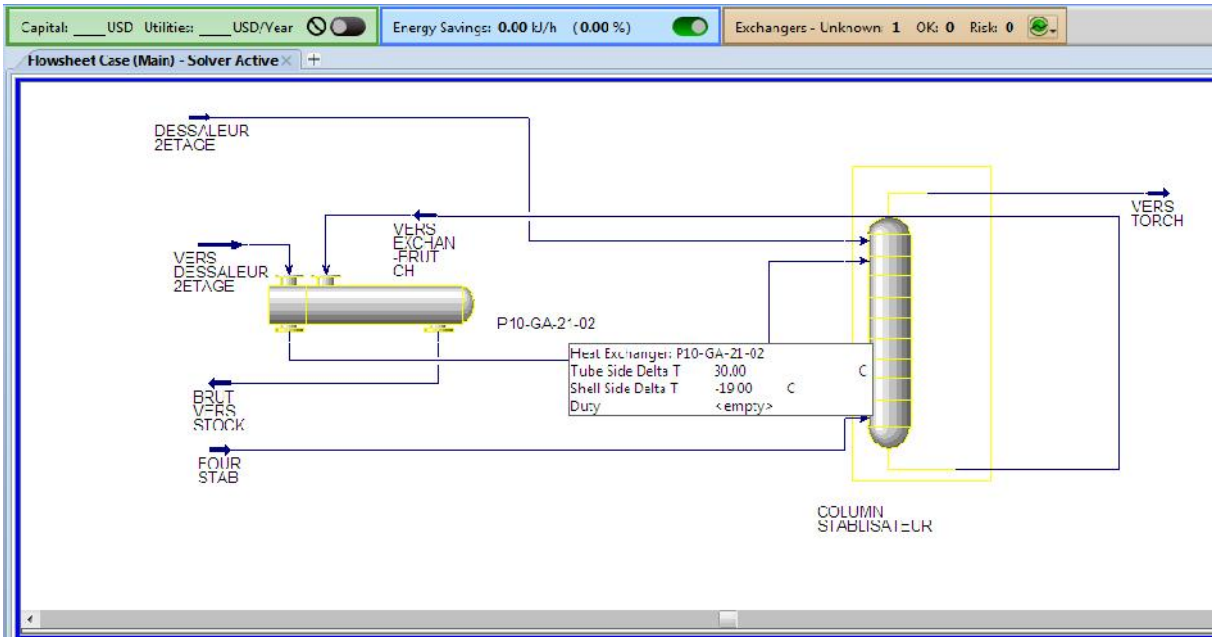


Fig.V-01: *Schéma de simulation.*

.

V.4-2 Résultats:

Tableau -V.02: *Résultas de simulation pour échangeur P10-GA-21-02.*

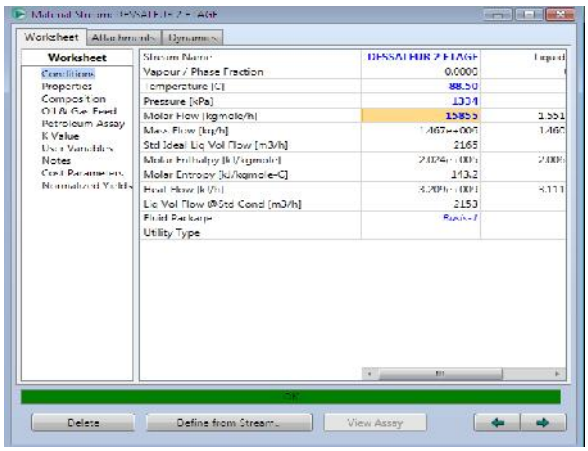
	Fluide froid		Fluide chaud	
	actuelle	similation	actuelle	similation
Débit volumique (m^3/h)	15853	15855	18883	18875
Température d'entré (°C)	58.23	59.7	142.39	140
Température de sortie (°C)	87.21	88.5	128.61	126.49
Pression (Kg/cm^2)	13.4	13.8	5.02	5.3

Les résultats obtenus par la logiciel de simulation HYSYS et les calculs du cas idéal de l'échangeur P10-GA-21-02 est presque identique coït actuelle ; la seule différence est la température de sortie du fluide chaud (+3.5 °C)

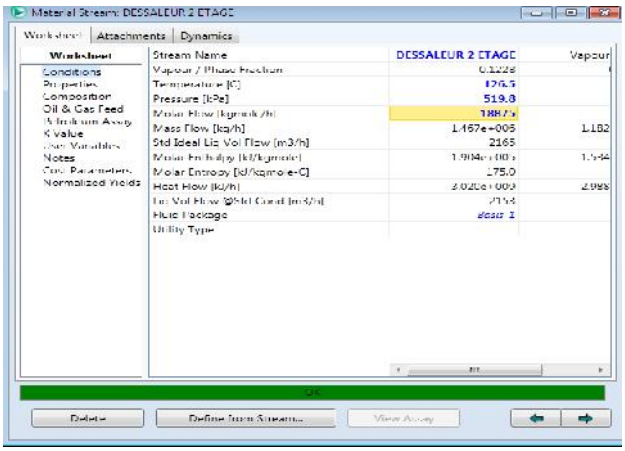
Cette expérience montre qu'on peut appliquer la logiciel de simulation HYSYS pour obtenir des résultats réels que l'on peut appliquer sur le terrain.

D'après les résultats précédents, nous pouvons étendre l'application de simulation pour tout le circuit de refroidissement puisque le même type d'échangeur de chaleur est utilisé. On introduit les conditions initiales de l'annexe afin que nous ayons les températures pour les différents échangeurs de chaleur.

La simulation nous permet d'estimer les températures des différents échangeurs utilisés dans ce circuit ainsi que les propriétés de la charge à différentes températures et l'état de la charge (liq/vap).



-charge côte tube



- charge côte calandre

Fig.V-02: *les propriétés de la charge.*

Conclusion

Après 30 jours de stage avec une étude bibliographique renforcé par des observations sur terrain nous pouvons conclure qu'il y a une grande relation entre notre sujet de master et la réalité, on a vu que le problème d'encrassement fait beaucoup de problèmes dans la raffinerie. L'encrassement cause un problème de perte de charge et perte de chaleur aussi avec la croissance de l'encrassement il faut augmenter la puissance de pompage ce qui conduit a une perte d'énergie importante on a aussi constaté qu'environ 40% des équipements dans la raffinerie sont des échangeurs de chaleur et ils ont tous le problème d'encrassement.

Avec l'utilisation des données de HYSYS comme valeur pour le cas idéal et par la prise des données de conditions actuelles, on peut facilement déduire l'encrassement de tout le circuit en un laps de temps réduit.

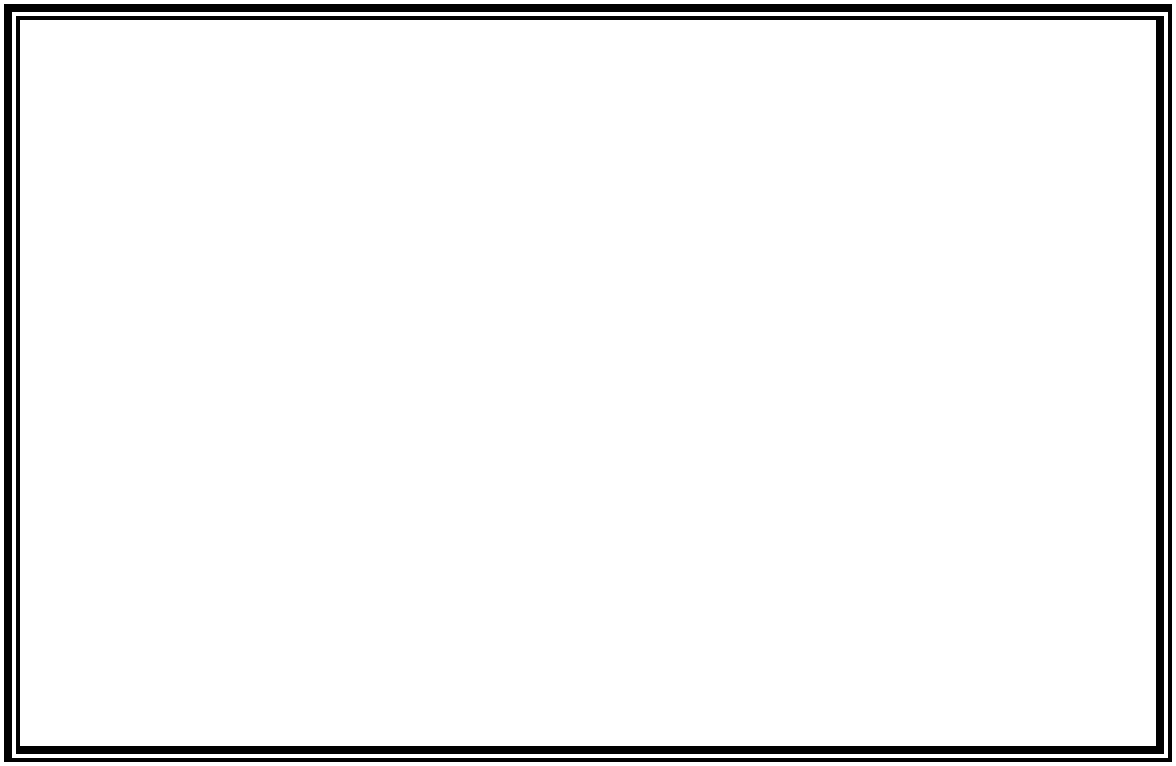
Conclusion Et Perspective

On a vue dans cette mémoire les notions d' échangeur de chaleur et descriptions détaillé de l'échangeur à tubes et calandre son classification et ces compositions et le standard et quelques exemples .

On a aussi décrit l'importance du phénoméne d'encrassement pour l'industrie pétrochimique de cote pratique et économique ,l'étude de l'échangeur P10.GA.21.02 de l'unité CSC pour but de savoir l'effet de l'encrassement dans l'industrie pétroliére .

On a vue que l'encrassement affecte sur la quantité de chaleur ,la surface d' échange ,la vitesse d'écoulement ,la résistance d'encrassement la perte de charge,l'efficacité , et la puissance .

Traitement de fluide ou ajouté de l'échangeur dans industrie secoure .



Bibliographie

[1]: TECHNIQUE DU FROID TECHNIQUE GENERALE CFmnLog YSH04054 p11-12

[2]: TRANSFERTS THERMIQUES Yves JANNOT 2012 p5/ p 63

[3]: J.P. Wauquier. Pétrole brut, Produit pétroliers, Schémas de fabrication. Institut français du pétrole ,édition Technip,(1994),Pages:3-11.

[4]: P.WUITHIER,Raffinage et génie chimique Tome I, Edition technip ,1972,pages 9.

[5]: J.Pierre, pétrole brut produits pétrolier Tome I, IFP Edition technip paris,1994.

[6]: IFP.Training, Matériels thermique, Edition ENSPM Formation Industrie ,2005,pages:1-6

[7]: P.Trambouze,, Matériels et équipement Tome IV, institut français du pétrole, éditions Technip 1999.pages:238-243,277-279.

[8]: Total ,Exploration et Production (les Echangeurs.), Support de formation EXP-PR-EQ120-FR,2007,pages :18-20.

[9]: A.Bouvenot, transferts de chaleur ,Masson,paris ,1981, page177.

[10]: Y.Jannot, Transfert et échangeurs de chaleur ,2002, Page :99-100.

[11]: Fouling of Heat Transfer Surfaces Mostafa M. Awad Mansoura University, Faculty of Engineering, Mech. Power Eng. Dept.,Egypt p4/5.

[12]: IFP.Training, grandeurs physique ,Edition ENSPM Formation industrie ,2005, page1-3,

[13]: IFP.Training, grandeurs physique ,Edition ENSPM Formation industrie ,2006, page1-3,

[14]: R. B. Hamouda, notions de mécanique des fluides , centre de Publication Universitaire ,Tunis,2008,page 94.

[15]: P.WUITHIER,Raffinage et génie chimique Tome II, Edition technip paris ,1972,pages 1047-1100.

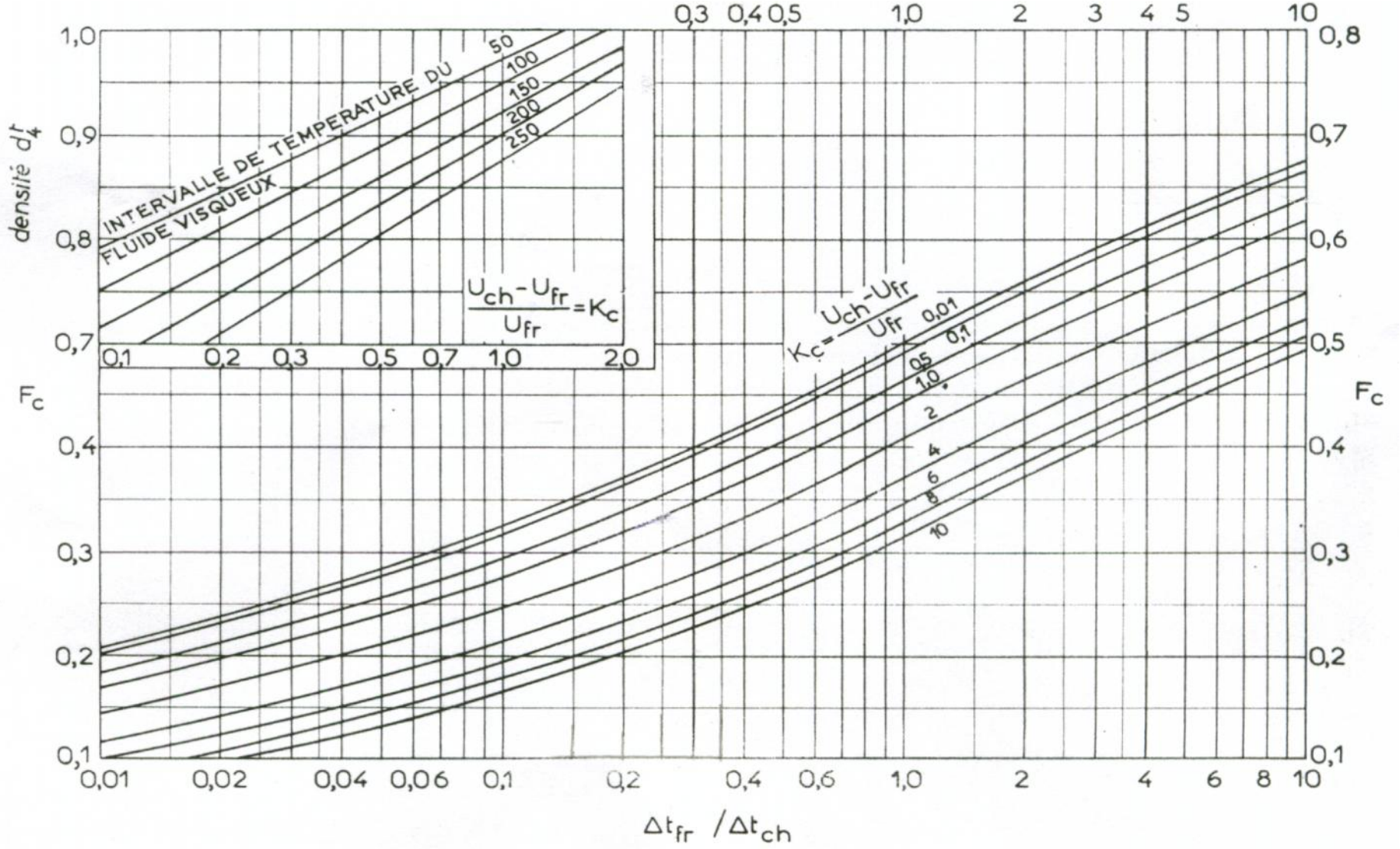
[16]: Photos trouve à SONATRACH Rhourd Nouss devisions d'exploite CSC- ECHANGEUR DE CHALEUR P10-GA-21-02 en **2016/03/12**;

[17]: HAL. Id: tel-00739023 https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00739023 Submitted on 5 Oct 2012

[18]: un mémoire 2014 : Etude des pertes de charge dans un tronçon de train de préchauffage du TOPPING et équipement Page 42-44.

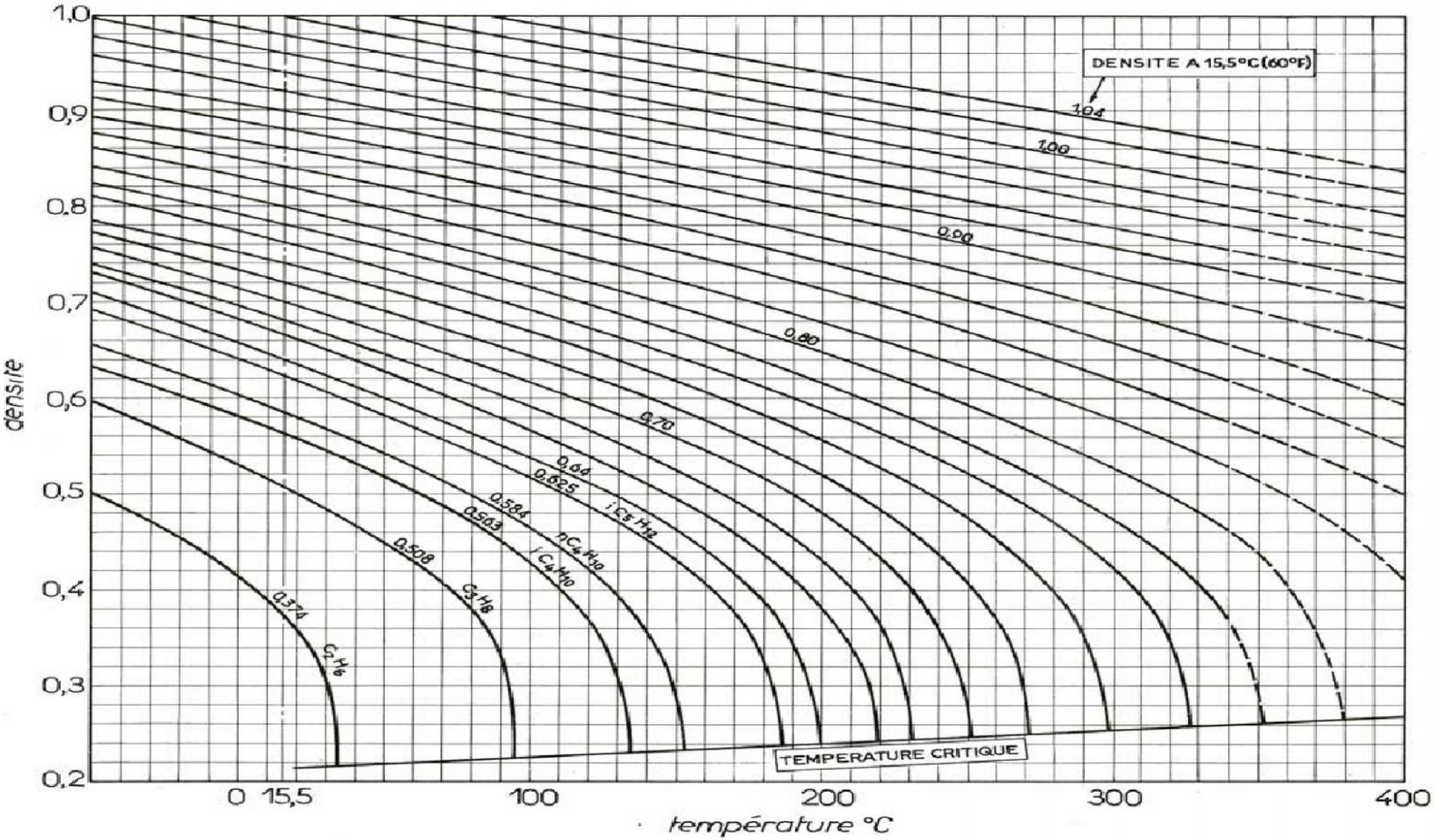
[19]: Un mémoire 2012: Etude des pertes de charge dans un tronçon de train de préchauffage Et refroidissement .universitaire Boumerdes;Page48-52.

[20]: Hysys Process Documentation, Hyprotech, Ing, AEA Groupe, Calgary, 2000 (CD.ROM).

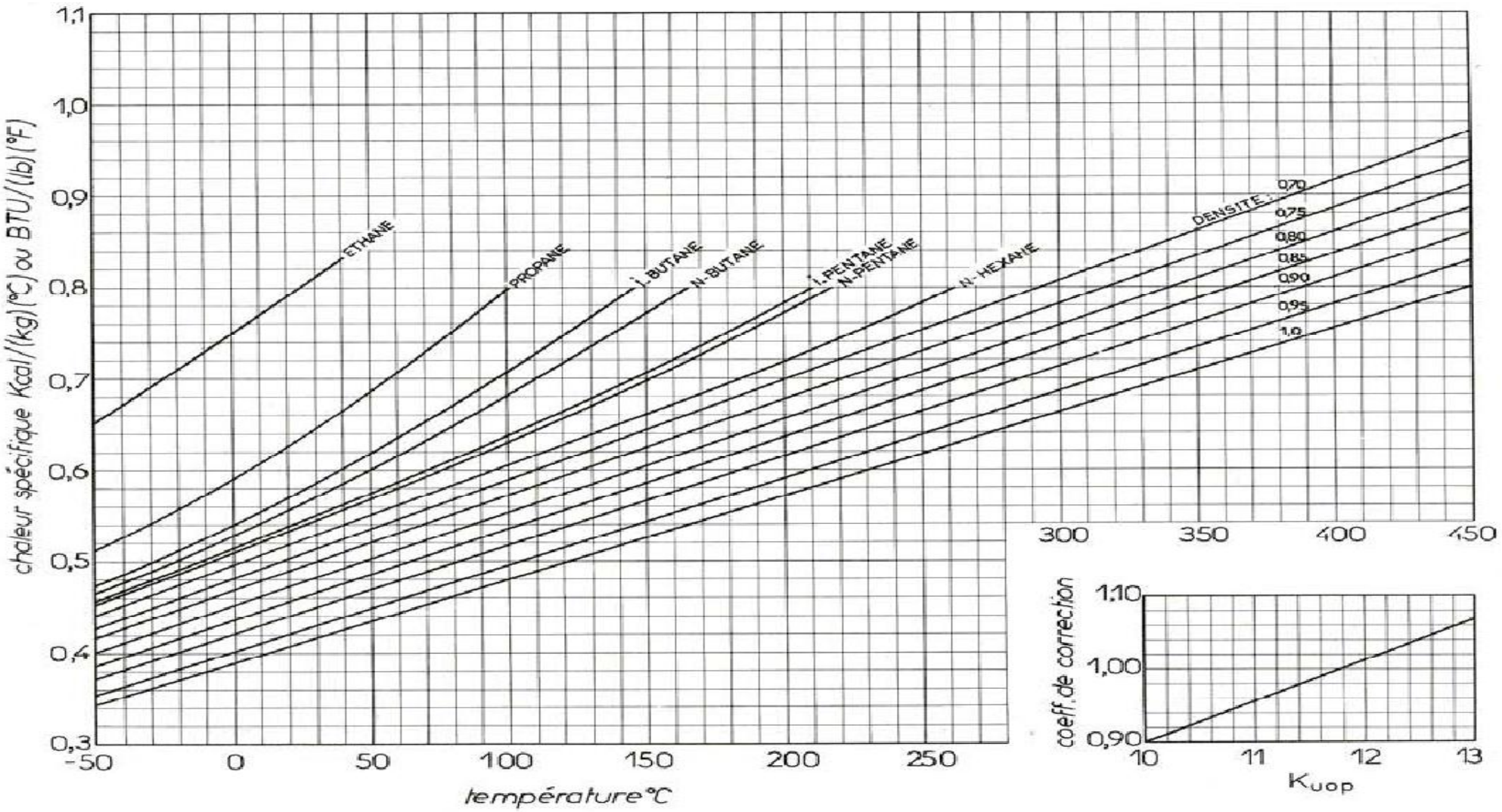


ANNEXE02:Détermination des températures caloriques [19]**.**

Annexe n°06: courbe de détermination de densité des hydrocarbures en fonction de températures [4].



Annexe n°05 : Courbe de détermination de chaleur spécifique en fonction de température[4].



Annexe n°07: courbe de détermination de conductivité thermique des hydrocarbures en fonction de température [4].