

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Département Génie des Procédés Chimiques et
Pharmaceutiques



Mémoire de Master

Présenté par

BOUHALI Nouha

&

GUENOUCHE Zakaria

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie des Procédés-Raffinage

*Impact de l'Encrassement sur l'Efficacité Énergétique des
Aéroréfrigérants 100-AM-101 A/H : Etude de Cas et
Solutions*

Devant le jury :

Mr. Hadj ARAB	Prof	UMBB	Président
Mme. Kahina BEDDA	MCA	UMBB	Examinatrice
Mme. Souad HAMMADOU	MCA	UMBB	Encadrante

Année Universitaire : 2023/2024

Résumé :

L'encrassement des aéroréfrigérants, provoqué par l'accumulation de dépôts sur les surfaces d'échange thermique, réduit considérablement leur efficacité énergétique. Ce phénomène augmente la résistance thermique, réduit le transfert de chaleur et entraîne une consommation d'énergie plus élevée pour maintenir des performances optimales. Cela peut également accélérer la dégradation des matériaux, augmentant ainsi les coûts de maintenance et de réparation et affectant la continuité de la production. Cette étude analyse les facteurs responsables de l'encrassement et ses conséquences, tout en proposant des solutions pour minimiser ce phénomène. L'objectif est d'améliorer l'efficacité énergétique et de prolonger la durée de vie des équipements, tout en réduisant les coûts opérationnels et les interruptions de production.

Mots clés : encrassement, échangeur, condensat, efficacité énergétique, cas design.

Abstract:

Fouling of air coolers, caused by the accumulation of deposits on heat exchange surfaces, considerably reduces their energy efficiency. This phenomenon increases thermal resistance, reduces heat transfer and results in higher energy consumption to maintain optimum performance. It can also accelerate material degradation, increasing maintenance and repair costs, and affecting production continuity. This study analyses the factors responsible for fouling and its consequences, while proposing solutions to minimize this phenomenon. The aim is to improve energy efficiency and extend equipment life, while reducing operating costs and production interruptions.

Key words: fouling, heat exchanger, condensate, energy efficiency, design case.

: الملخص

 ن تلوث مبردات الهواء، الناجم عن تراكم الترسبات على سطح التبادل الحراري، يقلل بشكل كبير من كفاءة الطاقة. وتزيد هذه الظاهرة من المقاومة الحرارية، وتقلل من انتقال الحرارة وتؤدي   ارتفاع استهلاك الطاقة للحفاظ على الأداء  مئل. ويمكنها  يضاً تسريع تدهور المواد، مما يزيد من تكاليف الصيانة والإصلاح ويؤثر على استمرارية الانتاج. تحلل هذه الدراسة العوامل المسؤولة عن التلوث وعواقبه، مع اقتراح حلول للحد من هذه الظاهرة. والهدف من ذلك هو تحسين كفاءة الطاقة وإطالة عمر المعدات، مع تقليل تكاليف التشغيل وانقطاع الإنتاج.

الكلمات الرئيسية: قاذورات، مبادل حراري، مكثفات، كفاءة الطاقة، حالة التصميم

Dédicace 1 :

Je dédie cette thèse à :

Mes parents, dont le soutien indéfectible, les sacrifices et les encouragements constants ont été la source de ma persévérance et de ma réussite. Vous avez toujours cru en moi et m'avez fourni les moyens nécessaires pour atteindre mes objectifs.

Mes amis chers, Katia, Ibtihel et Rahma. Merci pour votre amitié sincère, vos encouragements et votre inspiration. Votre présence à mes côtés a rendu ce parcours plus enrichissant et plus joyeux.

Tous les membres de SPE VoB SC, pour leur collaboration et leur soutien.

Toute la famille Bouhali et Siad. Votre amour, votre patience et votre soutien moral inestimable.

Ce travail est le fruit de nombreux efforts, mais aussi du soutien et de l'amour de ceux qui m'entourent. Il est autant le vôtre que le mien. Merci à vous tous d'avoir cru en moi et de m'avoir soutenu tout au long de ce parcours.

Nouha

Dédicace 2 :

Aujourd'hui, c'est avec honneur que je dédie ce mémoire, fruit de plusieurs années de labeur.

A mon cher père Allah yrahmou, pour ses encouragements, ses conseils et son amour éternel.

A ma très chère mère, pour sa tendresse, sa compréhension, sa patience et son soutien.

A mes sœurs et mon frère : Islam, Maram, Maria. Comme je dédie ce travail à toute la famille Guenouche, la famille Nemouchi, mes oncles et mes tantes, mes cousins et mes cousines.

A tous mes amis.

A tous mes camarades de la promotion 2019.

Et tous ceux que j'aime.

Zakaria

Remerciement

Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu, source de toute inspiration et de toute force, pour nous avoir guidés tout au long de ce périple académique.

Un immense merci à Madame HAMMADOU Souad pour son encadrement attentif, ses conseils éclairés et son soutien constant. Sa présence bienveillante a été un véritable moteur dans la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Messieurs BOUHALLA Noureddine et AMIRI Rachid de la raffinerie RA2K pour leur expertise technique et leurs conseils avisés qui ont enrichi notre travail.

Un grand merci à Madame BOUCHEMAL Amel pour son assistance précieuse et son soutien infailible tout au long de ce projet.

Nous n'oublions pas de remercier tous les professeurs qui ont partagé leur savoir et leur expérience avec nous, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Votre soutien a été indispensable et nous vous en sommes infiniment reconnaissants.

Table des matières

Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)	3
1.1. Introduction :	3
1.2. Historique :	3
1.3. Localisation géographique :	3
1.4. Conception générale du complexe RA2K :	4
1.4.1. Unité de Topping de condensât (U100):	4
1.4.2. Unité de traitement de kérosène (Unité200) :	5
1.4.3. Stockage et Transfert des produits (Unité 300) :	6
1.4.4. Système de torche (Unité 400) :	6
1.4.5. Les utilités (Unité 500) :	7
1.5. Conclusion :	7
Chapitre 2 : Généralité sur les techniques de refroidissement	8
2.1. Introduction :	8
2.2. Mode de Transmission de la Chaleur :	8
2.2.1. La conduction :	8
2.2.2. La convection :	9
2.2.3. Le rayonnement :	10
2.3. Généralités Sur les Echangeurs de Chaleurs :	10
2.3.1. Définition des échangeurs de chaleurs :	10
2.3.2. Les fonction des échangeurs de chaleur :	11
2.3.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur	11
2.3.4. Les différents types des échangeurs de chaleurs :	12
2.4. Les Modes de Circulation des Fluides :	18
2.4.1. Circulation à co-courant (courant parallèle) :.....	18
2.4.2. Circulation à contre-courant :	19
2.4.3. Circulation à courants croisés :	20
2.5. Problèmes de Fonctionnement :	20

2.5.1.	L'encrassement :	20
2.5.2.	La corrosion :	21
2.5.3.	Les vibrations :	21
2.6.	Conclusion :	21
Chapitre 3 : Technologie des aéroréfrigérants		23
3.1.	Introduction :	23
3.2.	Les Composants d'un Aéroréfrigérant :	24
3.2.1.	Les faisceaux :	24
3.2.2.	Ventilateurs :	29
3.2.3.	Chambres de distribution d'air « Pl�nums » :	29
3.2.4.	Les structures :	30
3.2.5.	L'ensemble des aéroréfrigérants :	30
3.3.	Les Technologies des Aéroréfrigérants :	31
3.3.1.	Tirage forcé :	32
3.3.2.	Tirage induit :	33
3.4.	Applications des Aéroréfrigérants Dans l'Industrie Pétrolière et Gazière :	34
3.5.	Avantages et Inconvénients des Aéroréfrigérants :	34
3.5.1.	Avantages :	34
3.5.2.	Inconvénients :	35
3.6.	Conclusion :	35
Chapitre 4 : Phénomène d'encrassement et dégradation des tubes de l'aéroréfrigérant 100-AM-101A/H		36
4.1.	Introduction :	36
4.2.	Implantation et Rôle de l'équipement :	36
4.3.	Description de l'équipement :	37
4.3.1.	Normes et standards de construction:	37
4.3.2.	Paramètres de fonctionnement :	38
4.3.3.	Paramètres de design :	38
4.4.	Analyse du Phénomène d'Encrassement des Tubes :	38
4.4.1.	Description des circuits de process des Aéroréfrigérants 100-AM-101 :	38
4.4.2.	Types de corrosion dans les circuits de process des Aéroréfrigérants	39
4.4.3.	Système adapté pour la protection contre la corrosion :	40
4.4.4.	Contrôle de la corrosion :	41

4.4.5.	Causes principales de l'encrassement des tubes des aéroréfrigérants :	41
4.5.	Conséquences de l'Encrassement Sur les Aéroréfrigérants :	42
4.5.1.	Impact sur les aéroréfrigérants :	42
4.5.2.	Impact sur la chaine de production :	43
4.6.	Conclusion :	43
Chapitre 5 : Etude thermique de l'influence de l'encrassement et l'obturation des tubes des Aéroréfrigérants		
	45
5.1.	La Description de la Problématique :	45
5.2.	Le Calcul Thermique de la Batterie d'Aéroréfrigérant 100-AM-101 A\H:	45
5.2.1.	Vérification du cas design :	46
5.2.2.	Calcul du bilan thermique cas actuel :	52
5.2.3.	Discussion et résultats :	56
Conclusion Générale et Recommandation :		58
Bibliographie		60

Liste des abréviations

CNPC : China National Petroleum Corporation.

GN : Gaz Naturel.

Jet A1 : Carburant pour aviation (Kérosène).

RA2K : Raffinerie Topping de Condensat.

LGO : Gasoil léger.

HGO : Gasoil lourd.

GPL : Gaz du pétrole liquéfier.

API : American Petroleum Institute.

ASME: American Standard for Mechanical Engineering.

grad (T) : Gradient de température. **Φ** : Densité de flux de chaleur (en W/m^2).

λ : Conductivité thermique du milieu (en $W / m .C$).

T : Température (en $^{\circ}C$).

Φ : Flux de chaleur échangé par convection (en W).

h : Coefficient d'échange thermique par convection (en $W/m^2.^{\circ}C$) ou en $(kcal/h.m^2.^{\circ}C)$.

S : Aire de la surface d'échange paroi/fluide en (m^2) .

Tp, Tf : Température de la paroi et température du fluide respectivement ($^{\circ}C$).

TM : Taux de marche.

Pr : Nombre de Prandlt.

Re : Nombre de REYNOLDS.

Nu : Nombre de NUSSELT.

DTLM : Moyenne logarithmique de la différence de température.

A : La surface d'échange.

Liste des figures :

Figure 1.1: Plan de situation du complexe RA2K	4
Figure 2.1: Échange de chaleur entre deux fluides dans un échangeur	12
Figure 2.2 : Échangeur à plaques	12
Figure 2.3: Composition d'un échangeur à faisceau tubulaire	15
Figure 2.4: Échangeur type KETTLE	16
Figure 2.5: Échangeur à tête flottante	17
Figure 2.6: Exemple d'un échangeur à tubes en "U"	17
Figure 2.7: Mode de circulation à co-courant	18
Figure 2.8: Ecoulement co-courant dans un échangeur tubulaire	19
Figure 2.9 : Mode de circulation à contre-courant	19
Figure 2.10: Ecoulement contre-courant dans un échangeur tubulaire	20
Figure 2.11: Mode de circulation à courants croisés	20
Figure 2.12: Encrassement des refroidisseurs à eau du complexe RA2K	21
Figure 3.1: Principe de fonctionnement d'un aérateur	23
Figure 3.2 : Schéma d'un aérateur	23
Figure 3.3: Tube aileté	24
Figure 3.4 : Faisceau d'un aérateur du complexe RA2K	24
Figure 3.5 : Exigences minimales d'épaisseur de paroi pour les matériaux du tube	25
Figure 3.6 : Ailette type L	26
Figure 3.7 : Ailette type L avec moletage.....	26
Figure 3.8 : Ailette type double L	26
Figure 3.9 : Ailette type G	26
Figure 3.10 : Ailette type extrudée	26
Figure 3.11 : Vue générale pour les boîtes de distribution et collecteur	27
Figure 3.12 : Boîte ou collecteur à bouchon	27
Figure 3.13 : Boîte ou collecteur à couvercle a démontable	28
Figure 3.14 : Collecteur cylindrique.....	28
Figure 3.15 : Collecteur à bonnet	28
Figure 3.16 Collecteur manifold	29
Figure 3.17 : Ventilateur	29
Figure 3.18 : Chambre de distribution air forcé et induit.	30
Figure 3.19 : Arrangement d'un aérateur	30
Figure 3.20: Vue générale d'un ensemble des aérateurs	31
Figure 3.21 : Les types des faisceaux	32
Figure 3.22 : Aérateur tirage forcé	32
Figure 3.23 : Aérateur type induit	33
Figure 4.1 : Implantation des aérateurs	37
Figure 4.2: L'évolution de la corrosivité due aux sulfures et due aux chlorures en fonction du PH	40
Figure 4.3 : La présence de dépôt solide au niveau de quelques tubes de l'aérateur 100-AM-101	42

Liste des tableaux

Tableau 1.1: les bacs de stockage du complexe Topping.	6
Tableau 5.1: Données de départ du vapeur de tête de l' aéroréfrigérant (A- 101 A/ H)	46
Tableau 5.2 : Données de départ du l'air	47
Tableau 5.3 :Données de départ du l'aéroréfrigérants (A-101 A /H)	48
Tableau 5.4: Les caractéristiques principales dans le cas actuel	52
Tableau 5.5 :Les principaux résultats de calcul dans le cas design (température ambiante 37°C) à 100% du taux de marche	55
Tableau 5.6 : Les principaux résultats de calcul dans le cas actuel (température ambiante 11.6°C) à 82% du taux de marche	56

Introduction générale

L'efficacité énergétique est un enjeu crucial dans l'industrie pétrolière, particulièrement dans les processus de raffinage où les coûts énergétiques représentent une part significative des dépenses opérationnelles. Les aéroréfrigérants jouent un rôle essentiel dans le refroidissement des fluides de processus, ce qui permet de maintenir des conditions optimales pour la production.

Toutefois, un problème majeur auquel font face les raffineries est la formation d'encrassement des aéroréfrigérants. Ce phénomène, causé par l'accumulation de dépôts sur les surfaces d'échange thermique, réduit considérablement l'efficacité des aéroréfrigérants. La présence d'encrassement augmente la résistance thermique, réduit le transfert de chaleur et nécessite une consommation d'énergie plus importante afin de maintenir les performances de refroidissement optimales. En outre, cela peut provoquer une dégradation rapide des métaux, ce qui entraîne une augmentation des coûts de maintenance et de réparation, et a un impact sur la continuité de la production.

Nous analyserons les facteurs qui entraînent l'encrassement, les conséquences sur les performances des aéroréfrigérants, et proposerons des solutions pour réduire ce phénomène. Le but consiste à proposer des conseils concrets afin d'améliorer l'efficacité énergétique et de prolonger la durée de vie des équipements, tout en diminuant les dépenses d'exploitation et les interruptions de production.

Afin d'atteindre cet objectif, le mémoire se structure comme suit :

- **Chapitre 1 : Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)**

Ce chapitre offre une présentation détaillée de la raffinerie de Skikda, incluant son historique, sa localisation géographique, et la conception générale du complexe.

- **Chapitre 2 : Généralité sur les techniques de refroidissement**

Ici, nous explorons les différentes techniques de transmission de la chaleur, les types d'échangeurs de chaleur, et les modes de circulation des fluides, ainsi que les problèmes de fonctionnement tels que l'encrassement, la corrosion, et les vibrations.

- **Chapitre 3 : Technologie des aéroréfrigérants**

Ce chapitre détaille les composants et les technologies des aéroréfrigérants, leurs applications dans l'industrie pétrolière et gazière, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

- **Chapitre 4 : Phénomène d'encrassement et dégradation des tubes de l'aéroréfrigérant 100-AM-101 A/H**

Nous analysons ici l'implantation et le rôle des aéroréfrigérants, la description de l'équipement, les causes principales de l'encrassement, et ses conséquences sur les aéroréfrigérants et la chaîne de production.

- **Chapitre 5 : Étude thermique de l'influence de l'encrassement et l'obturation des tubes des Aéroréfrigérants :**

Ce chapitre se concentre sur la description de la problématique, le calcul thermique de la batterie d'aéroréfrigérant 100-AM-101 A/H, et les résultats de ces calculs dans différents scénarios.

Finalement, nous clôturons avec une conclusion et recommandation.

Chapitre 1 : Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

1.1.Introduction :

Le complexe de Topping de condensat RA2K joue un rôle principal dans l'industrie pétrolière, car il facilite le traitement, le stockage et l'expédition des condensats et de ces produits, avec une capacité de traitement de cinq tonnes métriques pendant une période continue de 330 jours par an.

La charge provenant du terminal de direction Région Transport Est de Skikda alimente ce complexe en continu.

Le complexe est composé de cinq unités principales qui servent à stocker et à traiter divers produits à base de condensats. Son but principal est d'assurer la disponibilité et la qualité des produits tels que le butane, le Naphta, le kérosène, le gasoil léger (LGO) et le gasoil lourd (HGO) pour l'utilisation dans les industries.

1.2.Historique :

La raffinerie de condensat RA2K de Skikda représente un élément essentiel de la stratégie de Sonatrach pour soutenir l'économie et la sécurité énergétique du pays. L'entrée en service en 2009 a été réalisée par la société chinoise CPECC en qualité de contractant EPC pour SONATRACH, filiale de l'entreprise CNPC, entre les années 2005 et 2010. ^[1]

Le 10 mai 2005, la CNPC a obtenu le contrat pour la construction de cette raffinerie, d'une valeur d'environ 390 millions de dollars. SAIPEM (France) a été battue par CNPC qui a offert environ 460 millions de Le projet se compose de deux parties distinctes : une usine de condensat d'une capacité annuelle de 5 millions de tonnes et des installations visant à accroître les capacités de stockage des produits raffinés. ^[1]

- Le 01 Décembre 2005 : Entrée en vigueur du contrat ;
- Le 20 Mai 2009 : Admission du GN et démarrage des fours ;
- Le 02 juin 2009 : Admission de la charge condensat de RTE ;
- Le 25 juillet 2009 : Démarrage des unités Procès ;
- Le 06 Novembre 2009 : Tests de Performance ; □ Le 14 Janvier 2010 : Réception Provisoire.

Cette raffinerie joue un rôle essentiel dans la transformation du condensat, un type de pétrole léger, propre et peu polluant.

1.3. Localisation géographique :

Le Complexe Topping de Condensat RA2K est situé à l'est de la ville de Skikda, dans l'enceinte de la Zone Industrielle de Skikda, en dehors du tissu urbain, dans le périmètre de l'ancien aéroport. Les principaux sites industriels situés aux environs sont :

- Le complexe de liquéfaction du gaz naturel GL1K au nord.
- Au nord-est se trouve le Complexe des matières plastiques CP1K.
- POLYMED se situe au nord-est.
- À l'ouest se trouve la raffinerie de pétrole RA1K.
- Au sud se trouve le Terminal de stockage du pétrole brut et du condensat RTE.

Il couvre une surface d'environ 45 hectares et englobe les unités de production, les différentes utilités, les espaces de réception de la matière première, de stockage et de transport des produits finis.

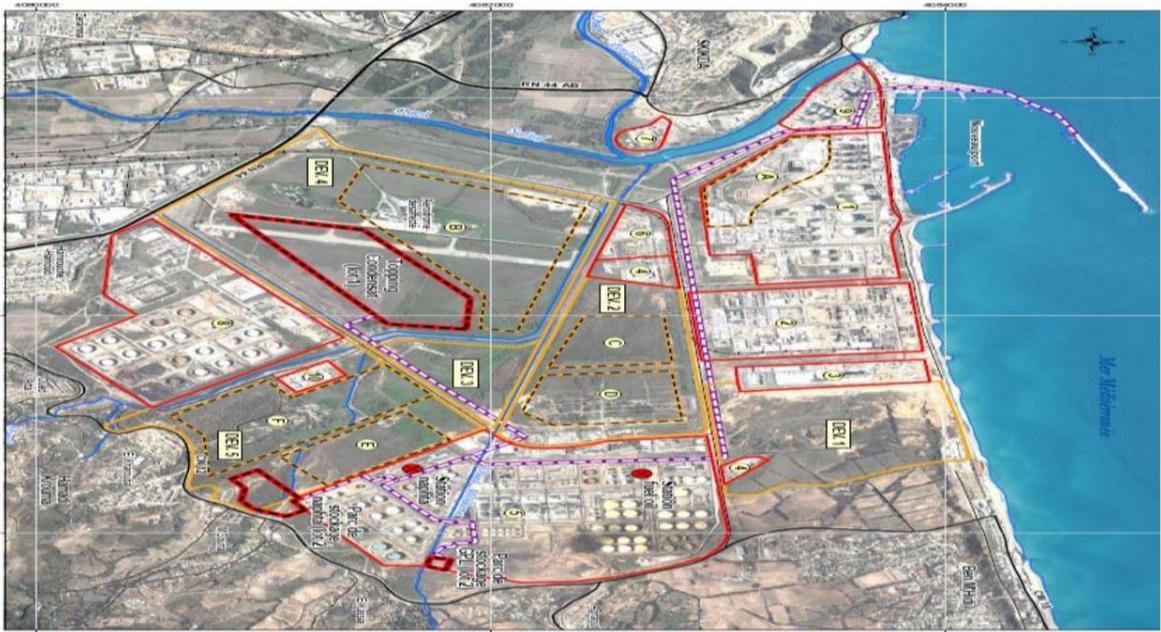


Figure 1.1: Plan de situation du complexe RA2K^[1]

1.4. Conception générale du complexe RA2K :

La composition principale du complexe est composée de :

- Une Unité de Topping de condensât (U100).
- Un système de purification et de traitement du kérosène (U200).
- Des équipements de stockage et de circulation des produits finis (U300).
- Système de torche (U400).
- Des infrastructures pour la production et la distribution des utilités (U500).

1.4.1. Unité de Topping de condensât (U100):

Cette unité est pour distiller et séparer la charge du condensat ainsi que ses produits tels que le butane, le kérosène, le naphta, le gasoil léger et le gasoil lourd. Elle est principalement constituée de 5 sections :

- Section de préchauffage ;
- Section de préfractionnement ;
- Section de distillation atmosphérique ;
- Section de stabilisation du coup de naphta ;
- Section de dépropanisation et séchage de butane.

- **Section de préchauffage :**

Dans le système de préchauffage, la transmission de chaleur se fait à travers un train d'échangeurs de préchauffage. La charge initiale entre dans la batterie d'échangeurs avec une pression de 20 bars et une température de 30 °C. Cette charge est préchauffée à travers huit niveaux d'échangeurs de chaleur. Le processus d'échange thermique peut être effectué en deux voies distinctes en parallèle. Cette disposition permet le traitement de la charge à des niveaux d'efficacité de 50 % ou de 100 %.

- **Section de préfractionnement :**

Le processus de préfractionnement s'effectue dans la colonne 100-T-101. Cette étape clé du traitement vise à diviser le condensat en trois coupes distinctes :

- La coupe de tête (gaz+naphta) ;
- La coupe du naphta stable ;
- La coupe du fond.

- **Section de distillation du condensat :**

La distillation du condensat se déroule en deux sections, une section atmosphérique dans la colonne 100-T-103 et une section sous vide dans la colonne 100-T-104. Son rôle principal est de séparer le condensat en :

- Une coupe de naphta léger ;
- Une coupe de naphta lourd ;
- Une coupe de kérosène ;
- Une coupe de gasoil lourd ;
- Une coupe de gasoil léger.

- **Stabilisation de la coupe du naphta :**

Dans le processus de stabilisation, la coupe de naphta est effectuée par le débutaniseur 100-T-201. Sa fonction principale est de séparer le naphta léger du préfractionneur en GPL et en naphta stabilisé (un mélange avec celui du préfractionneur et de la colonne atmosphérique).

Une fois cette séparation réalisée, le naphta stabilisé est dirigé vers le stockage et le GPL est acheminé vers le dépropaniseur.

- **Dépropanisation et séchage de butane :**

Le processus de dépropanisation est constitué du dépropaniseur T-301. Son rôle essentiel est de séparer du GPL de la section de stabilisation du naphta en butane et propane. Le propane est utilisé comme combustible pour les fours, tandis que le butane est acheminé vers une unité de séchage avant d'être stocké dans les sphères du complexe.

1.4.2. Unité de traitement de kérosène (Unité200) :

L'unité de traitement du kérosène a pour objectif de purifier le kérosène de la colonne de distillation atmosphérique. Ce processus fonctionne sur 03 étapes principales :

- Le traitement du kérosène ;
- Le traitement des résidus caustiques ;
- La préparation et de stockage.

La procédure de traitement du kérosène se déroule comme suit :

- mélange avec de la soude caustique,
- l'élimination des acides naphthéniques par précipitation via un électro finage.
- l'élimination de l'eau et les impuretés à l'aide de filtres et de coalesceurs, tandis que les impuretés supplémentaires et les particules sont éliminées par filtration en argile.

Une fois le traitement achevé, le kérosène traité Jet A1, est acheminé vers le stockage sur site.

1.4.3. Stockage et Transfert des produits (Unité 300) :

L'unité de stockage et de transfert des produits a pour objectif d'assurer la réception, le stockage et l'alimentation en condensat, ainsi que le stockage et le transfert des produits finis. Il est constitué de divers types de bacs de stockage selon la volatilité des produits pétroliers.

Voici le tableau ci-dessous :

Tableau 1.1: les bacs de stockage du complexe Topping. ^[1]

Nom	Produit	Type	Nombre	Capacité (m ³)
301-TK-001/002/003	Condensat	Bac à toit flottant simple	3	25000
304-TK-001/002	Naphta	Bac à toit flottant doublé	2	36600
303-TK-001/002	Kérosène	Bac à toit interne flottant	2	5360
302-TK-001/002	LGO	Bac à toit fix	2	2180

302-TK-003/004	HGO	Bac à toit fixe	2	860
305-TK-001/002	Butane	Sphère	2	1400

1.4.4. Système de torche (Unité 400) :

Le système de torche est essentiel pour évacuer en toute sécurité le gaz combustible en cas d'urgence et pendant le fonctionnement normal des installations industrielles.

Il est composé :

- d'un séparateur ;
- de pompes de condensat ;
- d'une garde hydraulique ;
- d'un système d'allumage ;
- de la torche elle-même avec le brûleur et les pilotes.

Situé à une distance de 500 mètres de l'unité principale, sa capacité de traitement atteint 528,8 tonnes par heure.

1.4.5. Les utilités (Unité 500) :

Les utilités est essentiel pour fournir les énergies nécessaires pour un bon fonctionnement du complexe.

Cette unité est constituée essentiellement de :

- 501 : section de traitement des eaux usées ;
- 502 : section d'alimentation en eau de refroidissement ;
- 503 : section d'alimentation et de drainage d'eau potable ;
- 504 : section du réseau anti-incendie ;
- 505 : section d'alimentation d'air comprimé.

Les principales utilités nécessaires à la mise en service du complexe sont :

- le gaz naturel ;
- l'azote ;
- l'électricité ;
- l'eau industrielle ;
- la vapeur ;
- l'air comprimé.

1.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons proposé une vue générale sur le complexe, mettant en évidence les diverses unités et installations de traitement du condensat au niveau de cette raffinerie. Cette

présentation nous a permis d'avoir un aperçu global de l'organisation et du fonctionnement de ce site industriel. Comprenant les différentes sections et leurs rôles respectifs.

Chapitre 2 : Généralité sur les techniques de refroidissement

2.1. Introduction :

Dans l'industrie pétrolière et gazière, les processus de traitement des fluides nécessitent un contrôle précis de la température, ce qui se fait avec des opérations de réchauffement ou de refroidissement avec ou sans changement de phase, avec changement de phase tels que la condensation ou la vaporisation. Ces manipulations thermiques sont cruciales pour maintenir les fluides dans des conditions optimales de production ou de stockage. Le transfert efficace de chaleur d'un fluide à un autre nécessite une transmission des calories, soit par conduction, convection ou rayonnement.

Ce chapitre se concentre sur les technologies de refroidissement utilisées dans ces industries et explore en détail leurs principes de fonctionnement. Nous examinerons également les différents types d'échangeurs de chaleur ainsi que les modes de circulation des fluides associés à ces systèmes.

2.2. Mode de Transmission de la Chaleur :

2.2.1. La conduction :

- Définition :

La conduction est un processus de transfert d'énergie cinétique des particules à travers la matière sans déplacement de cette dernière. Ce mode de transfert peut se produire à travers un milieu solide de transmission et implique l'utilisation des électrons dans les conducteurs ou des phonons dans les isolants. Ce phénomène résulte des collisions entre les particules voisines, permettant ainsi le transfert d'énergie thermique sans déplacement de matière.^[2] - **Mécanisme :**

En cas de différence de température entre deux parties d'un matériau, les particules à haute énergie (chaudes) transmettent leur énergie aux particules à basse énergie (froides) par collision. Cette opération s'étend dans le matériau jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit obtenu.^[2]

- Loi de Fourier :

La quantité de chaleur transférée par conduction est donnée par la loi de **Fourier** (1822) :

$$\Phi = -\lambda \cdot \text{grad}^{\vec{r}}(T)^{[3]}$$

Où :

Φ : Densité de flux de chaleur (en W/m²) ;

λ : Conductivité thermique du milieu (en W / m .C) ;

T : Température (en °C).

- **Applications :**

Conduction dans les solides : Les métaux sont des bons conducteurs thermiques en raison de leur structure cristalline et de la mobilité élevée des électrons.

Isolation thermique : Les matériaux isolants, comme la laine de verre ou la mousse, ont une faible conductivité thermique et sont utilisés pour réduire les pertes de chaleur.

Électronique : La conduction thermique est essentielle pour dissiper la chaleur des composants électroniques tels que les processeurs et les radiateurs.

2.2.2. La convection :

- **Définition :**

La convection est un mode de transfert d'énergie dans la matière par le déplacement de cette dernière, généralement observé dans les fluides. Ce processus implique un transport d'énergie par le biais d'un écoulement de fluide qui est induit par une différence de masse volumique dans le milieu. La convection nécessite donc la présence d'un milieu fluide de transmission et se produit généralement entre deux phases au moins, l'une d'entre elles étant mobile. On distingue deux principaux types de convection. La convection forcée et la convection naturelle ou libre. La convection forcée survient lorsque le mouvement des phases est induit par une dégradation d'énergie mécanique externe, par contre la convection naturelle se produit lorsque le mouvement est provoqué par les différences de masse volumique résultant du transfert de chaleur lui-même sans intervention externe notable.^[2]

- **Mécanisme :**

- La convection se produit soit par advection, soit par diffusion, ou les deux.
- Elle ne peut pas se produire dans la plupart des solides.
- Dans les liquides et les gaz la convection peut transférer la chaleur assez rapidement même si ces milieux ne sont généralement pas de très bons conducteurs thermiques.

- **Loi de Newton :**

La deuxième loi de Newton définit le flux de chaleur transmis par convection entre une surface et un fluide par la relation suivante :

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_p - T_f) \text{ [3]}$$

Où :

Φ : Flux de chaleur échangé par convection (en W) ;

h : coefficient d'échange thermique par convection (en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) ou en ($\text{kcal/h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) ;

S : aire de la surface d'échange paroi/fluide en (m^2) ;

T_p, T_f : Température de la paroi et température du fluide respectivement (en $^\circ\text{C}$).

- **Application :**

Refroidissement des moteurs : La convection forcée est utilisée pour refroidir les moteurs en transférant la chaleur de la surface métallique vers l'air ou l'eau.

Échangeurs de chaleur : Les échangeurs de chaleur utilisent la convection pour transférer la chaleur entre deux fluides.

Cuisson : La convection naturelle dans les fours et les cuisinières permet de cuire les aliments uniformément.

2.2.3. Le rayonnement :

- **Définition :**

Le transfert thermique par rayonnement se fait sous forme d'ondes électromagnétiques. Contrairement à la conduction et à la convection, il ne nécessite pas de déplacement de matière et n'exige pas de contact entre les objets ou milieux qui échangent l'énergie.

Ce processus n'a pas besoin d'un milieu de transmission pour se propager, ce qui signifie qu'il peut se produire dans le vide. Le rayonnement thermique est caractérisé par une densité d'énergie et un spectre et il est d'autant plus important que la température est élevée : les objets émettent un rayonnement électromagnétique en convertissant leur énergie interne en rayonnement thermique.^[2]

- **loi de STEFAN-BOLTZMAN :**

$$Q_r = S \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)^{[3]}$$

Avec :

Q_r : flux de chaleur échangé par rayonnement entre corps 1 et 2

σ : La constante de Boltzmann = $4.88 \cdot 10^{-8} \text{Kcal} / \text{h} \cdot \text{m}^2 (\text{K})^4$

S : surface du corps 1

ε : Facteur qui tient compte des facteurs d'émissivité des deux corps et des géométries relatives.

- **Application :**

- L'absorption du rayonnement solaire par la Terre, suivie du rayonnement thermique sortant, détermine la température et le climat de notre planète.
- Le rayonnement thermique est également crucial dans les domaines tels que l'astronomie, la conception des panneaux solaires et le chauffage par rayonnement.

2.3. Généralités Sur les Echangeurs de Chaleurs :

2.3.1. Définition des échangeurs de chaleurs :

Un échangeur de chaleur est un appareil conçu pour transférer l'énergie thermique. D'un fluide à un autre, sans qu'il y ait de mélange direct entre les deux fluides. Les fluides en question sont séparés par une paroi solide avec une conductivité thermique élevée qui permet le transfert de chaleur tout en maintenant une séparation physique entre eux.^[4]

2.3.2. Les fonctions des échangeurs de chaleur :

- La fonction de réfrigération :

Il offre la possibilité de refroidir un gaz ou un liquide après son utilisation, par exemple en éliminant les calories stockées par de l'huile lubrification dans un moteur thermique.

Il existe plusieurs types :

- Les réfrigérants (coolers)
- Les aéroréfrigérants (air coolers)
- Les trimcoolers (réfrigérants finals)
- Les chillers
- **La fonction de réchauffage :**

La température d'un fluide ou d'un solide peut être augmentée afin de l'utiliser dans un système, comme le réchauffage de l'huile pour une meilleure circulation dans les tuyaux, ou le réchauffage du gaz avant l'entrée dans une turbine. Il y a différents types tel que les réchauffeurs (heaters), les préchauffeurs (preheaters), les économiseurs (economizers), et les surchauffeurs (superheaters).

- La fonction de condensation :

Il permet le changement d'état d'un fluide par passer de l'état gazeux à l'état liquide. Il y a plusieurs types tels que les condenseurs (condensers), les subcoolers, et les évaporateurs (evaporators).

- La fonction de vaporisation :

Il permet le changement d'état d'un fluide par passer de l'état liquide à l'état gazeux. Différents types existent, tels que les vaporiseurs (vaporizers), les bouilleurs (boilers) et les rebouilleurs (reboilers), et les générateurs de vapeur (steamgenerators).

2.3.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur :

Généralement, les échangeurs reposent sur la capacité à permettre un transfert thermique entre deux fluides selon deux modalités principales :

- L'échange à surface, où les deux fluides sont maintenus séparés par une paroi solide, favorisant ainsi un transfert thermique sans mélange direct.
- L'échange à contact direct ou à mélange, lorsque les deux fluides sont mélangés.

Mais dans la plupart des échangeurs de chaleur, le transfert thermique se réalise à surface.^[5]

Ce processus d'échange de chaleur suit généralement trois étapes distinctes :

- Le fluide chaud cède sa chaleur à la paroi par convection.
- La chaleur est transférée à travers la paroi par conduction.
- La chaleur est transmise de la paroi au fluide froid par convection.

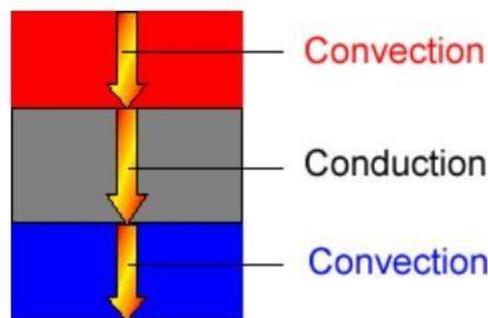


Figure 2.1: Échange de chaleur entre deux fluides dans un échangeur

Lorsqu'un échangeur thermique fonctionne, un fluide chaud transmet sa chaleur à un fluide froid sans qu'il y ait de mélange entre eux. Ces fluides circulent le long d'une paroi de séparation, qui offre une grande surface d'échange, notamment du côté du fluide ayant la conductivité thermique la plus faible, souvent de l'air.^[6]

2.3.4. Les différents types des échangeurs de chaleurs :

2.3.4.1. Les échangeurs à plaques :

Un échangeur à plaques se compose d'une série de plaques métalliques embouties par lesquelles le transfert de chaleur entre deux fluides est effectué.

- Les plaques sont étroitement liées entre un bâti fixe et un bâti mobile. Elles sont placées et orientées par deux barres de support, à la fois inférieures et supérieures.
- Les bâtis serrent les plaques en utilisant des tirants. Un pied support soutient les deux barres guides elles-mêmes.
- Un joint par plaque assure la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques.^[3]

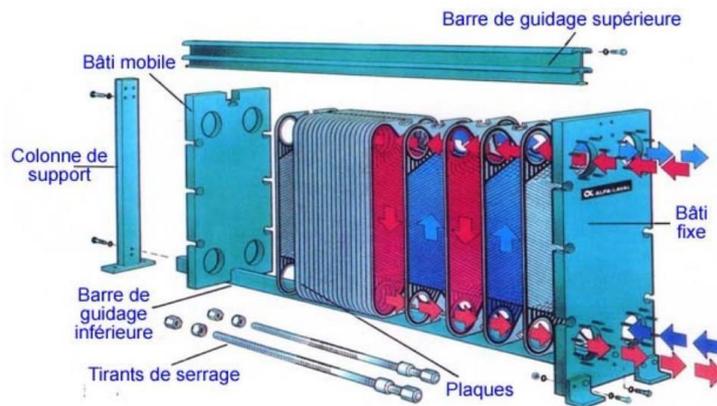


Figure 2.2 : Échangeur à plaques

- **Principe de fonctionnement :**

- L'échangeur de chaleur à plaques permet de transmettre la chaleur entre deux fluides sans les mélanger.
- Les plaques de métal, séparées par une légère distance, sont utilisées pour augmenter la surface d'échange de chaleur.
- La variation de température entre les deux fluides est responsable de la force motrice de l'échangeur.

- **Applications :**

- Chauffage et refroidissement : les échangeurs à plaques sont utilisés afin de chauffer ou refroidir des liquides ou des gaz.
- Industrie et génie climatique : Ils sont fréquemment utilisés dans différentes industries et systèmes de climatisation.

- **Avantages :**

- Efficacité thermique : grâce à leur vaste surface d'échange, ils proposent des performances thermiques élevées.
- Compacité : ce sont des échangeurs compacts qui consomment moins d'espace que d'autres types.
- Facilité d'entretien : il est possible de démonter les plaques afin de les nettoyer ou de les remplacer.

2.3.4.2. Les échangeurs tubulaires :

Un échangeur de chaleur tubulaire utilise des tubes pour transférer de la chaleur entre deux fluides circulant à l'intérieur et à l'extérieur de ces tubes. Les fluides peuvent être des liquides, des gaz ou une combinaison des deux.

- **Principe de fonctionnement :**

- Les tubes sont placés dans une structure connue sous le nom de calandre.
- Ces tubes permettent aux fluides d'échanger de la chaleur sans se mélanger.

- Il est possible d'utiliser des tubes droits ou courbés en forme de U ou de serpentín afin d'optimiser la surface d'échange de chaleur et d'améliorer l'efficacité de l'échangeur.
- L'échangeur tubulaire vise principalement à récupérer de la chaleur provenant de liquides ou de gaz.
- Il a la possibilité de fonctionner en co-courants (les fluides traversent l'échangeur dans le même sens), en contre-courants (les fluides traversent l'appareil dans le sens opposé) ou en courants croisés.

- **Applications :**

- Condenseur : convertit un gaz en liquide en mettant de la vapeur en condensation sur une surface froide.
- Refroidisseur : Refroidit un liquide.
- Bouilleur : Vaporise un mélange de liquides ou liquides et solides.
- Réchauffeur : Un volume de liquide ou de gaz est chauffé, même dans des conditions extrêmes.
- Évaporateur : Concentre une solution en changeant son état de liquide à gazeux.
- Cristalliseur : Isole un produit pour le récupérer sous forme solide.

- **Avantages :**

- Robustesse et Fiabilité : Les échangeurs tubulaires sont extrêmement solides et fiables. Leur capacité à supporter de grandes variations de température ne compromet pas leurs performances.
- Résistance à la Pression : Conçus à partir d'acier inoxydable, d'alliage de nickel ou d'Incoloy, ces échangeurs sont capables de supporter des pressions élevées.
- Polyvalence : Ils ont la capacité de transmettre de la chaleur entre divers fluides tels que le gaz/gaz, le liquide/liquide ou le liquide/gaz.
- Efficacité Thermique : Les échangeurs tubulaires présentent un coefficient d'échange thermique très élevé grâce à leur conception. Ils favorisent une transmission efficace de chaleur entre les fluides.
- Adaptabilité : Il est possible de dimensionner et de configurer les échangeurs tubulaires afin de satisfaire les exigences particulières de chaque application.
- Facilité d'Entretien : Leur conception modulaire permet un démontage aisé pour le nettoyage et la maintenance.
- Résistance aux Températures Extrêmes : Fabriqués en matériaux résistants, ils peuvent fonctionner dans des conditions extrêmes.

- **Types :**

- *Les échangeurs à faisceau tubulaire :*

Les échangeurs à faisceau tubulaire se composent généralement de trois éléments principaux :

- **Le faisceau tubulaire** : est constitué de deux à plusieurs centaines de tubes. Ces tubes sont soit soudés, soit dudgeonnés à leur extrémité sur une plaque, assurant ainsi une connexion étanche et robuste.
- **La calandre** : un tube cylindrique de gros diamètre, dans laquelle est logé le faisceau tubulaire. Elle offre un soutien structurel et facilite le passage des fluides à travers le faisceau.
- **Les boîtes de distribution et de retour** : ont fixées aux extrémités du faisceau tubulaire. Elles jouent un rôle crucial en servant de collecteur pour le fluide circulant à l'intérieur des tubes, assurant ainsi une distribution uniforme du fluide et un retour efficace vers le circuit de circulation.

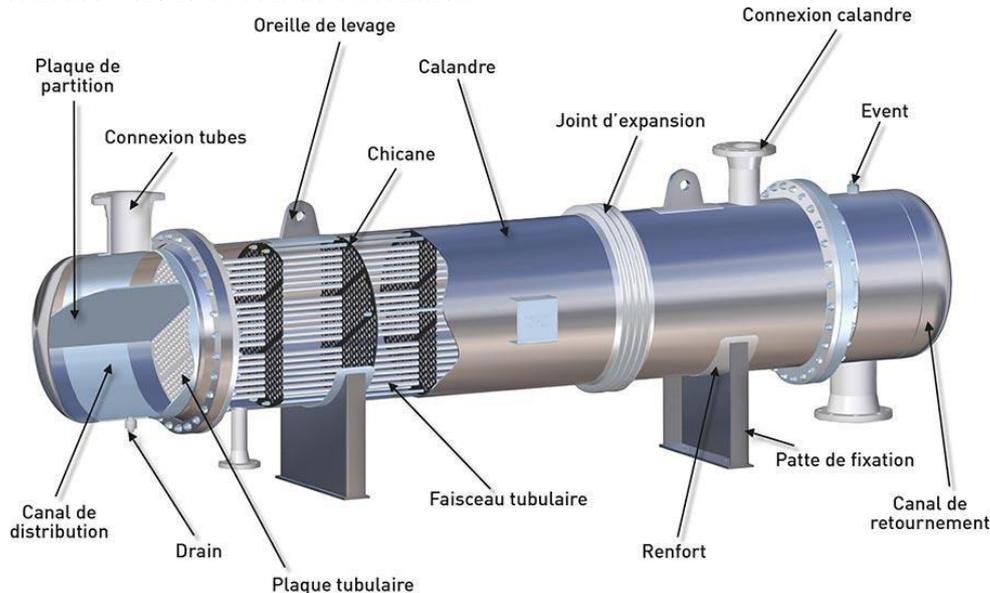


Figure 2.3: Composition d'un échangeur à faisceau tubulaire

- **Les échangeurs de chaleur à faisceau immergé de type KETTLE (AKT) :**

Les échangeurs à faisceau immergé de type KETTLE sont utilisés lorsqu'il est nécessaire de vaporiser partiellement ou totalement un liquide, tout en assurant la séparation efficace des deux phases. Ce type d'échangeur est principalement constitué :

- D'un faisceau de tubes verticaux immergés dans le liquide au fond de la colonne de distillation.
- À l'intérieur de ces tubes, un fluide chaud, tel que de la vapeur ou un fluide thermique, circule, entraînant ainsi l'évaporation partielle du liquide présent dans la colonne.
- La circulation naturelle se produit car la masse volumique du liquide dans le pied de la colonne est plus grande que celle du mélange liquide-vapeur dans les tubes.
- Le niveau de liquide dans la colonne est maintenu généralement au même niveau que la plaque tubulaire supérieure de l'échangeur.

Ce genre d'appareil supporte des niveaux de vaporisation élevés, mais son principal inconvénient réside dans le temps de séjour relativement long du liquide, ce qui entraîne l'encrassement.

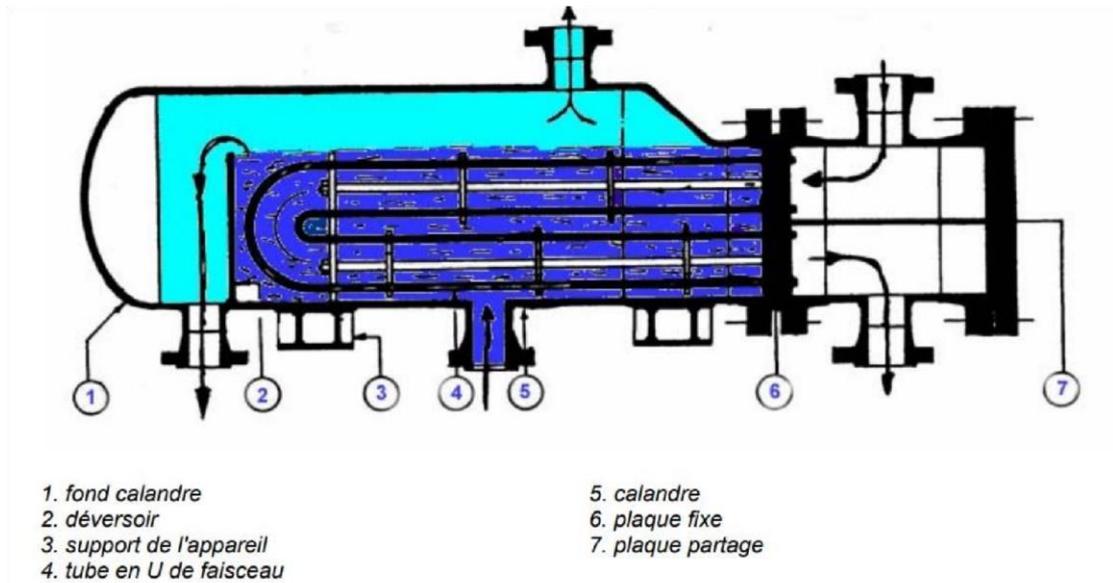


Figure 2.4: Échangeur type KETTLE

- **Les échangeurs à tête flottante :**

Les échangeurs à tête flottante se composent de :

- Un faisceau de tubes disposés à l'intérieur d'une enveloppe, également connue sous le nom de coque.
- La tête flottante qui se trouve à l'extrémité des tubes, souvent désignée comme la plaque de tube flottante, qui est fixée solidement.

Le fluide chaud circule à l'intérieur des tubes, tandis que le fluide froid circule dans la coque autour des tubes. Ce type d'échangeur est caractérisé par la capacité de la tête flottante à permettre une expansion thermique indépendante des tubes par rapport à la coque, réduisant ainsi les contraintes thermiques potentielles.

L'échangeur à tête flottante est bien adapté aux fluides très encrassants ou visqueux, offrant ainsi une solution efficace pour les situations où le nettoyage régulier est difficile. De plus, la tête flottante résout les problèmes associés au stress thermique.

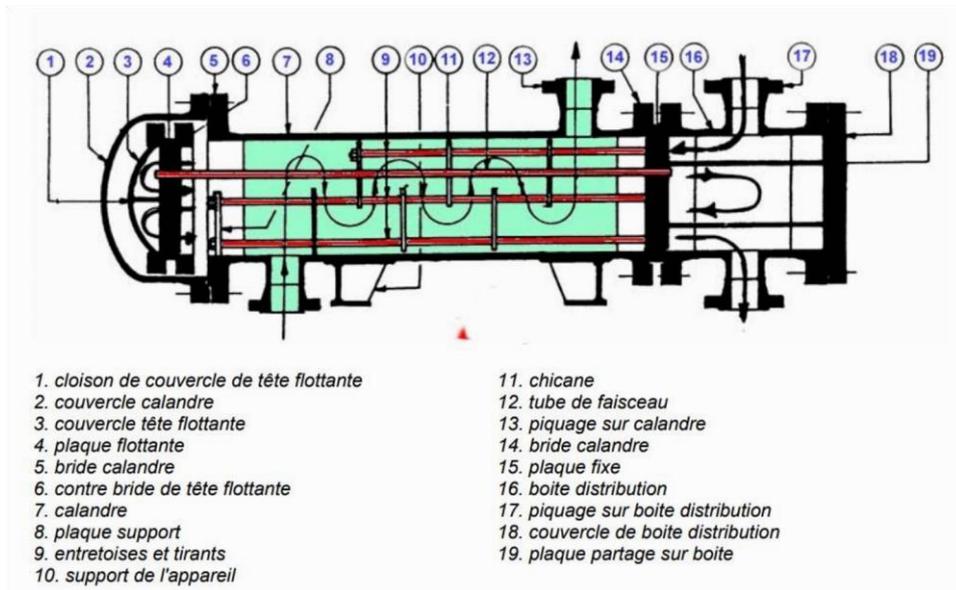


Figure 2.5: Échangeur à tête flottante

- Les échangeurs à tubes en "U" :

La forme en "U" des tubes permet une expansion thermique indépendante par rapport à la coque, réduisant ainsi les contraintes thermiques et améliorant la durabilité de l'échangeur. Ce type est constitué d'un faisceau de tubes en "U" fixé à une plaque tubulaire en acier au carbone, peut être facilement extrait en démontant la tête frontale, facilitant ainsi l'entretien et le remplacement si nécessaire.



Figure 2.6: Exemple d'un échangeur à tubes en "U"

Ces échangeurs sont particulièrement adaptés aux fluides très encrassants ou visqueux, et leur construction en acier inoxydable AISI 316L, en cuivre ou en acier au carbone les rend durables et adaptés à une variété de conditions.

Le nombre de tubes est inférieur à celui des autres dispositifs en raison du diamètre minimal de cintrage des tubes. Il sera nécessaire d'utiliser ces faisceaux à chaque fois que le fluide du côté du tube est propre, par exemple : Gazole, eau douce, gaz.

2.3.4.3. Les aéroréfrigérants :

Un aéroréfrigérant est un appareil qui transfère de l'énergie thermique d'un fluide intérieur à l'air extérieur. Il est constitué d'une zone d'échange et d'un dispositif de ventilation.

- **Principe de fonctionnement :**

- Les aéroréfrigérants permettent de transmettre la chaleur d'un fluide interne (liquide ou gaz) à l'air extérieur grâce à une surface d'émergence thermique.
- Ils sont composés de tubes, d'ailettes et d'un moyen de ventilation (ventilateur ou soufflerie).
- Les tubes sont remplis de liquide chaud, tandis que l'air extérieur est évacué par les ailettes pour évacuer la chaleur.

- **Application :**

- Aérocondenseurs : utilisés dans les installations électriques afin de faire condenser la vapeur d'eau à la sortie de la turbine.
- Tours de refroidissement : refroidissent l'eau chaude en la vaporisant partiellement dans l'air.
- Air-coolers : utilisés pour réduire la température de l'eau des circuits de refroidissement des moteurs thermiques.

- **Avantages :**

- Efficacité thermique : les aéroréfrigérants présentent un coefficient d'échange thermique très élevé grâce à leur conception.
- Flexibilité : ils peuvent être personnalisés pour des fluides particuliers et des conditions différentes.
- Entretien aisé : certains types offrent une facilité de nettoyage des ailettes et des tubes.
- Réduction des coûts d'exploitation : en éliminant la chaleur dans l'air, ils jouent un rôle dans la conservation de l'énergie.

2.4. Les Modes de Circulation des Fluides :

Les échangeurs thermiques peuvent être classés en fonction du sens de l'écoulement des fluides. Il existe trois principaux modes de circulation des fluides :

2.4.1. Circulation à co-courant (courant parallèle) :

La circulation à co-courant est un mode de circulation dans un échangeur de chaleur où les deux fluides impliqués circulent dans le même sens. Ces fluides entrent et sortent du même côté de l'échangeur, facilitant ainsi une circulation parallèle des deux fluides.

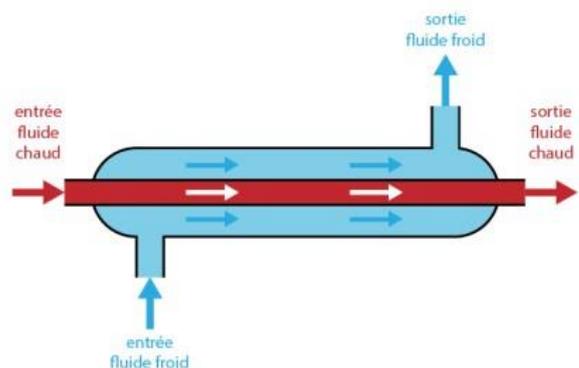


Figure 2.7: Mode de circulation à co-courant

Dans un échangeur co-courant, la température de sortie du fluide froid est nécessairement moins élevée que celle du fluide chaud.

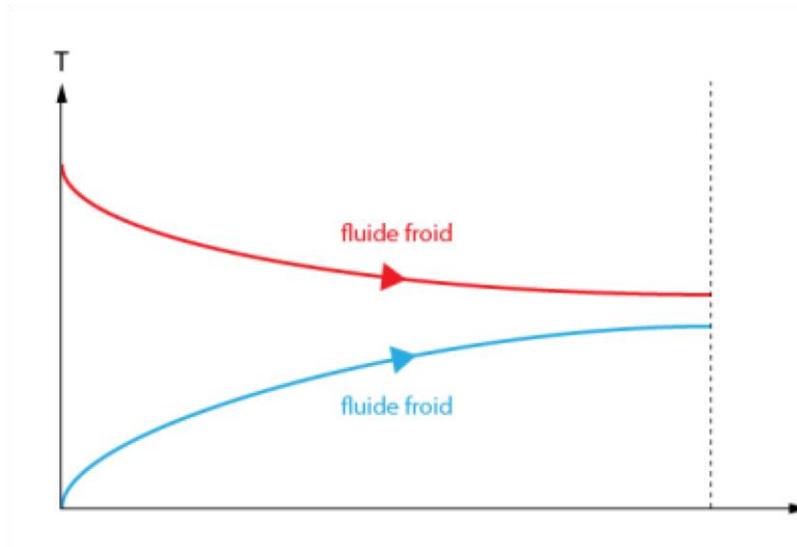


Figure 2.8: Ecoulement co-courant dans un échangeur tubulaire

2.4.2. Circulation à contre-courant :

La circulation contre-courant est un mode de circulation où les deux fluides circulent parallèlement mais dans des sens opposés. Ce mode de circulation est considéré comme l'un des plus favorables pour les échangeurs de chaleur en raison de son efficacité thermique accrue. L'avantage principal d'un échangeur à contre-courant par rapport au co-courant est qu'il nécessite une surface d'échange plus petite pour le même flux thermique.

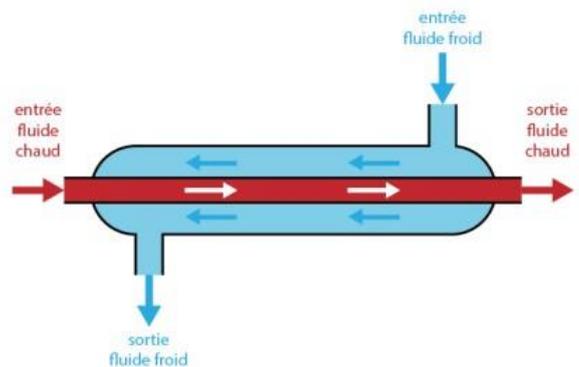


Figure 2.9 : Mode de circulation à contre-courant

Dans ce mode de circulation, la température de sortie du fluide froid peut être plus élevée que celle du fluide chaud.

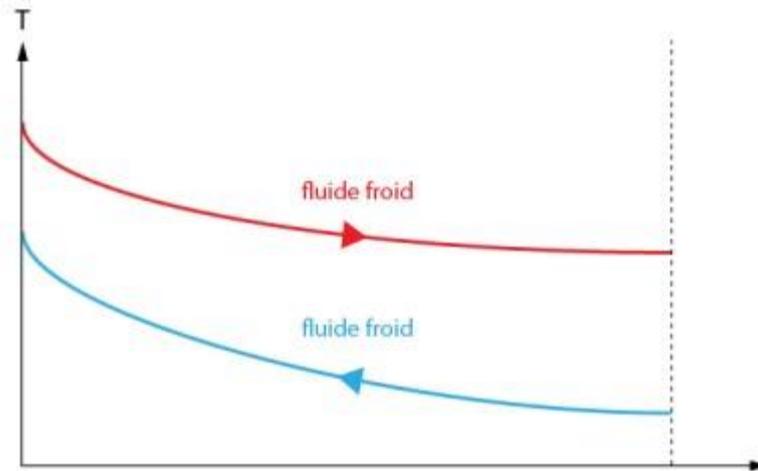


Figure 2.10: Écoulement contre-courant dans un échangeur tubulaire

2.4.3. Circulation à courants croisés :

Dans un échangeur de chaleur à courants croisés, les deux fluides circulent dans des directions perpendiculaires l'un par rapport à l'autre. Ce type d'échangeur est généralement utilisé lorsqu'un gaz circule autour des tubes d'un faisceau à l'intérieur desquels s'écoule un liquide. Ce type est moins courant que d'autres modes de circulation, mais il est utilisé dans certaines applications spécifiques.

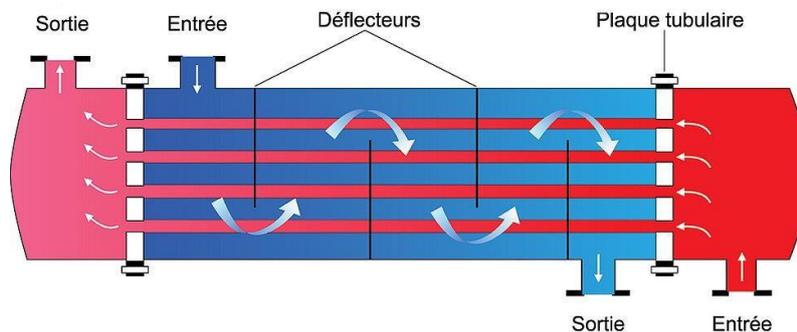


Figure 2.11: Mode de circulation à courants croisés

2.5. Problèmes de Fonctionnement :

2.5.1. L'encrassement :

L'encrassement est un phénomène qui affecte la performance des échangeurs de chaleur. Il se traduit par l'accumulation et le dépôt de matières indésirables sur les parois des échangeurs. Ces particules peuvent s'agir de tartre, de solides en suspension, de sels non solubles et même d'algues.

Ce phénomène, fréquemment inévitable dans les installations industrielles, engendre deux types d'impacts :

- Une augmentation des pertes de charge causées par le frottement sur les parois, suivie d'une diminution de la section de passage du fluide dans l'appareil.

- Une dégradation des échanges thermiques par création d'une résistance thermique additionnelle entre les fluides chauds et froids.^[4]



Figure 2.12 : Encrassement des refroidisseurs à eau du complexe RA2K

2.5.2. La corrosion :

La corrosion est la dégradation des métaux par un milieu agressif, résultant d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert thermique du matériau et le fluide en écoulement. Les fluides corrosifs peuvent comprendre une variété de substances telles que des sels, des acides, des bases, etc.^[4]

De diverses façons, la corrosion peut entraîner la dégradation des matériaux, la création de fissures et la diminution de l'efficacité du transfert de chaleur. Il existe différents types de corrosion fréquente comprenant :

- **Corrosion galvanique** : Survient lorsqu'un mélange de deux métaux différents entre en contact dans un milieu corrosif, ce qui entraîne une électrochimie.
- **Corrosion par piqûres** : La formation de petits trous à la surface du matériau.
- **Corrosion par érosion** : La circulation rapide du fluide provoque l'usure des surfaces métalliques.
- **Corrosion par cavitation** : Les surfaces sont endommagées par la formation de bulles de vapeur qui implosent.

2.5.3. Les vibrations :

Les vibrations sont des mouvements oscillatoires des composants, généralement des tubes, causés par des processus dynamiques dans l'écoulement des fluides. Il s'agit des pulsations de pression turbulentes, de l'initiation et de la séparation des tourbillons des tubes en écoulement transversal, de l'interaction hydroélastique des éléments de transmission de chaleur (tubes) avec l'écoulement, ainsi que des phénomènes acoustiques. La vitesse d'écoulement et les caractéristiques vibratoires des tubes peuvent entraîner plusieurs types de vibrations en même temps.

2.6. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a mis en lumière les différentes techniques de refroidissement qui utilisent des échangeurs de chaleur. Ces dispositifs remplissent plusieurs fonctions, que ce soit sans changement de phase comme le refroidissement et le réchauffement, ou avec changement de phase comme la condensation et la vaporisation. Nous avons également examiné les différents modes de circulation des fluides à travers ces échangeurs : co-courant, contrecourant

et courants croisés, chacun offrant des avantages spécifiques en termes d'efficacité de transfert de chaleur. De plus, nous avons mis en évidence l'importance cruciale de la conception et de la fabrication précises de ces échangeurs, en tenant compte des températures et des pressions spécifiques afin de garantir un fonctionnement optimal et d'éviter les différents problèmes, tels que l'encrassement, la corrosion et les vibrations.

Chapitre 3 : Technologie des aéroréfrigérants

3.1. Introduction :

Les aéroréfrigérants se présentent comme des échangeurs utilisant l'air ambiant froid comme fluide réfrigérant. Ce dernier est aspiré par des ventilateurs, puis traverse des faisceaux de tubes généralement ailetés. À l'intérieur de ces tubes circule le fluide à refroidir ou à condenser. Les flux d'air et de fluides se déroulent en courants croisés.

Ces dispositifs entrent en concurrence avec les réfrigérants à eau et sont particulièrement adaptés lorsque l'eau est rare ou coûteuse et lorsqu'il y a des préoccupations environnementales. En tant qu'équipements d'échange thermique, ils répondent à ces besoins spécifiques.

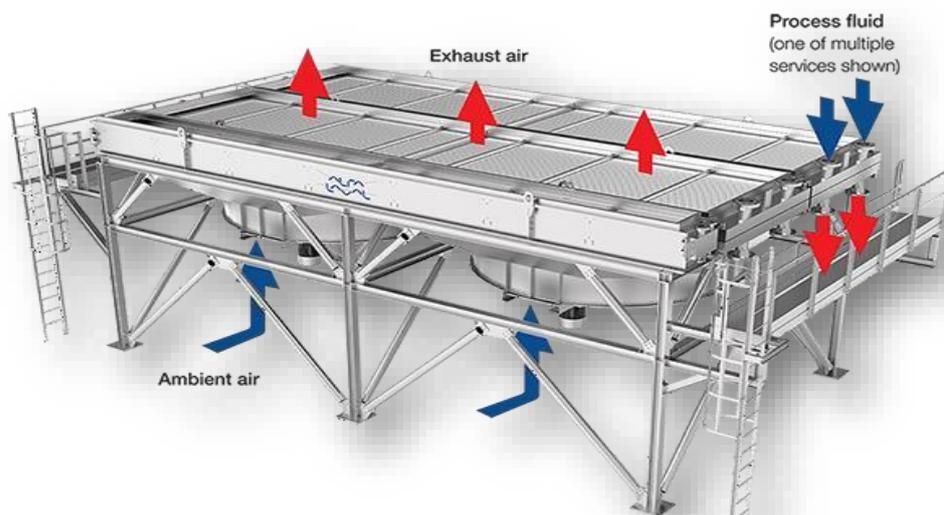


Figure 3.1: Principe de fonctionnement d'un aéroréfrigérant

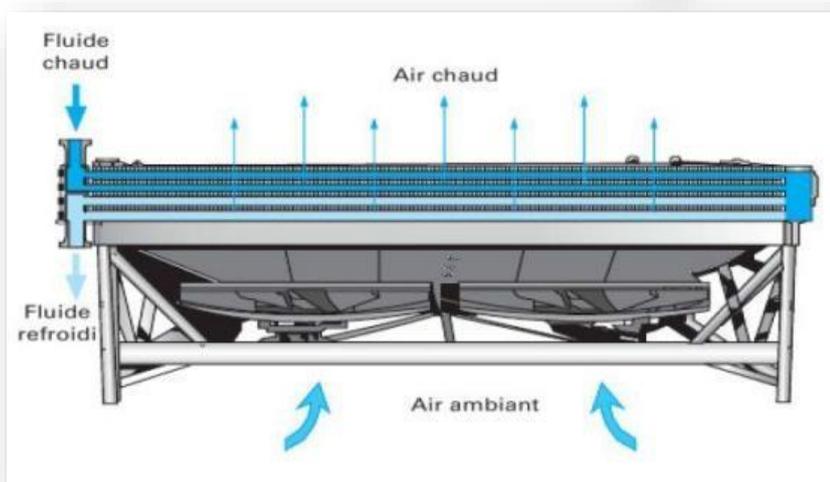


Figure 3.2 : Schéma d'un aéroréfrigérant

3.2. Les Composants d'un Aéroréfrigérant :

En général, les aéroréfrigérants se composent d'un faisceau de tubes à ailettes avec des collecteurs rectangulaires aux deux extrémités des tubes. Un ou plusieurs ventilateurs fournissent l'air de refroidissement. Habituellement, l'air est soufflé vers le haut à travers un faisceau de tubes horizontaux. Les ventilateurs peuvent être à tirage for c  ou induit, selon que l'air est poussé ou aspiré à travers le faisceau de tubes. Un plénum entoure l'espace entre les ventilateurs et le faisceau de tubes pour diriger l'air. L'ensemble est généralement monté sur des pieds ou sur un porte-tubes « pipe rack ».^[6]

Les ventilateurs sont généralement entraînés par des moteurs électriques via un certain type de réducteur de vitesse. Les réducteurs de vitesse couramment utilisés comprennent les courroies trapézoïdales, les courroies HTD « High Torque Drive » ou les engrenages à angle droit. L'ensemble d'entraînement du ventilateur est porté par un système de support mécanique en acier. En outre, chaque ventilateur est généralement équipé d'un interrupteur de vibration pour arrêter automatiquement le ventilateur en cas de déséquilibre.^[6]

3.2.1. Les faisceaux :

Les faisceaux se composent de tubes généralement ailetés, de boîtes de distribution et de châssis assurant la solidité de l'ensemble.

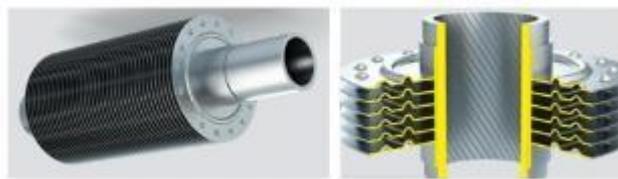


Figure 3.3: Tube aileté



Figure 3.4 : Faisceau d'un aéroréfrigérant du complexe RA2K

3.2.1.1. Tubes à ailettes :

Les faisceaux tubulaires des refroidisseurs d'air se composent généralement de tubes à ailettes. Les tubes de base sont choisis parmi les tubes d'échangeurs de chaleur. Le diamètre nominal le plus couramment utilisé est de 1 pouce, avec une épaisseur minimale définie par la

jauge BWG 14 pour l'acier au carbone et BWG 16 pour les aciers inoxydables. Des diamètres plus grands (1 1/4 pouce, 1 1/2 pouce, 2 pouces) peuvent également être utilisés. [6]

Les longueurs habituelles varient de 20 à 30 pieds. Pour certaines unités, telles que celles de liquéfaction du gaz naturel, des longueurs de 40 et 50 pieds peuvent être fournies par certains fabricants.

L'agencement des tubes est en pas triangulaire droit. Pour des tubes de diamètre nominal de 1 pouce, munis d'ailettes hautes de diamètre standard de 2 1/4 pouces, le pas entre les axes des tubes est choisi parmi les valeurs suivantes : 2 3/8 pouces, 2 1/2 pouces, 2 5/8 pouces, 2 3/4 pouces ; les plus couramment utilisées sont de 2 1/2 pouces et 2 5/8 pouces.

Les ailettes sont généralement en aluminium, circulaires et enroulées en hélice autour du tube de base. Leurs hauteurs standard, mesurant la distance entre le pied et le sommet, sont de 3/8 pouce, 1/2 pouce et 5/8 pouce ; cette dernière hauteur est la plus couramment utilisée et conduit à un diamètre de 2 1/4 pouces pour un tube de base de 1 pouce.

L'ajout d'ailettes offre une surface d'échange complémentaire intéressante du côté de l'air. Cependant, les ailettes constituent une résistance à la conduction, diminuant l'effet de surface. L'effet global est mesuré par l'efficacité des ailettes, qui dépend de la géométrie et du matériau de fabrication des ailettes.

Les paramètres déterminant la surface ailetée sont la taille des ailettes et le nombre d'ailettes par unité de longueur (pas des ailettes). Le nombre d'ailettes par pouce peut varier de 7 à 11 ; les valeurs les plus courantes sont de 10 et 11 ailettes par pouce. En moyenne, le rapport entre la surface ailetée et la surface de base est de 20.

-  paisseur des Tubes :

Pour les tubes ayant un diamètre extérieur compris entre 1 pouce (25,4 mm) et 1 1/2 pouce (38,1 mm), l'épaisseur de paroi ne doit pas être inférieure aux valeurs spécifiées dans le tableau suivant :

Tube material	Minimum wall thickness
Carbon steel or ferritic low-alloy steel (max. 9 % chromium)	2,0 mm (0,083 inch)
High-alloy [austenitic, ferritic and austenitic/ferritic (duplex)] steel	1,6 mm (0,065 inch)
Non-ferrous material	1,6 mm (0,065 inch)
Titanium	1,2 mm (0,049 inch)

Figure 3.5 : Exigences minimales d'épaisseur de paroi pour les matériaux du tube

• Types d'ailettes :

Les types des ailettes sont :

1) Ailette type L :

La forme L est obtenue par enroulement sous tension d'un feuillard dont une partie constitue le pied de l'ailette plaqué sur le tube. La qualité de contact ailette-tube laisse à désirer, la température maximum d'utilisation est de 120 °C. ^[4]

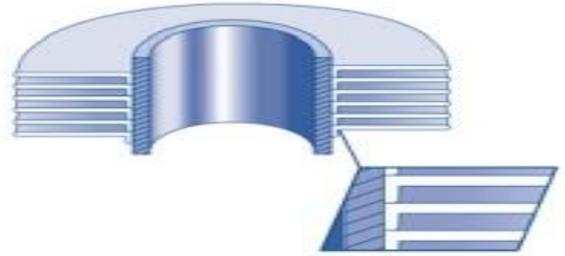


Figure 3.6 : Ailette type L

2) Ailette type L avec moletage :

La méthode de fabrication est analogue à celle du type L, avec un moletage du pied de l'ailette effectué simultanément à l'enroulement, ce qui améliore le contact entre l'ailette et le tube. La plage de température maximale d'utilisation se situe entre 175 et 250°C. ^[4]

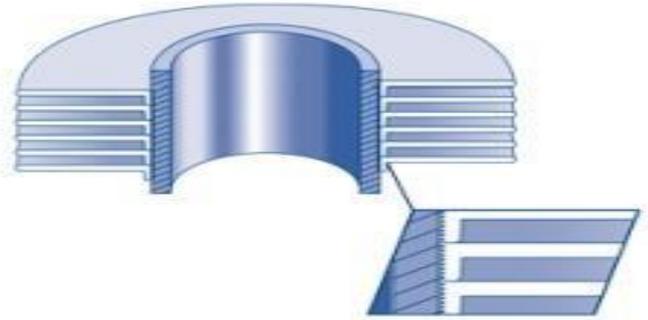


Figure 3.7 : Ailette type L avec moletage

3) Ailette type double L :

Il est produit de la même manière que le tube à ailettes de type « L », à la différence que les pieds des ailettes se chevauchent, enveloppant ainsi complètement le tube de base, ce qui garantit une excellente résistance à la corrosion. Ce type de tube est souvent utilisé pour remplacer les tubes à ailettes extrudées, bien plus coûteux, dans des environnements corrosifs. ^[4]

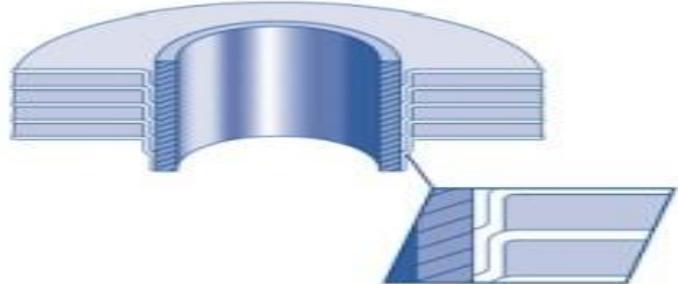


Figure 3.8 : Ailette type double L

4) Ailette encastrée type G :

Pour l'ailette d'aluminium le tube de base est équipé d'une rainure hélicoïdale. L'assemblage garantit un contact de qualité entre l'ailette et le tube. Le maximum de température d'utilisation est de 400°C. ^[4]

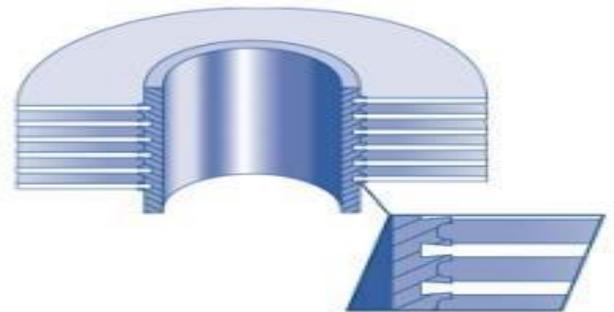


Figure 3.9 : Ailette type G

5) Ailette extrudée sur tube bimétallique :

Il s'agit d'une ailette à tube bimétallique composée d'un tube externe en aluminium et d'un tube interne qui peut être dans pratiquement tous les matériaux. En roulant le matériau à partir de l'extérieur du tube externe, on obtient une ailette complète qui présente d'excellentes propriétés de transfert de chaleur et une longue durée de vie. L'ailette extrudée garantit une protection anticorrosion exceptionnelle du tube de base. ^[6]

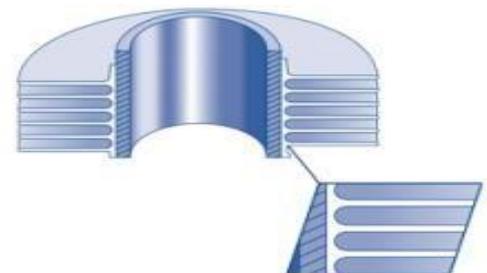


Figure 3.10 : Ailette type extrudée

3.2.1.2. Les boîtes de distributions ou collecteurs :

Les boîtes ou collecteurs sont utilisés pour introduire et répartir le liquide chaud à l'intérieur des tubes, puis pour récupérer le fluide réfrigéré ou condensé à la sortie. À l'exception des collecteurs cylindriques, chaque boîte est équipée d'une plaque tubulaire dans laquelle les extrémités des tubes sont fixées par dudgeonnage ou soudage. Les plaques de séparation soudées sont utilisées pour répartir le fluide en une ou plusieurs passes. Les boîtes ou collecteurs sont fixées sur les tubulures d'entrée et de sortie du fluide.

Il existe différents types de boîtes ou collecteurs qui peuvent être personnalisés en fonction des conditions de service et des exigences de maintenance :

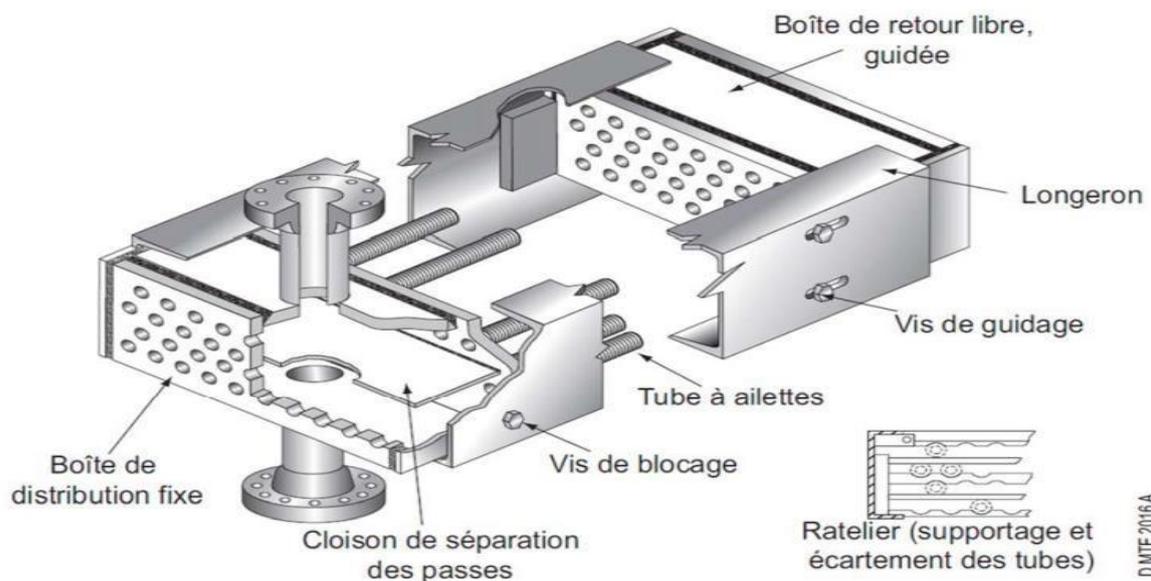


Figure 3.11 : Vue générale pour les boîtes de distribution et collecteur

- **Boîtes ou collecteurs à bouchons :**

Il s'agit du modèle le plus répandu et son prix est modéré. Il se compose d'une boîte parallélépipédique soudée avec une ou plusieurs tubes.

La plaque avant est équipée de trous en alignement avec les tubes fixés sur la plaque tubulaire, ce qui permet un nettoyage mécanique de l'intérieur des tubes. Ils peuvent être utilisés jusqu'à des pressions d'opération d'environ 200 bars. ^[6]

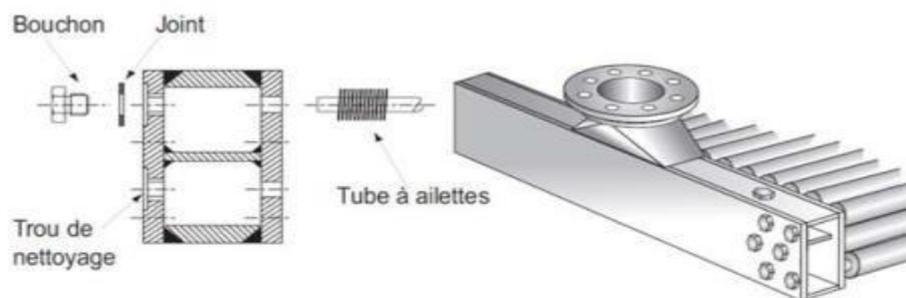


Figure 3.12 : Boîte ou collecteur à bouchon

- **Boîtes ou collecteurs à couvercle démontable :**

Dans le cas de fluides encrassant ou corrosifs, il est nécessaire de réaliser des vérifications régulières. Pour des pressions élevées, il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur des boîtes et le boulonnage, ce qui rend ce type de collecteur plus coûteux. Par conséquent, son usage est restreint à des pressions d'environ 40 bars.

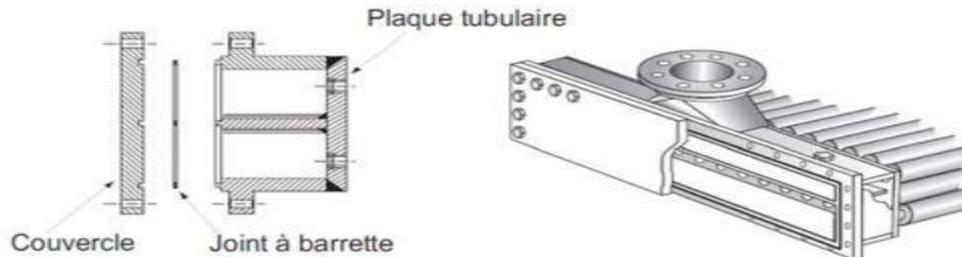


Figure 3.13 : Boite ou collecteur à couvercle a démontable

- **Collecteurs cylindriques :**

Les collecteurs cylindriques appelés "Pipe headers" sont généralement employés pour des pressions élevées supérieures à 200 bars, avec une épaisseur appropriée. Le réseau de tubes est composé de tubes en épingles ont des ailes droites, les extrémités d'entrée et de sortie étant fixées sur des bossages solidaires des collecteurs.

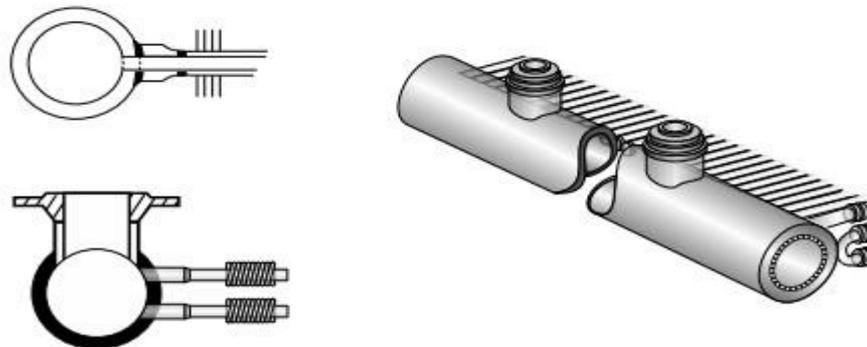


Figure 3.14 : Collecteur cylindrique

- **Collecteurs à bonnet :**

Le collecteur est composé d'un bonnet semi-circulaire soudé ou boulonné sur la calotte tubulaire. La construction soudée est abordable et offre l'avantage de réduire les risques de fuites avec l'extérieur ; elle est utilisée uniquement pour des services propres avec une faible pression opératoire.

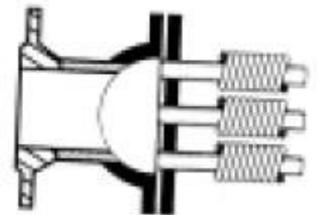


Figure 3.15 : Collecteur à bonnet

- **Collecteurs manifold :**

Lorsqu'il y a une faible perte de charge allouée, notamment pour les services de condensation, on soude directement un collecteur de grand diamètre sur la plaque tubulaire, ce qui garantit une distribution optimale de la vapeur dans chaque tube du faisceau.

3.2.2. Ventilateurs :

L'air froid ambiant est réparti sur les faisceaux tubulaires grâce à la rotation de ventilateurs dont le diamètre varie de 6 à 18 pieds. Les dispositifs de ventilation comprennent des ventilateurs propulsés par des moteurs et des systèmes de régulation du débit d'air. Le rotor est constitué d'un moyeu fixé sur l'arbre du ventilateur, de pales fixées sur le moyeu et un mécanisme de commande dans certains cas. Il y a 4 à 6 pales, fabriquées en aluminium, en alliage léger ou en résine polyester armée de fibres de verre.

[6]

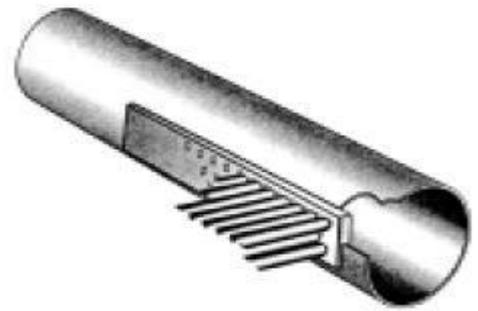


Figure 3.16 : Collecteur manifold

Pour garantir une distribution adéquate de l'air sur toute l'aire faciale (la zone face aux ventilateurs) des faisceaux, il est nécessaire que la surface occupée par les ventilateurs soit au moins 40% de cette aire. En ce qui concerne les tubes de grande longueur, d'environ 50 ft, il est nécessaire d'installer trois ventilateurs dans le sens de la longueur des faisceaux.



Figure 3.17 : Ventilateur

Selon l'API 661, il est nécessaire d'installer au moins deux ventilateurs dans le sens de la longueur d'un faisceau ou d'un arrangement de faisceaux afin de garantir une réfrigération minimale en cas d'arrêt d'un ventilateur. Cependant, pour des tubes de moins de 15 ft, il est possible d'utiliser un seul ventilateur.

3.2.3. Chambres de distribution d'air « Pl nums » :

Les ventilateurs distribuent l'air débité sur les faisceaux (air forcé) ou le collectent à la sortie des faisceaux (air induit)   travers une chambre ou un caisson.

Pour garantir une meilleure répartition de l'air sur toute la surface du visage, la chambre ou la hotte peut être parallélépipédique ou pyramido-tronconique. Un élément cylindrique à l'intérieur duquel se trouve le ventilateur est fixé sur la hotte et forme l'anneau de ventilation.

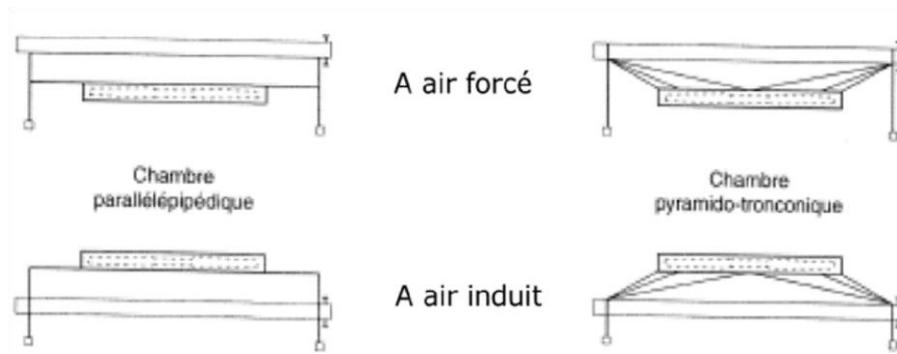


Figure 3.18 : Chambre de distribution air forcé et induit.

3.2.4. Les structures :

Les colonnes, les contreventements et les traverses constituent la structure qui supporte l'aéroréfrigérant à une hauteur adéquate au-dessus du sol afin de permettre au volume d'air nécessaire d'entrer en dessous à une vitesse d'approche suffisamment faible pour permettre un fonctionnement sans obstacle du ventilateur et d'empêcher la recirculation indésirable de l'air chaud.

Dans les raffineries de pétrole et les usines chimiques, il est courant de placer les aéroréfrigérants au-dessus et de les soutenir par des supports de tuyaux, avec d'autres équipements occupant l'espace sous les supports de tuyaux. Les aéroréfrigérants sont spécialement conçus pour supporter les charges adéquates de vent, de neige, sismiques, de tuyauterie, qu'elles soient permanentes ou vives. [6]

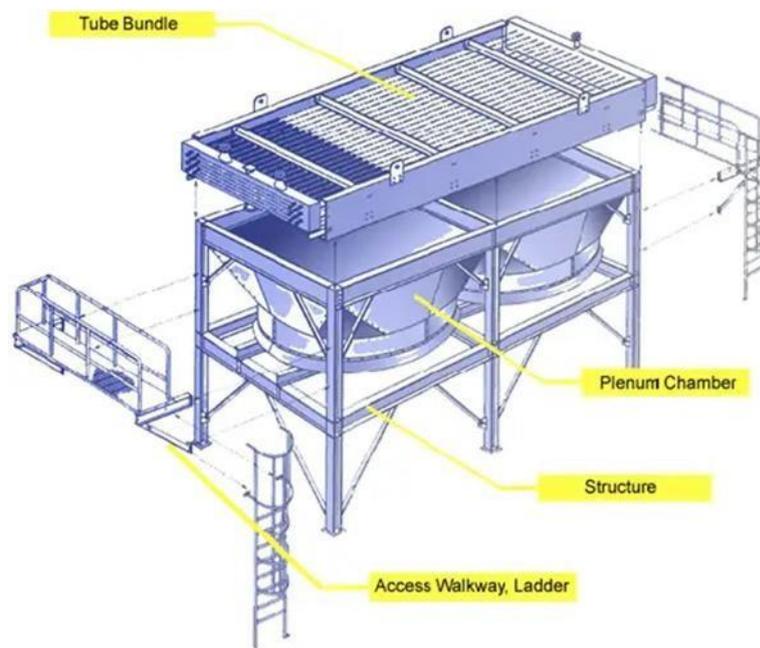


Figure 3.19 : Arrangement d'un aéroréfrigérant

3.2.5. L'ensemble des aéroréfrigérants :

Unité est le nom donné à l'ensemble d'aéroréfrigérants installés pour un service spécifique. Cet ensemble est composé d'une ou plusieurs baies (ou sections) parallèles, chaque baie comportant un ou plusieurs faisceaux parallèles. Une série d'unités regroupées forme un banc.

Il est important de considérer les conditions de leur environnement immédiat qui influencent l'alimentation en air lors des études d'implantation des aéroréfrigérants : les vents dominants, les obstacles qui font écran à proximité, les mouvements de terrain, les immeubles, les salles de contrôle ou les machines, les structures, les fours, les colonnes, etc. Si des unités adjacentes doivent être installées, il est nécessaire que l'altitude des faisceaux soit la même ainsi que le type de tirage. Il est recommandé d'éviter la proximité de sources d'air chaud, comme des fours



Figure 3.20: Vue générale d'un ensemble des aéroréfrigérants

3.3. Les Technologies des Aéroréfrigérants :

L'American Petroleum Institute Standard API 661 établit les normes relatives aux matériaux utilisés, aux règles d'études, de fabrication, d'inspection, d'essais, etc., pour l'utilisation d'aéroréfrigérants dans l'industrie pétrolière.

Les faisceaux peuvent être horizontaux, verticaux ou inclinés.

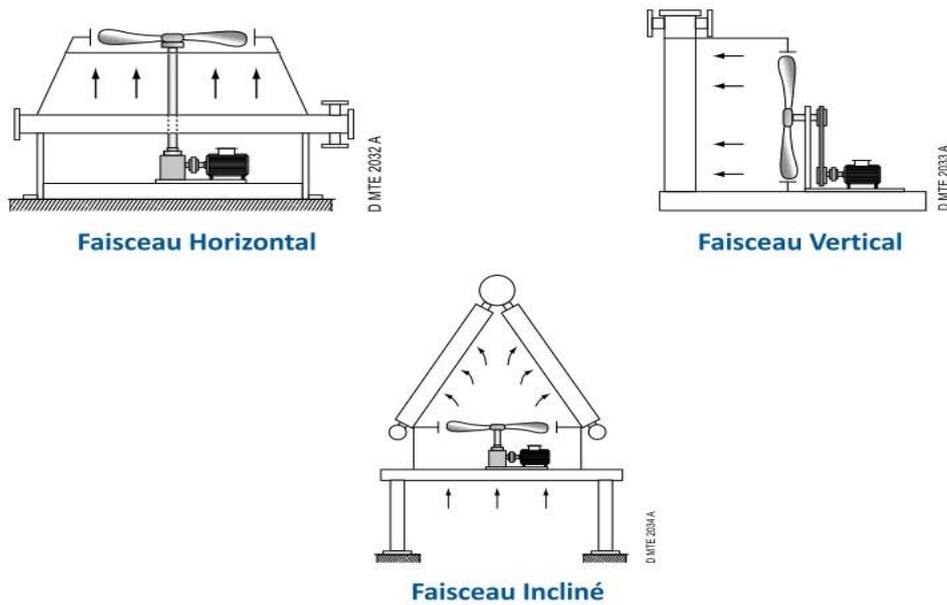


Figure 3.21 : Les types des faisceaux

La majorité des aéroréfrigérants utilisés dans les produits pétroliers ont des faisceaux horizontaux. Lorsque les ventilateurs sont installés au-dessus des faisceaux, on les appelle à air induit. Lorsque les ventilateurs sont placés au-dessous des faisceaux, on les appelle à air forcé.

3.3.1. Tirage forcé :

Le ventilateur est situé sous le faisceau de processus et l'air est forcé à travers les tubes.

Dans les aéroréfrigérants à tirage forcé, l'air passe par le ventilateur avant de passer par les tubes à ailettes et l'air est poussé à travers les faisceaux de tubes. Les avantages avec cela incluent : Le ventilateur et la courroie ne sont pas exposés à l'air d'échappement chaud, ce qui augmente la durée de vie des composants. Aucune limite de température sur l'air sortant.

Lorsque les tronçons de tubes sont horizontaux, le ventilateur est placé sous les tubes, ce qui facilite l'accès pendant l'entretien et réduit les c ts de structure. La consommation d'énergie est souvent inférieure à celle des unités à tirage induit. [4]

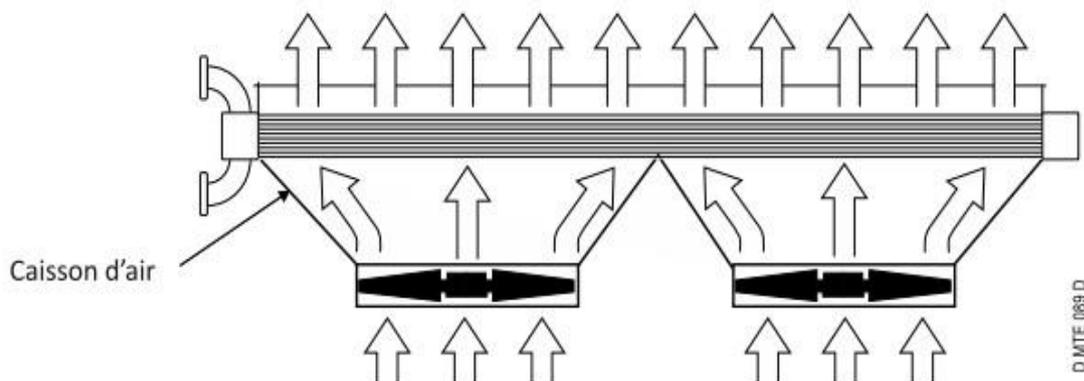


Figure 3.22 : Aéroréfrigérant tirage forcé

- **Avantages :**

- Besoins en puissance éventuellement inférieurs si l'air effluent est très chaud. (La puissance varie inversement avec la température absolue.)
- Amélioration de l'accès aux ventilateurs et aux paliers supérieurs pour la maintenance.

- Facilité d'accès aux packs pour le remplacement.
- Accepte des températures d'entrée de processus plus élevées.
- **Inconvénients :**
 - La répartition de l'air sur le faisceau est moins homogène.
 - L'air chaud peut être plus facilement redirigé, grâce à une vitesse de décharge faible des faisceaux, une vitesse d'admission élevée vers l'anneau du ventilateur et l'absence de cheminée.
 - La capacité naturelle de tirage est limitée en cas de défaillance du ventilateur.
 - Les tubes à ailettes sont exposés entièrement au soleil, à la pluie et à la grêle, ce qui entraîne une mauvaise maîtrise et une stabilité du processus.
 - Dans la majorité des situations, les bénéfices de la conception à tirage induit surpassent les désavantages.

3.3.2. Tirage induit :

Au-dessus du faisceau de processus se trouve le ventilateur, qui aspire ou induit l'air à travers les tubes.

Le ventilateur est positionné après les sections de tubes dans un aéroréfrigérant à tirage induit, ce qui implique que l'air est aspiré à travers les faisceaux de tubes. Les bénéfices de cette approche incluent : Une distribution plus homogène du flux d'air à travers les tubes. Une vitesse d'air de sortie plus élevée permet de réduire considérablement le risque de recirculation de l'air d'échappement chaud par rapport à un échangeur de chaleur à tirage forcé. [4]

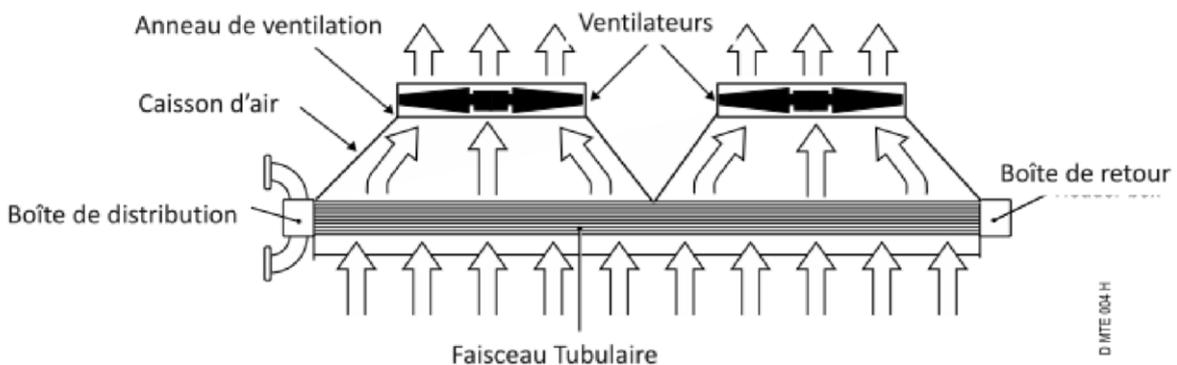


Figure 3.23 : Aéroréfrigérant type induit

- **Avantages :**
 - Optimisation de la distribution de l'air dans le faisceau.
 - Il y a moins de chances que l'air effluent chaud revienne dans l'admission. On évacue vers le haut l'air chaud à une vitesse d'environ 2,5 fois la vitesse d'admission, soit environ 1 500 pieds par minute.
 - Amélioration de la maîtrise et de la stabilité du processus grâce à la couverture de 60 % de la surface frontale du faisceau, ce qui permet de réduire les impacts du soleil, de la pluie et de la givre.
 - Amélioration de la capacité en cas d'arrêt du ventilateur ou de panne du ventilateur, car l'effet de tirage naturel de la cheminée est bien plus considérable.
- **Inconvénients :**
 - Il se peut que les besoins en puissance soient plus élevés si l'air de sortie est extrêmement chaud.

- Il est important de maintenir la température de l'air évacué à 220 °F afin d'éviter tout dommage aux pales du ventilateur, aux roulements ou à tout autre équipement mécanique dans le flux d'air chaud.
- Il est recommandé d'envisager une conception à tirage forcé lorsque la température d'entrée du procédé dépasse 350 °F, car les températures de l'air peuvent augmenter pendant le fonctionnement du ventilateur à l'arrêt ou à faible débit d'air.
- L'entretien des ventilateurs est moins facile, et il peut être nécessaire de les entretenir dans l'air chaud produit par convection naturelle.
- Il est nécessaire de retirer les plénums afin de substituer les faisceaux.

3.4. Applications des Aéroréfrigérants Dans l'Industrie Pétrolière et Gazière :

- **Refroidissement des installations de raffinage :**
 - Les aéroréfrigérants sont employés dans les raffineries de pétrole afin de refroidir les unités de distillation, les échangeurs de chaleur et d'autres équipements.
 - Ces dispositifs assurent un maintien optimal des températures pour les réactions chimiques et la séparation des produits pétroliers.
- **Refroidissement des gaz de combustion :**
 - Les aéroréfrigérants servent à réduire la température des gaz de combustion émis par les chaudières, les turbines à gaz et d'autres éléments.
 - Cela améliore l'efficacité des processus et réduit les émissions de polluants.
- **Refroidissement des compresseurs et des pompes :**
 - Les aéroréfrigérants sont utilisés pour refroidir les compresseurs et les pompes dans les installations de traitement du gaz naturel.
 - Ceci empêche la surchauffe et améliore la longévité des équipements.
- **Refroidissement des systèmes de stockage et de transport :**
 - Les aéroréfrigérants sont utilisés dans les réservoirs de stockage de pétrole brut et de gaz naturel liquéfié (GNL) afin de maintenir la température des produits.
 - Ils préviennent la survaporisation et la diminution du volume.

3.5. Avantages et Inconvénients des Aéroréfrigérants :

3.5.1. Avantages :

- **Efficacité :** Les aéroréfrigérants ont une grande capacité à dissiper la chaleur dans l'air ambiant, ce qui les rend adaptés pour de nombreuses utilisations dans l'industrie.
- **Coût initial :** Ce sont des systèmes de refroidissement qui ont un coût initial relativement bas par rapport à d'autres.
- **Maintenance :** En général, la maintenance est facile, car il n'y a pas de pièces mobiles complexes.
- **Adaptabilité :** Ils peuvent être employés dans des milieux difficiles et des zones à risque d'explosion.

3.5.2. Inconvénients :

- **Dépendance aux conditions ambiantes :** Les aéroréfrigérants ont une efficacité qui varie en fonction des conditions climatiques (température, humidité, vent).

- **Consommation d'eau :** La nécessité d'eau pour le refroidissement de certains modèles peut être un désavantage dans les régions où l'eau est rare.
- **Encombrement :** Ils occupent plus d'espace que les échangeurs de chaleur compacts.
- **Limitations de température :** Ils ne sont pas adaptés aux températures élevées.

3.6. Conclusion :

Ce chapitre sur la technologie des aéroréfrigérants nous a permis un aperçu général de ces dispositifs essentiels. En examinant les composants tels que les faisceaux, les ventilateurs, les chambres de distribution d'air et les structures, nous avons pu comprendre leur fonctionnement et leur interaction pour assurer un refroidissement efficace. De plus, la distinction entre les tirages forcés et induits a clarifié les mécanismes de base de ces systèmes. En explorant également les différentes applications ainsi que les avantages et les inconvénients des aéroréfrigérants, nous avons pu apprécier leur importance et leur utilité dans divers domaines industriels.

En somme, ce chapitre nous a offert une vision complète de la technologie des aéroréfrigérants, mettant en lumière leur rôle crucial et leur diversité d'applications.

Chapitre 4 : Phénomène d'encrassement et dégradation des tubes de l'aéroréfrigérant 100-AM-101A/H

4.1. Introduction :

L'un des équipements essentiels dans l'unité de production de distillation atmosphérique (U100) est la batterie d'aéroréfrigérants 100-AM-101/AH, car elle joue un rôle crucial dans le refroidissement de la coupe de tête Naphta et GPL avant la séparation et l'envoi vers le stockage.

Depuis le début de la raffinerie jusqu'à nos jours, l'équipement a été soumis à des opérations de maintenance, comme le nettoyage régulier ou accidentel et l'obturation des tubes qui fuient (fuyards), dans le but d'assurer un bon fonctionnement et de maintenir la production au maximum.

Le problème rencontré avec cet équipement est la présence d'encrassement permanent, pouvant entraîner une obstruction totale des tubes, ainsi qu'une dégradation du matériau de ces derniers en raison de la mauvaise qualité de l'eau de lavage utilisée.

Ce problème provoque un transfert de chaleur inefficace et diminue l'efficacité de l'instrument, entraînant une augmentation de la température et de la pression en haut de la colonne 100T101, ainsi que la température du naphta vers le stockage. Cela entraîne une réduction de la vitesse de fonctionnement de l'appareil, ce qui entraîne une diminution de la production.

4.2. Implantation et Rôle de l'Équipement :

L'aéroréfrigérant 100AM101 joue un rôle essentiel dans le processus de préfractionnement, en tant que condenseur pour les produits de tête de la colonne de préfractionnement 100T101 en utilisant l'air ambiant comme fluide réfrigérant.^[1]

Il est soigneusement placé au niveau de la section de préfractionnement afin d'améliorer le processus de condensation en capturant de manière efficace les composés cibles (voir la figure).

Afin d'assurer un échange thermique efficace, le débit est soigneusement séparé en deux passes à travers des boîtes de distribution intégrées. Cette configuration permet d'optimiser la circulation des fluides et de maintenir des conditions de fonctionnement optimales à l'intérieur de l'aéroréfrigérant. En outre, cette répartition du débit favorise une répartition plus efficace de la charge thermique, ce qui améliore l'efficacité globale du système.

La batterie des aéroréfrigérants 100-AM-101A-H présente une puissance thermique d'échange de chaleur remarquable, atteignant environ 30,62 MW. Cette valeur démontre que l'aéroréfrigérant est capable de gérer des charges thermiques considérables, garantissant ainsi une performance fiable et continue du processus de préfractionnement.^[7]

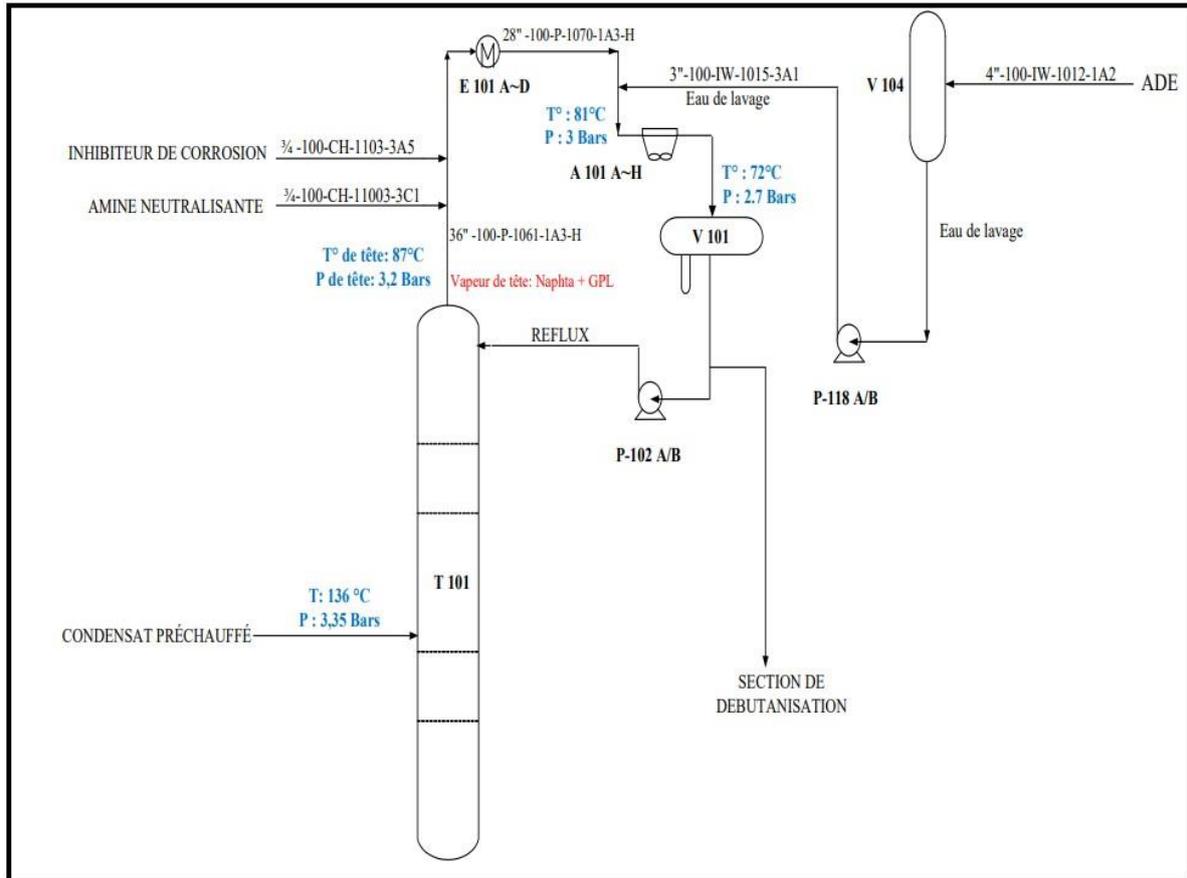


Figure 4.1 : Implantation des aéroréfrigérants

4.3. Description de l'Équipement :

4.3.1. Normes et standards de construction :

Le classement des aéroréfrigérants 100AM101 en tant qu'appareils sous pression exige que leur conception et leur production respectent les normes et réglementations de conception et de fabrication en vigueur dans chaque pays.

- API Standard 661 (air cooled heat exchanger for general refinery service-2006);
- American Society Mechanical Engineers (ASME) Sect. VIII, Div. 1-"Pressure Vessels" dernière édition;
- ASME Sect. IX "Welding Qualifications" dernière édition ;
- ASME Sect. II "Material Spécifications" dernière édition ;
- ASME B16.5, Pipe Flange and Fittings NPS1/2 Through NPS 24;
- ASME B16.47, Large Diameter Steel Flanges, NPS 26 through 60;
- ASME B16.20, Metallic Gaskets for Pipe Flanges Ring-Joint, Spiral Wound and Jacketed;
- ASME B46.1, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay);

- Décret exécutif N°90-245 de 18/08/1990 portant réglementation des appareils à pression à gaz.^[7]

4.3.2. Paramètres de fonctionnement :

Les paramètres de fonctionnement de la batterie des Aéroréfrigérants 100-AM-101 A\H sont élaborés pour garantir un fonctionnement optimal de l'unité 100 à un taux de marche maximal de 58 de 120%, ce qui entraîne un débit total de condensation et de refroidissement de la coupe de la tête de la colonne de préfractionnement 100-T-101 d'environ 503 657Kg/h dans les conditions suivantes :

- Température d'entrée côté tubes : 73,3 °C ;
- Température de sortie coté tubes : 62 °C ; □ Pression du fluide à l'entrée des tubes : 3,01 Bars

4.3.3. Paramètres de design :

Les dimensions de l'aéroréfrigérant 100-AM-101 sont établies en respectant les critères de calcul de la réglementation et des normes mentionnées, principalement en se basant sur les points suivants :

- Pression du design : 6,35 Bars.
- Température de design : 92°C.
- Pression d'essai : 9,6 Bars.

4.4. Analyse du Phénomène d'Encrassement des Tubes :

4.4.1. Description des circuits de process des Aéroréfrigérants 100-AM-101 :

Le dispositif de tête de la colonne de préfractionnement est équipé de trois systèmes d'injection pour lutter contre la corrosion :

- Section d'injection d'amine neutralisante.
- Section d'injection d'inhibiteur de corrosion. □ Section d'injection de l'eau de lavage.

Les deux packages 100-PKG-101 et 100-PKG-102 seront utilisés pour recevoir, préparer et injecter les produits chimiques (amine neutralisant et inhibiteur de corrosion) dans la conduite des vapeurs de tête avant les échangeurs 100-E-101 A/B/C/D, en utilisant un raccord T-tube.

L'eau de lavage est injectée à partir du ballon 100-V-104 dans la ligne de tête de colonne entre les échangeurs 100-E-101A/B/C/D et les Aéroréfrigérants 100-A-101A/B/C/D/E/F/G/H, et collectée dans le mamelon du ballon de reflux 100-V-101, puis drainé.^[1]

La ligne de tête de colonne entre les échangeurs 100-E-101 A/B/C/D et les Aéroréfrigérants 100-A-101 A/B/C/D/E/F/G/H est remplie d'eau de lavage à partir du ballon 100- V-104, puis elle est collectée dans le mamelon du ballon de reflux 100-V-101, puis drainée.

4.4.2. Types de corrosion dans les circuits de process des Aéroréfrigérants

100-AM-101 :

L'unité de fabrication rencontre les problèmes de corrosion les plus graves dans la partie supérieure de la colonne de préfractionnement (lignes, aéroréfrigérants, ballon de reflux).

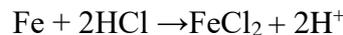
Selon les circonstances de la distillation, il est possible que la corrosion se produise même dans les plateaux supérieurs de la colonne de préfractionnement où le reflux froid pénètre.

L'HCl produit lors de l'hydrolyse des sels du condensat ($MgCl_2$ et $CaCl_2$), de l' H_2S présent dans le condensat, de l'eau, de la formation des sels sous dépôt et des acides organiques présents dans le condensat est responsable de la corrosion dans la tête.

- **Hydrolyse des sels du condensat :**

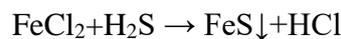


La présence d'HCl dans le système ne provoque pas de corrosion tant que l'eau n'est pas liquide. Une fois que l'eau atteint son point de rosé, l'HCl, qui est très soluble dans l'eau, donne à l'eau un pH très acide et entraîne une corrosion extrêmement sévère.



- **Libération de l' H_2S :**

Le circuit peut être aggravé par la présence d' H_2S dans la vapeur de tête lorsqu'il se dissout dans l'eau condensée et lorsqu'on passe d'un pH de 5.5 à 9. La réaction de l' H_2S avec le Fer soluble peut également entraîner la formation de FeS (sulfure de fer), ce qui entraîne une augmentation de l'encrassement sur les surfaces des équipements et des problèmes de corrosion sous dépôt (eaux noires).^[1]



En général, les éléments qui influencent la corrosion sont :

- Qualité des condensats.
- Conditions de procédé.
- Métallurgie

La figure 4.2 illustre comment la corrosivité causée par les sulfures et les chlorures varient en fonction du pH.

En pratique, on trouve un compromis qui se situe généralement entre 5,5 et 6,5.

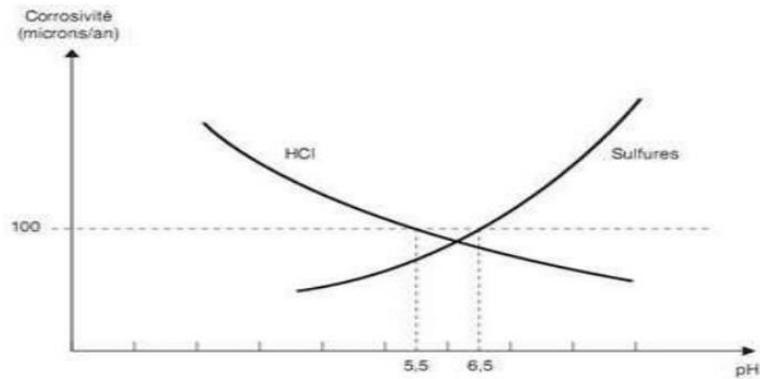


Figure 4.2: L'évolution de la corrosivité due aux sulfures et due aux chlorures en fonction du PH

4.4.3. Système adapter pour la protection contre la corrosion :

Comme mentionné précédemment, il est essentiel de préserver la protection du circuit de tête de la colonne de préfractionnement contre la corrosion.

Toutefois, il est également essentiel d'avoir d'autres moyens de contrôle :

- L'addition d'amines Neutralisant pour neutraliser l'HCL.
- L'injection d'un filmant (inhibiteur de corrosion).

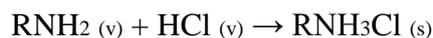
- **Amines neutralisantes :**

On injecte des amines neutralisantes dans la phase gazeuse afin d'augmenter le pH de la solution aqueuse en neutralisant l'acide afin d'atteindre un pH optimal de 5,5 à 6,5.

Deux éléments ont influencé cette plage de pH :

- À un pH inférieur à 5.5, la corrosion acide s'accélère très rapidement ;
- À un pH supérieur à 6.5 (par exemple, l'utilisation excessive de neutralisant) accroît la probabilité de dépôt des sels avec précipitation de FeS, ce qui accélère la corrosion sous dépôt.

Toutefois, l'emploi d'amines de neutralisation peut causer des problèmes de corrosion lors du dépôt, ce qui nécessite l'injection d'eau de lavage en raison du dépôt du produit de la réaction acide-amine (sels d'amine chlorhydrate). Il sera nécessaire de retirer ce produit de la tête en injectant de l'eau de lavage.^[1]



- **Inhibiteur de corrosion :**

Même à des pH compris entre 5,5 et 6,5, la corrosion peut survenir, soit par une mauvaise distribution du neutralisant, soit par la présence d'autres acides. Ainsi, afin de préserver la sécurité du circuit de tête, nous employons une amine filmante, une corrosion inhibitrice.

Les composés de ce produit chimique se fixent sur les surfaces métalliques des tuyaux et des condenseurs, créant ainsi un film protecteur qui empêche les agents corrosifs de se heurter au métal.

On injecte l'amine filmante de manière à ce qu'elle puisse agir avant que l'eau ne parvienne à son point de rosée.^[1]

- **Eau de lavage :**

Les canalisations de vapeur de tête sont remplies d'eau de lavage afin d'éliminer les dépôts de sels.

4.4.4. Contrôle de la corrosion :

4.4.4.1. Mesure des chlorures dans les eaux de ballon de tête :

Trois sources peuvent expliquer la présence de chlorures dans l'eau de tête^[1] :

- Chlorures d'amine résultant de neutralisation d'HCl.
- Chlorures de fer résultant de la corrosion.
- Présence d'HCl dans l'eau.

Les teneurs inférieures à 10 ppm sont admises.

4.4.4.2. Contrôle de la teneur en fer dans les eaux de ballon de tête :

La concentration de fer dans l'eau du ballon témoigne de l'importance du processus de corrosion. Un traitement performant peut contribuer à maintenir les niveaux (les concentrations) inférieurs à 2 ppm.

4.4.4.3. Suivre de témoins de corrosion :

L'objectif est de réguler la vitesse de corrosion en étudiant la perte de poids de la sonde de corrosion, et il est acceptable d'avoir des vitesses inférieures à 100 microns par an.

D'autre part, ils ne soulignent pas la corrosion sous dépôt.

4.4.5. Causes principales de l'encrassement des tubes des aéroréfrigérants :

Étant donné l'importance de l'injection de l'amine neutralisante et de l'inhibiteur de corrosion dans le processus, l'utilisation de l'eau de lavage disponible dans la raffinerie RA2K, qui est utilisée comme eau industrielle par la section 502, a entraîné un effet secondaire néfaste, avec des dépôts solides répandus sur les surfaces internes des tubes des Aéroréfrigérants 100AM-101.^[1]

La figure 4.3 illustre la gravité de la présence de dépôts solides dans certains tubes jusqu'à obturation, ce qui représente un taux maximal d'obstruction des tubes d'environ 70% lors des interventions de nettoyage.



Figure 4.3 : La présence de dépôt solide au niveau de quelques tubes de l'aéroréfrigérant 100-AM-101

Le dépôt est principalement influencé par le comportement de la phase (liquide/vapeur) d'hydrocarbure contenant des quantités importantes d'inhibiteurs de corrosion et d'amines neutralisantes avec l'eau de lavage qui traverse les tubes de l'aéroréfrigérant. Il est considéré que la qualité de l'eau de lavage injectée est le seul facteur indésirable qui entraîne le phénomène d'encrassement, en raison de la décomposition de matière organique dans des conditions de service propices à la formation de dépôts solides, qui se manifestent principalement en désavantage dans la section étroite des tubes.^[1]

Suite à la mise en œuvre d'un système d'injection d'eau déminéralisée transportée par des camions citernes, l'expérience a démontré un résultat satisfaisant pour la performance thermique des Aéroréfrigérants. Cependant, étant donné que la demande en eau de lavage est très importante pendant le fonctionnement normal de l'unité, il est presque impossible de garantir une alimentation en eau en permanence.^[7]

4.5. Conséquences de l'Encrassement Sur les Aéroréfrigérants :

L'encrassement des aéroréfrigérants peut avoir des conséquences importantes sur leur performance et leur durée de vie. Et influe sur la chaîne de production.

4.5.1. Impact sur les aéroréfrigérants :

- **Réduction du transfert de chaleur :**
 - L'encrassement crée une couche isolante sur les tubes à ailettes, ce qui diminue la capacité de l'aéroréfrigérant à transférer la chaleur du fluide frigorigène vers l'air ambiant.

Une surchauffe du fluide frigorigène peut se produire, ce qui peut diminuer l'efficacité du système de refroidissement et accroître la consommation d'énergie

- L'encrassement peut, dans les cas les plus graves, empêcher le transfert de chaleur et provoquer une panne du système de refroidissement.
- **Augmentation de la consommation d'énergie :**

Afin de compenser la diminution du transfert de chaleur, il est nécessaire que les ventilateurs de l'aéroréfrigérant tournent plus rapidement, ce qui entraîne une grande consommation d'énergie.

Cela peut provoquer une hausse importante des dépenses d'exploitation, en particulier pour les aéroréfrigérants de grande taille

- **Dégradation des matériaux :**

L'encrassement peut piéger l'humidité et les contaminants, ce qui peut favoriser la corrosion des tubes à ailettes et d'autres composants de l'aéroréfrigérant.

Cela peut entraîner des fuites, des défaillances structurelles et une réduction de la durée de vie de l'aéroréfrigérant

- **Autres conséquences :**

L'encrassement peut également augmenter le bruit de l'aéroréfrigérant et nuire à la qualité de l'air ambiant.

Il peut également créer un environnement favorable à la prolifération des bactéries et des moisissures.

En résumé, il faut faire un programme de nettoyage et d'entretien régulier pour minimiser l'encrassement et garantir le bon fonctionnement des aéroréfrigérants.

4.5.2. Impact sur la chaîne de production :

Afin de répondre aux exigences internationales des produits finis fournis par une unité opérationnelle, il est essentiel que l'exploitation doive assurer bonne maîtrise des installations de production afin de réaliser les prévisions demandées. Toute perturbation ou problème technique interne qui affecte la chaîne de production aura un impact sur le manque à produire (MAP), ce qui entraînera une non-réalisation de l'objectif. ^[4]

Étant donné que les Aéroréfrigérants 100-AM-101 sont considérés comme un élément essentiel de la chaîne de production, le phénomène d'encrassement a principalement des conséquences sur :

- Le risque de contamination du fluide de procédé.
- La perte d'énergie suite à la chute de performances des Aéroréfrigérants.
- Le manque à produire (MAP).

Étant donné que le fonctionnement des aéroréfrigérants est influencé par les conditions climatiques (hiver ou été) d'une part, et par l'augmentation du coefficient de conductivité thermique (résistance thermique) suite à la formation d'encrassement et au bouchage des tuyaux, d'autre part, il est possible qu'une diminution de la production se produise, notamment pendant la période estivale, afin de répondre aux opérations de nettoyage et d'ajuster les paramètres de marche habituels de l'unité. ^[4]

4.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé le phénomène d'encrassement et la dégradation des tubes des aéroréfrigérants 100-AM-100 A/H. Nous avons décrit l'équipement, les paramètres de fonctionnement, et le rôle principal de ces aéroréfrigérants. Nous avons également analysé le phénomène d'encrassement des tubes, les types de corrosion pouvant survenir, ainsi que les méthodes de protection contre l'encrassement, telles que l'injection d'amines neutralisantes, l'injection d'eau de lavage et l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion. De plus, nous avons examiné les méthodes de contrôle de la corrosion et les principales causes de l'encrassement, en soulignant le rôle indésirable de l'eau de lavage dans ce processus. Enfin, nous avons discuté des conséquences de l'encrassement des tubes, qui affecte non seulement les aéroréfrigérants, mais également l'ensemble de la chaîne de production.

Chapitre 5 : Etude thermique de l'influence de l'encrassement et l'obturation des tubes des Aéroréfrigérants

5.1. La Description de la Problématique :

La raffinerie de Skikda, comme de nombreuses autres raffineries, fait face à un défi important : l'encrassement et la dégradation des tubes de ses aéroréfrigérants. Ce problème entraîne des dépenses importantes pour la maintenance et les réparations des équipements affectés.

Dans le processus de la raffinerie, les aéroréfrigérants, comme le 100-AM-101, ont un rôle essentiel en dissipant la chaleur générée par les fluides (naphta + GPL) et en la transférant à un flux d'air caloriporteur. Afin d'optimiser l'efficacité de ce transfert de chaleur, il est nécessaire de répondre à plusieurs conditions. Un débit d'air optimal à travers les ailettes des tubes et un débit de fluide approprié en fonction du taux de marche de la production sont indispensables. Il faut également encourager des conditions favorables aux échanges thermiques entre les deux fluides, comme une surface d'échange maximale, une circulation homogène des produits et des conditions climatiques adéquates.

Cependant, les aéroréfrigérants en service présentent un problème d'encrassement, ce qui met en péril leur efficacité. C'est la raison pour laquelle l'on a fait notre étude afin d'évaluer l'effet de la résistance thermique causée par cet encrassement sur le coefficient d'échange global et la surface d'échange des aéroréfrigérants 100-AM-101. L'objectif de cette analyse est aussi d'identifier les actions à prendre afin de retirer les tubes encrassés et de rétablir ainsi l'efficacité du système de refroidissement.

5.2. Le Calcul Thermique de la Batterie d'Aéroréfrigérant 100-AM-101 A\H:

Il est nécessaire de connaître le service thermique d'un aéroréfrigérant, c'est-à-dire le débit du fluide chaud, sa nature, sa température et son emplacement d'implantation. Il est également nécessaire de déterminer sa surface, sa géométrie et les dimensions des ventilateurs qui refroidissent le faisceau tubulaire.

Le travail actuel a été effectué dans le circuit de naphta atmosphérique.

Pour effectuer le calcul, il est nécessaire de :

- Vérifier le calcul de design pour l'aéroréfrigérant AM 101 A/H.
- Calculer le bilan thermique du circuit de vapeur de tête.
- Discussion et résultats.

- Propos de la solution et suggestion

5.2.1. Vérification du cas design :

Dans le cas de design, il est nécessaire de vérifier les performances de l'aéroréfrigérant A101 (A-H) en connaissant les dimensions de l'échangeur :

La puissance calorifique échangée.

- Les débits massiques des deux fluides.
- La différence de température logarithmique moyenne.
- La surface d'échange.
- Le coefficient global de transfert de chaleur.

5.2.1.1. Les données de départ :

Le tableau 5.1 présente les informations de départ de la vapeur de tête de l'aéroréfrigérant

Tableau 5.1: Données de départ du vapeur de tête de l ' aéroréfrigérant (A- 101 A/ H)

Propriété	Valeur
Température entrée $-T_1$ - [°C]	73.3
Température sortie $-T_2$ - [°C]	62
Masse volumique liquide - ρ - [kg/m ³]	657,81
Viscosité dynamique liquide - μ - [kg / m.s]	0,0001788
Résistance d'encrassement - Rm - [h.m ² .°C/kcal]	0,0001
Débit massique - M - [kg/h]	4197100
La température de condensation [°C]	64.45
Conductibilité thermique (kcal/h.m ²)	59.98

Les données de départ du l'air :

Tableau 5.2 : Données de départ du l'air

Propriété	Valeur
Température entrée $-t_1$ - [°C]	37
Chaleur spécifique - C_a - [kcal/kg, °C]	0,2406
La masse volumique de l'air ρ_a à $t = 37$ °C -[kg/m ³]	1,104
Conductivité thermique de l'air - λ_a - [kcal/h.m.°C]	0,0231
Viscosité dynamique de l'air - μ_a - [kg / m.s]	$1,89.10^{-5}$
Résistance d'encrassement - R_{air} - [h.m ² .°C/kcal]	0,0002
Diamètre du ventilateur - d_v - (m)	4,26
Volume d'air réel par ventilateur,- Q_v - m ³ /s	120,96

Tableau 5.3 :Données de départ du l'aéroréfrigérants (A-101 A /H)

Propriété	Valeur
Diamètre extérieur des tubes (d_0), m	0,0254
Diamètre intérieur des tubes (d_i), m	0,01986
Longueur des tubes (L), m	12,5
Largeur de la cellule (l), m	7,42
Pas des tubes (triangulaires), (S), m	0,0635
Nombre de rangées (N_R)	8
Nombre de tubes total (N)	3552
Epaisseur de tubes (m)	$2,77 \cdot 10^{-3}$
Nombre de passes (N_P)	2
Nombre de tubes par rangée (t/r)	55/56
Nombre de cellules	4
Nombre de faisceaux (f)	8
Nombre de ventilateurs (N_v)	8
Nombre de tubes par faisceaux	444
Résistance tube [h.m ² .°c/kcal]	0.00017
Diamètre extérieur d'ailettes (D), m	0,05715
Epaisseur d'ailettes (t), m	0,0004
Hauteur d'ailettes (l), m	0,01578
Nombre d'ailettes par mètre	433
Rapport, A_t/A_0	22,81
Espacement entre les ailettes (e), m	0,0019
Diamètre racine (d), m	0,0258

5.2.1.2. Calcul de la surface d'échange installée :

- **Surface d'échange total exprimé par rapport au diamètre extérieur :**

$$A_0 = \pi \cdot d_0 \cdot L \cdot N_T$$

$$A_0 = 3,14 \times 0,0254 \times 12,5 \times 3552$$

$$\text{Donc : } A_0 = 3\,542,9625 \text{ m}^2$$

- **Surface d'échange installée actuellement :**

Il y a 250 tubes pinochés alors :

$$A_0' = \pi \cdot d_0 \cdot L \cdot N_T = 3,14 \times 25,4 \times 10^{-3} \times 12,5 \times (3552 - 250)$$

$$\text{Donc : } A_0' = 3\,293,5986 \text{ m}^2$$

- **Surface faciale installée :**

$$F_a = l_c \cdot L \cdot \text{les nombres des cellules}$$

$$\text{Donc : } F_a = 371 \text{ m}^2$$

5.2.1.3. Calcul du coefficient de transfert coté air :

- **La quantité de chaleur Q :**

A partir de bilan thermique :

$$Q = M \times C_p \times (T_1 - T_2) \quad (\text{Coté vapeur de tête})$$

$$Q_a = m_a \times C_a \times (t_2 - t_1) \quad (\text{Coté air})$$

Avec :

Q vapeur de tête

Q : Quantité de chaleur échangée, kcal/h

M : Débit massique du Naphta, kg/h

m_a : Débit massique d'air, kg/h

T_1 et T_2 : Température d'entrée et de sortie du vapeur de tête de la colonne, °C

t_2 et t_1 : Températures d'entrée et de sortie de l'air, °C

C_a : Chaleur spécifique de l'air, kcal/kg °C

C_p : Chaleur spécifique de vapeur de tête, kcal/kg °C

Donc :

$$Q = M \times C_p \times (T_1 - T_2) = 503657 \times 2,4815 \times (73,3 - 62)$$

$$Q = 14\,123\,020,75415 \text{ kcal/h}$$

• **Température de l'air à la sortie t_2 :**

On a :

$$Q = V_f \times C_a \times \rho_a^{37} \times F_a \times (t_2 - t_1)$$

$$D'où : t_2 = \frac{Q}{F_a \cdot 3600 \cdot C_a \cdot \rho_a \cdot V_f} + t_1$$

F_a : Surface faciale, m²

V_f : Vitesse faciale de l'air, m/s (2.48m/s en 8 rangées)

ρ_a : La masse volumique de l'air à

$$t = 37 \text{ °C}, \text{kg/m}^3$$

C_a : Chaleur spécifique de l'air ,kcal/kg,°c

$$t_2 = 52.52 \text{ °C}$$

• **Débit massique d'air de réfrigération (m_a) :**

On a :

$$m_a = \frac{Q}{(t_2 - t_1) \cdot C_a}$$

$$m_a = 3\,792\,569.76 \text{ kg/h}$$

• **Coefficient de transfert de chaleur coté air h_{air} :**

Le coefficient de film côté air " h_{air} " au condition de service donné par la formule de E. Briggs et E. YOUNG :

$$h_{air} = \frac{(Nu \times \lambda_a)}{dr}$$

$$Nu = 0,134 \times Re^{0,681} \times Pr^{(1/3)} \times (e/l)^{0,2} \times (e/t)^{0,1134} \times \frac{At}{A_0}$$

A_t : Surface totale des tubes compris les ailettes, m²

A_0 : Surface totale des tubes nus, m²

d_r : diamètre racine

e : Espacement entre ailettes, m

l : Hauteur de l'ailette, m

t : Epaisseur de l'ailette, m

- **Nombre de Reynolds :**

$$Re = \frac{d_r \cdot G_{\max}}{\mu}$$

Avec G_{\max} est la vitesse massique au niveau de la surface ailetée:

$$G_{\max} = \frac{m_a \cdot V_m}{F_a \cdot V_f} \quad \text{avec : } \frac{V_m}{V_f} = 2$$

$$G_{\max} = 5.679 \text{ kg/s.m}^2$$

$$\text{D'où : } Re = 7752.5587$$

- **Nombre de Prandtl :**

$$Pr = \frac{C_a \cdot \mu_a}{\lambda_a}$$

avec :

λ_a : Conductivité thermique de l'air, Kcal/h.m.°C

μ_a : Viscosité dynamique de l'air, kg/m.s

$$Pr = 0,70$$

$$\text{Donc : } Nu = 944.440$$

$$h_{\text{air}} = 845.604 \text{ kcal/h. m}^2 \cdot \text{C}$$

5.2.1.4. Calcul de surface d'échange :

• **Différence de la température logarithmique :**

On calcule la DTLM d'un échangeur à contre-courant

$$\Delta T_1 = T_2 - t_1 = 62 - 37$$

$$\Delta T_1 = 25 \text{ °C}$$

$$\Delta T_2 = T_1 - t_2 = 73.3 - 52.52$$

$$\Delta T_2 = 20.78 \text{ °C}$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

$$DTLM = 22.81 \text{ °C}$$

La batterie d'Aéroréfrigérants A-101 A/H est dotée de tubes à trois passages. Pour calculer la DTLM correcte, nous devons utiliser le facteur de correction F. Ce facteur est déterminé par les valeurs de R, r et le nombre de passages de tube, avec :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = 0.8$$

$$r = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = 0.4$$

F est représenté graphiquement, le facteur correct F=0.955

$$\text{Donc : DTLM}_{\text{corrigée}} = 21.79^\circ\text{C}$$

- **Coefficient de transfert de chaleur du vapeur de tête hi_1 :**

$$hi = \frac{Nu \times \lambda_v}{di}$$

Le nombre de Nusselt facilitera le calcul du coefficient de convection.

Régime turbulent : le champ des nombres de Reynolds défini par $10^4 < Re < 1.2 \times 10^5$ nous utilisons la formule de Colburn :

$$Nu = 0.023 * (Re)^{0.8} * (Pr)^n$$

n = 4 cas de refroidissement de tube .

n = 3 cas de réchauffement de tube.

- **Nombre de Reynolds**

$$Re = \frac{di \times G_t}{\mu_v} / G_t = \frac{M}{at} = 254.372 \text{ kg/s.m}^2 / at = \frac{\pi \times di^2 \times Nt}{4Np} = 0.55 \text{m}^2$$

$$Re = 561\,341.213 > 10^4 \text{ c'est un régime turbulent -}$$

Nombre de Prandlt :

$$Pr = \frac{C_v \times \mu_v}{\lambda_v} = 0.78$$

$$\text{Donc : Nu} = 338.444$$

$$hi = 335.718 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$$

Le coefficient de transfert thermique mesuré à l'extérieur du tube

$$hi_1 = hi \times \frac{di}{do}$$

$$hi_1 = 262.494 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$$

- **Coefficient global de transfert de chaleur (U)**

$$\frac{1}{U_s} = \frac{1}{ha} + \frac{1}{hi_1} + \left(\frac{e}{\lambda}\right)_t + Ri_0 + r_m = 0.0054$$

$\frac{1}{h_{air}}$: résistance dans le fluide à l'extérieur du tube

$\frac{1}{h_{i1}}$: résistance dans le fluide à l'intérieur du tube

$\left(\frac{e}{\lambda}\right)_t$: résistance due à la paroi métallique du tube

Ri_0 : résistance due au film d'encrassement déposé à l'intérieur du tube avec

$$R_{si0} = R_{air} * \frac{d_0}{d_i}$$

r_m : résistance ailette tenant compte de l'efficacité de l'ailette et de la résistance du métal de l'ailette.

$$U = 183.838 \text{ kcal/h.m}^2\text{°C}$$

- **Surface d'échange calculée (A) :**

$$Q = A \times U \times DTLM_{corrigée}$$

$$A = 3\,534.328 \text{ m}^2$$

5.2.2. Calcul du bilan thermique cas actuel :

5.2.2.1. Données de cas actuel :

Les caractéristiques principales dans le cas actuel sont présentées dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4: Les caractéristiques principales dans le cas actuel

Caractéristique	Fluide	Air
Débit (kg/h)	286000	4 160 233.728
Température d'entrée (°C)	79	11.6
Température de sortie (°C)	51.6	31.07

5.2.2.2. Calcul du coefficient de transfert coté air :

- **Quantité de chaleur échangée Q :**

A partir de bilan thermique :

$$Q = M \times C_p \times (T_1 - T_2) = 286000 \times 2,4815 \times (79 - 51.6)$$

$$Q = 19\,446\,026.6 \text{ kcal/h}$$

- **Température de sortie d'air :**

$$t_2 = \frac{Q}{F_a \cdot 3600 \cdot C_a \cdot \rho_a \cdot V_f} + t_1$$

$$t_2 = 31.07 \text{ °C}$$

- **le débit massique de l'air de réfrigération (m_a) :**

On a :

$$m_a = \frac{Q}{(t_2 - t_1) \cdot C_a}$$

$$m_a = 4\,160\,233.728 \text{ kg/h}$$

• **Coefficient de transfert de chaleur coté air h_{air} :**

Le coefficient de film côté air " h_{air} " au condition de service donné par la formule de E. Briggs et E. YOUNG :

$$h_{air} = \frac{(Nu \times \lambda_a)}{dr}$$

$$Nu = 0,134 \times Re^{0,681} \times Pr^{(1/3)} \times (e/l)^{0,2} \times (e/t)^{0,1134} \times At/A_0$$

- **Nombre de Reynolds :**

$$Re = \frac{dr \cdot G_{max}}{\mu}$$

Avec G_{max} est la vitesse massique au niveau de la surface ailetée:

$$G_{max} = \frac{m_a \cdot V_m}{F_a \cdot V_f} \quad \text{avec : } \frac{V_m}{V_f} = 2$$

$$G_{max} = 6.229 \text{ kg/s.m}^2$$

$$D'où : Re = 8\,504.116$$

- **Nombre de Prandlt :**

$$Pr = \frac{C_a \cdot \mu_a}{\lambda_a}$$

avec :

λ_a : Conductivité thermique de l'air ,Kcal/h.m.°C

μ_a : Viscosité dynamique de l'air, kg/m.s

$$Pr = 0,70$$

$$\text{Donc : } Nu = 1\,005.865$$

$$h_{air} = 900.601 \text{ kcal/h. m}^2 \cdot \text{c}$$

5.2.2.3. **Calcul de surface d'échange**

• **Différence de la température logarithmique :**

On calcule la DTLM d'un échangeur à contre-courant

$$\Delta T_1 = T_1 - t_2 = 79 - 31.07$$

$$\Delta T_1 = 47.93 \text{ °C}$$

$$\Delta T_2 = T_2 - t_1 = 51.6 - 11.6$$

$$\Delta T_2 = 40 \text{ °C}$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

$$DTLM = 43.84 \text{ °C}$$

La batterie d'Aéroréfrigérants A-101 A/H est dotée de tubes à trois passages. Pour calculer la DTLM correcte, nous devons utiliser le facteur de correction F. Ce facteur est déterminé par les valeurs de R, r et le nombre de passages de tube, avec :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = 1.5$$

$$r = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = 0.3$$

F est représenté graphiquement, le facteur correct F=0.975

Donc : $DTLM_{\text{corrigée}} = 42.749^\circ\text{C}$

- **Coefficient de transfert de chaleur du vapeur de tête hi_1 :**

$$\frac{Nu \times \lambda_v}{di} hi =$$

Le nombre de Nusselt facilitera le calcul du coefficient de convection.

Régime turbulent : le champ des nombres de Reynolds défini par $10^4 < Re < 1.2 \times 10^5$ nous utilisons la formule de Colburn :

$$Nu = 0.023 * (Re)^{0.8} * (Pr)^n$$

n = 4 cas de refroidissement de tube .

n = 3 cas de réchauffement de tube.

Dans ce cas, nous choisissons n=4.

- **Nombre de Reynolds**

$$Re = \frac{di \times G_t}{\mu_v} / G_t = \frac{M}{at} = 254.372 \text{ kg/s.m}^2 / at = \frac{\pi \times di^2 \times N_t}{4N_p} = 0.55 \text{m}^2$$

$$Re = 520\,000 > 10^4 \text{ c'est un régime turbulent -}$$

Nombre de Prandlt :

$$Pr = \frac{C_v \times \mu_v}{\lambda_v} = 0.78$$

Donc : $Nu = 318.353$ $hi = 246.911 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$

Le coefficient de transfert thermique mesuré à l'extérieur du tube

$$hi_1 = hi \times \frac{di}{do}$$

$$hi_1 = 193.057 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$$

- **Coefficient global de transfert de chaleur (U)**

$$\frac{1}{U_s} = \frac{1}{ha} + \frac{1}{hi_1} + \left(\frac{e}{\lambda}\right)_t + Ri_0 + r_m = 0.0067$$

$\frac{1}{h_{air}}$: résistance dans le fluide à l'extérieur du tube

$\frac{1}{h_{i1}}$: résistance dans le fluide à l'intérieur du tube

$\left(\frac{e}{\lambda}\right)_t$: résistance due à la paroi métallique du tube

Ri_0 : résistance due au film d'encrassement déposé à l'intérieur du tube avec

$$R_{si0} = R_{air} * \frac{d_0}{d_i}$$

r_m : résistance ailette tenant compte de l'efficacité de l'ailette et de la résistance du métal de l'ailette.

$$U = 148.422 \text{ kcal/h.m}^2\text{°C}$$

- Surface d'échange calculée (A) :

$$Q = A \times U \times DTLM_{corrigée}$$

$$A = 3\,064.797 \text{ m}^2$$

On représente les principaux résultats calculés dans les tableaux 5.5 et 5.6 :

Tableau 5.5 : Les principaux résultats de calcul dans le cas design (température ambiante 37°C) à 100% du taux de marche

Caractéristiques	Fluide	Air
Débit (kg/h)	503657	3 792 569.76
Température d'entrée °C	73.3	37
Température de sortie °C	62	52.52
Quantité de chaleur échangée kcal/h		14 123 020.75415
Surface d'échange m ²		3 534.328

Tableau 5.6 : Les principaux résultats de calcul dans le cas actuel (température ambiante 11.6°C) à 82% du taux de marche

Caractéristiques	Fluide	Air
Débit (kg/h)	286000	4 160 233.728
Température d'entée °C	79	11.6
Température de sortie °C	51.6	31.07 19 446
Quantité de chaleur échangée kcal/h		026.6
Surface d'échange m ²		3 064.797

5.2.3. Discussion et résultats :

- **Comparaison des résultats et analyse :**

L'analyse des résultats obtenus par les calculs comparés aux valeurs de design a révélé des différences significatives, mettant en lumière l'impact de l'encrassement sur les aéroréfrigérants 100-AM-101 A/H. La surface d'échange thermique calculée pour le cas de design, à une température ambiante de 37°C et un taux de marche de 100%, est de 3 534,328m². Cette valeur correspond à l'équipement en état neuf, sans encrassement. En revanche, dans le cas actuel, à une température ambiante de 11,6°C et un taux de marche de 82%, la surface d'échange est réduite à 3 064,797 m². Cette diminution de surface d'échange est principalement due à l'encrassement et à l'obturation des tubes, qui génèrent des résistances thermiques additionnelles.

- **Détail des résultats obtenus :**

1. Surface d'échange :

- Cas de design : La surface d'échange requise est de 3 534,328 m² pour un taux de marche de 100%, indiquant une tolérance positive de à 0,2% par rapport à la surface installée initialement (3 542.9625 m²).
- Cas actuel : Avec une surface installée actuellement de 3 064.797 m², après l'obturation de 250 tubes, un besoin supplémentaire de surface de 6.94% a été enregistré, soit environ 228 m² de plus.

2. Quantité de chaleur échangée :

- Cas de design : La quantité de chaleur échangée est de 14 123 020,75415 kcal/h, ce qui est en ligne avec les attentes pour un équipement en bon état de fonctionnement.
- Cas actuel : La quantité de chaleur échangée est de 19 446 026,6 kcal/h, ce qui représente une augmentation en raison des conditions de fonctionnement actuelles (température plus basse et taux de marche ajusté).

3. Impact de l'encrassement :

- Performance globale : L'encrassement des tubes entraîne une réduction significative de la surface d'échange thermique effective, causant une diminution de la performance des aéroréfrigérants. La température de sortie du naphta non stabilisé devient inférieure à celle requise par le design, affectant ainsi le rendement global.
- Pression et débit : La montée en pression de la colonne 100-T-101 et la nécessité de réduire le taux de marche pour soulager la colonne indiquent des perturbations opérationnelles directes dues à l'encrassement.

- **Explications détaillées :**

L'encrassement des tubes, à la fois interne et externe, introduit des résistances thermiques supplémentaires qui diminuent l'efficacité de transfert de chaleur. Ceci est démontré par la réduction de la surface d'échange effective et l'augmentation de la demande en surface

additionnelle pour maintenir les performances souhaitées. Le cas de bouchage exacerbe ce problème, réduisant le rendement du naphta jusqu'à 15,5%, comparé à un rendement de 26-27% dans des conditions optimales. L'observation des résultats met en exergue l'importance d'un entretien régulier et d'une surveillance continue pour prévenir l'accumulation de dépôts et maintenir les performances des aéroréfrigérants.

En conclusion, les résultats obtenus confirment que l'encrassement a un impact négatif significatif sur l'efficacité énergétique des aéroréfrigérants 100-AM-101 A/H, justifiant la nécessité de mesures correctives pour rétablir leur performance optimale.

Conclusion Générale et Recommandation :

L'étude menée sur l'impact de l'encrassement sur l'efficacité énergétique des aéroréfrigérants 100-AM-101 A/H à la raffinerie de Skikda a révélé des enjeux significatifs pour la performance et la durabilité de ces équipements cruciaux. L'encrassement des tubes des aéroréfrigérants, principalement dû à l'accumulation de dépôts solides et de produits de corrosion, entraîne une réduction notable du transfert de chaleur, augmentant ainsi la consommation d'énergie et diminuant l'efficacité globale du système de refroidissement.

Les analyses effectuées ont permis de comprendre les mécanismes sous-jacents à l'encrassement et d'identifier les facteurs contributifs, tels que la qualité de l'eau de lavage et la composition chimique des fluides de procédé. L'étude thermique a démontré que l'encrassement augmente la résistance thermique, affectant le coefficient d'échange global et réduisant la surface d'échange disponible, ce qui peut, dans les cas extrêmes, mener à l'obturation complète des tubes et à des pannes du système.

Les conséquences de l'encrassement ne se limitent pas aux aéroréfrigérants eux-mêmes, mais s'étendent à l'ensemble de la chaîne de production, provoquant des interruptions et des inefficacités qui affectent les objectifs de production et augmentent les coûts d'exploitation. Les recommandations issues de cette étude mettent en avant l'importance de programmes de nettoyage et d'entretien réguliers, ainsi que l'optimisation des paramètres de fonctionnement pour minimiser les effets de l'encrassement.

Pour remédier à ces problèmes et améliorer les performances des aéroréfrigérants, plusieurs solutions sont proposées :

- 1. Restauration des tubes insérés :** Cette solution vise à éliminer les fuites des tubes encrassés, permettant ainsi de rétablir une surface d'échange thermique optimale.
- 2. Nettoyage périodique de la batterie d'aéroréfrigérant :** Un entretien régulier et systématique des aéroréfrigérants est essentiel pour prévenir l'accumulation de dépôts et maintenir l'efficacité énergétique.
- 3. Amélioration de la qualité de l'eau de lavage :** Utiliser l'eau déminéralisée de la raffinerie RA1K pour le nettoyage permet de minimiser les dépôts et d'assurer une meilleure qualité de lavage, prolongeant ainsi la durée de vie des aéroréfrigérants et améliorant leur performance.

Ces solutions, mises en œuvre de manière proactive, permettront de réduire les effets négatifs de l'encrassement, d'optimiser l'efficacité des aéroréfrigérants et de maintenir des performances élevées tout en assurant la durabilité des équipements. L'entretien régulier et la gestion de la qualité de l'eau de lavage sont cruciaux pour éviter les perturbations opérationnelles et garantir une performance énergétique optimale des installations industrielles.

En conclusion, cette recherche a souligné l'importance de la gestion proactive de l'encrassement dans les aérorefrigérants pour assurer une performance optimale, prolonger la durée de vie des équipements et maintenir l'efficacité énergétique au sein de la raffinerie. Les solutions proposées, basées sur des analyses rigoureuses et des observations empiriques, fournissent une feuille de route pour améliorer la résilience et la compétitivité des installations de raffinage.

Bibliographie

1. Manuel d'opération Unité 100 du TOPC.
2. Cours de transfert thermique- bibliothèque en ligne- F2School. 3. Cours du transfert thermique I et II de Mr . Mimoun université de Boumerdès.
4. Techniques de l'ingénieur.
5. P.WUITHIER, le pétrole, raffinage et génie chimique, tome I et tome II, **2^e m^e** édition, 1972 paris.
6. SUPPORT DE FORMATION Cours EXP-PR-EQ120 Révision 0.1, LES ÉQUIPEMENTS, Total.
7. Rapport d'étude N°TE10:2019, étude de fonctionnement de l'aéroréfrigérant 100-AM-101 A\H.

