

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**



Université de M'Hamed Bougara - Boumerdes

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département de Génie des Procédés Chimiques et Pharmaceutiques

Mémoire de fin d'Etudes en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie des Procédés

Option: Raffinage

Thème

***Amélioration du fonctionnement de l'unité
d'hydrofinishing U25 de la
Raffinerie d'Arzew (RA1Z)***

Réalisé par :

M^{lle}. BENILHA Fatima

M^{lle}. BARKA Fatima Zahra

Dirigé par :

Dr. MIMOUN.H

**Promotion
2016**

Liste des figures

N°	Titre	Page
Figure I.2	Plant de la raffinerie.....	6
Figure III.1	Composition des lubrifiants	20
Figure III.2	Schéma simplifié de production des huiles de base	24
Figure III.3	Schéma simplifié de la distillation sous vide.....	26
Figure III.4	Schéma simplifié de Désasphaltage au propane.....	27
Figure III.5	Schéma simplifié de l'extraction au furfural.....	28
Figure III.6	Schéma simplifié du déparaffinage au MEC/Toluène.....	29
Figure III.5	Schéma du traitement de finition.....	30
Figure V.1	Schéma du circuit de l'unité d'hydrofinishing.....	43
Figure VI.1	Four cylindrique vertical.....	51
Figure VI.2	Four cabine à tubes horizontaux.....	52
Figure VI.3	Echangeur double-tube.....	58
Figure VI.4	Echangeur à plaques tubulaires fixes.....	58
FigureIX.1	Ecoulement à contre courant.....	74

La liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau II.1	la composition élémentaire du pétrole brut.....	17
Tableau IV.1	les réactions de traitement à l'hydrogène.....	39
Tableau VIII.1	Conditions de marche du four.....	65
Tableau VIII.2	Composition des fumées.....	65
Tableau VIII.3	La composition des fumées.....	67
Tableau VIII.4	La composition de gaz combustible.....	68
Tableau VIII.5	Les paramètres de fuel gaz.....	69
Tableau VIII.6	Analyse chromatographique de fuel gaz.....	70
Tableau VIII.7	Chaleur spécifique des fumées.....	71
Tableau VIII. 8	Bilan thermique du four 25F1.....	72
Tableau IX 1	Données nécessaires pour le calcul de l'échangeur.....	73
Tableau IX 2	les dimensions d'un nouvel échangeur.....	81
Tableau X.1	Les paramètres de la charge (DO) avant et après modification...	82
Tableau X.2	Différence en débit de fuel gaz.....	83
Tableau X.3	Le gain en fuel gaz.....	83
Tableau X.4	Les pertes de production.....	84
Tableau X.5	Gain de production.....	85

Introduction

Le pétrole brut est un fluide constitué principalement d'hydrocarbures de différentes familles (paraffiniques, naphéniques, aromatiques); il contient également des composés organiques soufrés, oxygénés et azotés. On le rencontre dans les bassins sédimentaires, où il occupe les vides de roches poreuses appelées réservoirs. [1]

La variation de la composition élémentaire des pétroles bruts entraîne une grande diversité des propriétés physiques (densité, viscosité ...).

Le raffinage du pétrole désigne l'ensemble des traitements et transformations visant à soustraire du pétrole un maximum de produits à haute valeur commerciale. Selon l'objectif visé, en général, ces procédés sont réunis dans une raffinerie. La raffinerie est l'endroit où l'on traite le pétrole pour extraire les fractions commercialisables.

Le pétrole doit subir une série de traitements divers pour être utilisable dans les moteurs à combustion et dans les différentes branches de l'industrie. Très souvent, la qualité d'un brut dépend largement de son origine, sa couleur, sa viscosité, sa teneur en soufre, son point d'écoulement ... [2]

L'obtention des produits valorisables à partir du pétrole nécessite une diversité de procédés industriels dont les principaux sont : l'adsorption, l'absorption, l'extraction liquide – liquide, la distillation atmosphérique et la distillation sous vide.

L'Algérie possède cinq raffineries, parmi eux la raffinerie d'Arzew. Cette raffinerie est la seule qui produit les lubrifiants, elle contient deux zones de fabrication des huiles de base.

Les huiles lubrifiantes sont des fractions pétrolières composées de 70 % à 90% de matières visqueuses plus additifs utilisées pour diminuer les frottements entre deux surfaces en contact de paroi solide d'un moteur en mouvement.

Introduction

Les huiles lubrifiantes est une gamme de produits si large et à domaines d'applications si nombreux. Pour situer l'importance commerciale et économique des lubrifiants, il convient de préciser que la consommation actuelle de ces produits porte environ 1,2% de la consommation mondiale annuelle de pétrole brut. [19]

Problématique

Le raffinage du pétrole est une industrie lourde qui transforme un mélange d'hydrocarbures, appelé pétrole brut, en produits énergétiques, tels que carburant et combustibles, et en produits non énergétiques, tels que matières premières pétrochimiques, lubrifiants, paraffines et bitumes. La complexité d'une raffinerie se traduit par le nombre d'unités de fabrication. Ces unités utilisent des procédés physiques ou chimiques que l'on peut classer en trois catégories : les procédés de séparation, les procédés de conversion et les procédés d'épuration.

Dans le complexe du raffinage du pétrole, l'unité des huiles lubrifiantes est d'une importance capitale pour le fonctionnement du complexe. Elle comporte une série d'équipements importants pour son fonctionnement tels que les échangeurs, les fours et les colonnes. L'optimisation du procédé consiste à exploiter ces équipements dans les meilleures conditions pour atteindre le meilleur rendement.

Pendant le stage, nous sommes particulièrement intéressées à l'unité de l'hydrofinishing U25, destinée à traiter les différentes fractions provenant de la distillation sous vide à l'hydrogène à fin d'éliminer les impuretés.

L'unité d'hydrofinishing est destinée pour traiter 8,638 T/heure équivalent à 207,312 T/jour de l'huile sortante de l'unité de déparaffinage au MEC/TOLUENE (U24). Cette huile sera transformée en huile de base acheminée vers le stockage.

Actuellement le rendement du four est plus bas comparativement avec celui de design, cela est dû à une perte de chauffe au niveau de la batterie d'échange, donc la température de la charge (DO) à l'entrée du four sera plus basse que celle exigée par le design (164°C au lieu de 221°C).

Suivant les paramètres de marche actuels, on a constaté une forte augmentation de consommation de débit de fuel gaz par rapport au design, pour compenser le déficit en chauffe au niveau de la batterie d'échange. Cette cause a entraîné une augmentation de la

Problématique de l'étude

température de peau du four 25-F1 ce qui risque d'avoir une fissuration des tubes à l'intérieur du four.

Pour remédier aux risques causés par le four, le taux de charge de l'unité a été réduit de 20%.

Les objectifs de ce travail sont:

1. Le calcul de vérification du rendement du four, dont ses performances ont baissé depuis quelques années ;
2. Le calcul de dimensionnement d'un échangeur au niveau du train de préchauffage de l'huile déparaffinée, pour augmenter la température de la charge à l'entrée de four 25-F1 et permettant de soulager ce dernier.

I.1. Historique de la raffinerie

La raffinerie d'Arzew a été construite dans le cadre du premier plan quinquennal (1970-1973). Elle est implantée dans la zone industrielle d'Arzew sur le plateau d'Al-Mohgoune. Elle occupe une superficie de 170 hectares.

La construction du complexe a été réalisée par la société japonaise « JAPAN GAZOLINE COMPANY (JGC) » en collaboration avec l'entreprise Sonatrach. La pose de la première pierre a lieu le 19 juin 1970.

En 1978, suite aux besoins importants en lubrifiants. La réalisation d'un ensemble de production de 120.000 T/an d'huile de base fut lancé .Le démarrage de cet ensemble fut en 1982.

La raffinerie d'Arzew a été conçue pour répondre aux impératifs suivants :

- Satisfaire à la consommation croissante en carburants du marché national ;
- Fabriquer des produits stratégiques tels que les lubrifiants et les bitumes ;
- Exportation des produits excédentaires (Naphta, Kérosène, Fiouls).

I.2. Présentation des principales installations de RA1Z

La raffinerie d'Arzew comprend quatre départements de production le P1, P2, P3 et P4, chaque département est constituée de plusieurs zones ayant des activités spécifiques :



Figure I.2 : Plant de la raffinerie.

I.2.1. Département de production P1 :

Les installations du département P1 produisent des carburants, des lubrifiants et des bitumes.

Ces installations sont constituées de :

Zone 3 : Utilités I

Unité 31: Production de vapeur et d'électricité

La production de la vapeur haute pression (50 bars) est assurée par trois chaudières (H1, H2 et H3). Les deux premières chaudières ont une capacité de 60 T/h chacune et la troisième chaudière a une capacité de 120 T/an. La vapeur MP & BP est produite par détente de la vapeur HP.

L'usine est alimentée en électricité par deux sources. La première par la turbine à gaz (GTG) avec une capacité de 25 MW et la deuxième par le réseau SONEGAS à travers une ligne haute tension de 60 000 volts.

En cas d'absence du réseau SONEGAS et l'arrêt du turbogénérateur GTG, le groupe de secours diesel (31K5) démarre en automatique pour assurer la continuité des prioritaires et procéder ainsi à un arrêt normal des installations.

Unité 32 : Production de l'eau distillée

Deux évaporateurs sont installés pour assurer une fabrication d'eau distillée de 80 T/h d'une pureté élevée ($\lambda < 10 \mu\text{S/cm}$) utile pour le fonctionnement des chaudières. Un 3ème est installé récemment et est mis en production (50T/h).

Unité 33 : Circuit d'eau de refroidissement

L'eau de refroidissement est utilisée principalement pour les besoins de condensation des gaz et le refroidissement des organes interne des équipements rotatifs (paliers de pompes/compresseurs, garnitures...).

Cette eau, pour garder ses propriétés de refroidissement, est réfrigérée en circuit semi-ouvert au niveau d'une tour à ventilation forcée à quatre cellules et de capacité 5500 m³/h.

Chapitre I : Présentation du complexe RA1/Z

Unité 34 : Réception d'eau dessalée

Constituée de réservoirs de stockage dont la station « KAHRAMA », située à 10 Km de la raffinerie, dispose de Cinq (05) pompes pour le pompage de l'eau vers la raffinerie.

Unité 35 : Récupération et distribution du gaz combustible

Cette unité est destinée à réceptionner le gaz naturel de Hassi R'mel et le gaz de la raffinerie provenant de la zone des carburants. Les deux gaz sont mélangés dans le ballon 35 D1 à une pression de 3.5 bars et se sont utilisés comme combustible dans les fours et les chaudières.

Unité 36 : Unité d'air comprimé

L'air service nécessaire pour les installations et l'air instrument pour les appareils de contrôle sont assurés par un ensemble de :

- Quatre compresseurs à piston 36G/A/B/C/D dont la capacité est 1230 Nm³/h ;
- Un compresseur 36 G1E dont la capacité est de 2400 Nm³/h.

Zone 4 : Carburants

Cette zone comprend six (06) unités qui sont :

Unité 11 : Unité de distillation atmosphérique «Topping »

Elle a pour but de produire les carburants et comprend deux sections :

- section de fractionnement principal ;
- Section de stabilisation.

Unité 12 : Unité Platforming

Cette unité produit le platformat à partir du HSRN de l'unité 11. Cette charge contient du soufre, de l'azote, l'oxygène et autres composés indésirables qui sont des poisons pour le catalyseur du platforming. C'est la section d'hydrobon qui est destinée à éliminer ces composants indésirables par l'hydrogénation et en même temps la saturation des oléfines.

Les mécanismes réactionnels qui s'effectuent dans les réacteurs de platforming sont :

Chapitre I : Présentation du complexe RA1/Z

- La déshydrogénation des naphthènes en aromatiques ;
- L'Isomérisation des paraffines ;
- la déshydrocyclisation des paraffines ;
- l'hydrocraquage.

Unité 13 : Séparation des gaz « Gas Plant »

Cette unité a pour but de séparer le GPL, en gaz « propane » et « butane », provenant de l'unité de stabilisation de l'unité 11 et de la section de platforming.

Unité 17: Unité Isomérisation

Cette unité produit le platformat à partir du LSRN de l'unité 11. Cette charge contient du soufre, de l'azote, l'oxygène et autres composés indésirables qui sont des poisons pour le catalyseur d'isomérisation. C'est la section d'hydrobon qui est destinée à éliminer ces composants indésirables par l'hydrogénation et en même temps la saturation des oléfines.

Unité 18 : Hot Oil

Cette unité a pour but de fournir l'énergie de la CHALEUR pour les différents rebouilleurs de l'unité 11 et l'unité 17.

Unité 65 : Torche

Aire de torche de la raffinerie.

Zone 7 : Unités huiles de base

Production d'huiles de base à partir du brut réduit atmosphérique de l'unité Topping. Le schéma de fonctionnement et de fabrication est le suivant :

Unité 21 : Distillation sous vide

Elle est destinée à préparer les distillats qui seront transformés en huiles de base. La charge de cette unité est le BRA du Topping qui alimente la colonne de distillation sous vide après avoir été chauffé par la batterie d'échange et le four en dernière étape.

Au sommet on obtient le Gasoil sous vide (VGO). Latéralement on soutire les distillats (SPO, MVO, VO) et au fond un résidu sous vide (RSV) qui est la charge de l'unité 22.

Unité 22 : Désasphaltage au propane

Cette unité a pour but d'extraire à partir du RSV de l'unité 21 les asphaltes en utilisant le propane (C_3H_8) comme solvant pour cette opération de désasphaltage.

Le résidu sous vide sera dissocié en deux (02) parties :

- l'huile désasphaltée ou le quatrième distillat ;
- l'asphalte récupéré est envoyé vers l'unité de bitume.

Unité 23 : Extraction des aromatiques

Le but de l'unité est d'extraire les aromatiques des distillats et de la DAO (huile désasphaltée) afin d'augmenter l'indice de viscosité de ces coupes d'huile.

Pour que l'extraction soit possible, l'utilisation d'un solvant est impérative. Le solvant utilisé pour cette opération étant le furfural.

Unité 24 : Déparaffinage au MEK- Toluène

Cette unité a pour but d'abaisser le point d'écoulement (Pour Point) et le point de trouble (Cloud Point) des huiles de base à la sortie de l'unité d'extraction, en éliminant les molécules paraffiniques à point de cristallisation élevé. Le solvant utilisé pour cette opération devra dissoudre l'huile et précipiter la paraffine. Le mélange MEK-Toluène répond à ces exigences.

Unité 25 : Hydrofinishing

Le but de cette unité est d'éliminer les composés indésirables qui sont contenus dans l'huile comme le soufre, l'oxygène et l'azote.

Elle comprend un réacteur avec un catalyseur à base de Co-Mo et Alumine à trois lits catalytiques où s'effectuent les réactions physico-chimiques sous hydrogène pour l'élimination des composés indésirables.

A la suite de ce traitement, l'huile (SPO, SAE 10, SAE 30 ou BS) est envoyée dans des bacs dédiés pour le stockage des huiles de base.

Chapitre I : Présentation du complexe RA1/Z

Zone 10 : BITUMES

Cette zone est composée de deux ensembles :

Unité 14 : Bitumes routiers

Après une série de préchauffage par les échangeurs et le four, la charge alimente la colonne de flash sous vide « 14C1 » où on obtient les coupes de gasoil (LVGO, MVGO, HVGO) et un résidu sous vide qui va subir une oxydation dans la colonne d'oxydation « 15C1 » pour obtenir un bitume routier.

La charge de cette unité est un mélange de l'asphalte émanant des Zones 5 et 7 et le brut réduit importé (BRI).

Unité 15 : Bitumes Oxydés

Cette unité est destinée à produire des bitumes oxydés à haut point de ramollissement. Elle traite une charge constituée d'un mélange approprié de résidu sous vide et HVGO en provenance de colonne de flash sous vide de l'unité 14.

I.2.2. Département de production P2

La réalisation de ce département fut suite aux demandes importantes en lubrifiants, elle comprend trois principales zones :

Zone 05 : Les huiles de base

Elle a les mêmes tâches que la zone 7. En plus de ça il y a l'unité 150 de l'huile caloporteur.

Zone 19 : Les utilités

Elle assure le bon fonctionnement de la chaîne de production des huiles de base ; elle comprend les unités suivantes :

Unité 1100: production de vapeur ;

Unité 1200: production de l'énergie électrique ;

Unité 1300: tour de refroidissement des eaux ;

Unité 1400: gaz de combustion ;

Chapitre I : Présentation du complexe RA1/Z

Unité 1500: production d'air comprimé (air instrument et air de service) ;

Unité 1600: traitement et production d'eau distillé et déminé ;

Unité 1700: réseau de torche P2 ;

Unité 280 : production de gaz inerte.

I.2.3. Département de production P3

Une nouvelle réorganisation des départements de production a ajouté un troisième département qui comprend les zones suivantes :

Zone 06 : Production des huiles finies

Elle est conçue pour le mélange et le conditionnement des huiles finies à partir des huiles de base fabriquées dans cette première base sont réalisés avec des additifs pour améliorer les caractéristiques. Le lubrifiant est conditionné dans des fûts de 200 litres. La gamme des lubrifiants se compose de : huile pour moteur, huile industrielle, huile de graissage huile hydraulique, huile de coupe, graisses industrielles. Elle comprend les unités suivantes :

Unité 3000 : Production des huiles finies et des graisses

Elle est destinée à fabriquer des huiles finies à partir des huiles de base fabriquées dans les unités 100 à 500 et des additifs importés. Les grades d'huiles fabriquées sont :

- Huiles pour moteurs (Essence, Diesel, Huiles pour transmission) ;
- Huiles industrielles [hydraulique (TISKA), turbines (TORBA), engrenage (FODDA), compresseur (TORADA), et huiles divers].

Unité 3900 : Production des huiles finies

Elle est réalisée en 1997, elle assure les mêmes tâches de l'unité U3000.

I.2.4. Département de production P4

Zone 28 : Stockage et expédition

C'est une zone de stockage des matières premières, des mélanges, des expéditions et des produits semi-finis et finis, ainsi que le pétrole brut.

Chapitre I : Présentation du complexe RA1/Z

Zone 30 : Chargements de produits finis

Cette zone est spécialisée dans le chargement des carburants (essences, gasoil...) dans les camions.

Zone 27 : Station de traitement des effluents

Nouvelle STEP en plus de l'unité 1800.

I.2.5. Laboratoire de contrôle

Durant toutes les étapes de raffinage au niveau des différentes unités, les produits semi-finis et finis sont soumis selon un programme bien défini à un contrôle de qualité rigoureux au niveau du laboratoire.

Avant tout transfert ou expédition de produit fini, un certificat de qualité attestant la conformité de ce produit aux spécifications arrêtées est établi.

Le laboratoire contrôle aussi la qualité des eaux, les rejets et procède aux analyses des différents échantillons spéciaux.

I.2.6. Département de sécurité et d'environnement :

I.2.6.1. Service prévention

Assure les travaux de maintenance, les animations (photos et conseils sensibilisant sur les lieux de travail), l'hygiène de l'unité, et les statistiques des accidents de travail (en utilisant l'arbre des causes).

I.2.6.2. Service intervention

Assure l'entretien des équipements de lutte contre l'incendie (fixe et mobile), la formation du groupe d'intervention de réserve (GIR), la gestion des produits extincteurs, les travaux de maintenance (ne jours de repos et fériés, quand l'inspecteur n'est pas présent),

L'exécution du planning de sauvetage journalier et du programme d'exercices des plans d'attaques contre les incendies.

I.3. Réhabilitation et modernisation de l'instrumentation des installations

Principaux axes du projet :

- Modernisation des instruments de mesure et des systèmes de contrôle avec une implantation des applications DCS, ESD et BMS ;
- Création d'un centre unique de conduite « Sécurisé » des installations de production par l'implantation d'une salle de contrôle centralisée « SDCC » ;
- Création de satellites « Sécurisés » de supervision du processing au niveau de chaque unité de fabrication ;
- Automatisation des mélanges essences et huiles lubrifiantes ;
- Installation d'un système de surveillance des vibrations et de contrôle de vitesse des machines tournantes ;
- Installation de sous systèmes (F&G, LIMS, Gestion parc instrumentation, mélange en ligne huiles et essences) ;
- Installation de l'application MES ;
- Implantation d'un contrôle avancé du processing ;
- Implantation du concept d'optimisation de la fabrication.

Chapitre II : Généralités sur le pétrole brut

II.1. Introduction

Le pétrole est une roche liquide carbonée, composée d'hydrocarbures plus ou moins légers et de divers composés organiques piégés dans des formations géologiques particulières.

L'exploitation de cette énergie fossile est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides : fioul, gazole, kérosène et naphtha. [3]

II.2. Historique

Le pétrole est connu et utilisé depuis la plus haute antiquité. A partir des années 1850, le pétrole fait l'objet d'une exploitation et d'une utilisation industrielle.

Il est exploité en 1857 en Roumanie, et en 1859 aux Etats-Unis, dans l'Etat de Pennsylvanie. A partir de 1910, il est considéré comme une matière première stratégique, à l'origine de la géopolitique du pétrole. La période 1920-1970 est marquée par une série de grandes découvertes de gisements, particulièrement au Moyen-Orient, qui fait l'objet de toutes les couvertures. Les marchés des produits pétroliers se développent également ; outre les carburants comme l'essence, le gasoil et le fioul lourd, qui accompagnent l'essor des transports dans leur ensemble, l'industrie pétrolière génère une myriade de produits dérivés, au nombre desquels les matières plastiques : les textiles, le caoutchouc artificiel, les colorants, les intermédiaires des synthèses pour la chimie et la pharmacie. Les marchés permettent de valoriser la totalité des composants du pétrole. [3]

II.3. La composition chimique du pétrole brut

Les hydrocarbures constituent les éléments essentiels des pétroles ; leurs molécules ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène (majoritairement) ; elles se divisent en plusieurs familles chimiques selon leur structure. Toutes ces structures sont basées sur la tétravalence du carbone.

II.3.1. Les hydrocarbures aliphatiques saturés ou les paraffines :

Ils sont constitués d'un enchainement d'atomes de carbone portant des atomes d'hydrogènes, leur formule générale est : C_nH_{2n+2} . Ils peuvent être linéaires ou ramifiés.

II.3.2. Les hydrocarbures cycliques saturés ou naphthènes :

Dans ces hydrocarbures, il y a cyclisation de tout ou partie du squelette carboné. Leur formule générale est : C_nH_{2n} .

II.3.3. Les hydrocarbures aromatiques :

Ce sont des hydrocarbures cycliques polyinsaturés présents en forte concentration dans les pétroles bruts. Leur formule générale est : C_nH_{2n-6} .

Chapitre II : Généralités sur le pétrole brut

II.3.4. Les hydrocarbures aliphatiques insaturés alcènes (oléfines) :

Dans ceux-ci, certains atomes de carbone de la molécule ne sont plus liés qu'à trois atomes, ce qui implique la présence d'une ou plusieurs doubles liaisons carbone-carbone.

II.3.5. Composés organiques hétéroatomiques

➤ Composés soufrés :

Le soufre est l'élément le plus répandu dans les pétroles bruts. Sa concentration peut aller de 0,1 à plus de 8% en poids. Le soufre peut être présent sous forme inorganique : S élémentaire, Hydrogène sulfuré H_2S , Oxysulfure de carbone COS ou engagé dans des molécules organiques telles que les sulfures, les disulfures, les thiols, les thiophènes...

➤ Composés oxygénés :

Les bruts contiennent généralement moins d'oxygène que de soufre. Bien que peu abondant, l'oxygène peut jouer un rôle non négligeable ; en particulier, il est responsable de l'acidité des pétroles. On trouve l'oxygène dans les phénols, les furanes et les benzofuranes, les acides carboxyliques et les esters.

➤ Composés azotés :

Dans les pétroles bruts, l'azote se retrouve préférentiellement dans les fractions de point d'ébullition supérieur à 250°C et est particulièrement concentré dans les résines et les asphaltènes. On trouve l'azote sous forme : d'amides, d'amine, de carbazole, et de pyridine.

➤ Composés organométalliques :

Dans les fractions les plus lourdes telles que résines et asphaltènes se trouvent des atomes métalliques comme le Nickel et le Vanadium.

➤ Les asphaltènes :

Ils sont constitués d'une accumulation de feuillets polyaromatiques condensés reliés par des chaînes saturées. Les asphaltènes sont concentrés en hétéroéléments : soufre, azote, nickel et vanadium.

➤ Les résines :

Ce sont en général des molécules à caractère aromatique très marqué et renferment des hétéroéléments (N, O, S et parfois Ni et V). [4]

Chapitre II : Généralités sur le pétrole brut

L'analyse élémentaire d'un pétrole brut donne :

La composition	La proportion en% en masse
Carbone	84 – 87
Hydrogène	11 – 14
Soufre	0,4 – 6
Azote	0,1 – 1,5
Oxygène	0,1 – 0,5
Métaux	0,005 – 0,015

Tableau II.1 : la composition élémentaire du pétrole brut.

II.4. Les caractéristiques du pétrole brut et des produits pétroliers

Les pétroles bruts ont des caractéristiques physiques et chimiques très variables d'un champ de production à un autre et même à l'intérieur du même gisement.

➤ La densité :

La caractérisation la plus grossière est la classification en pétroles "lourds, moyen et légers".

Etant essentiellement constitué de molécules hydrocarbonées, la densité d'un pétrole sera d'autant plus faible que son rapport atomique H/C sera grand. C'est ainsi que la densité des divers pétroles bruts va de 0,7 à 1. [4]

➤ La tension de vapeur Reid :

La tension de vapeur d'un liquide mesure sa tendance à s'évaporer pour une température donnée. C'est la pression pour laquelle s'établit l'équilibre liquide-vapeur. Un liquide est d'autant plus volatil que sa pression de vapeur est forte.

➤ La distillation ASTM :

La distillation ASTM capable de différencier les mélanges par leur volatilité. Elle permet donc de déterminer, à pression fixe, la température de passage de l'état liquide à l'état gazeux. C'est-à-dire les points de coupe de chaque fraction pétrolière. [5]

➤ Facteur de caractérisation globale K_{uop} :

Le facteur de caractérisation K_{uop} permet de classer les pétroles bruts selon les différentes familles d'hydrocarbures. Il est donné par la formule suivante :

Chapitre II : Généralités sur le pétrole brut

$$K_{uop} = \frac{(T_{eb}/1,8)^{1/3}}{S}$$

Avec :

T_{eb} : en kelvin

S : spécifique gravity $d^{15,6}$

Selon le K_{uop} on peut distinguer :

$K_{uop} = 10$ pour les aromatiques purs ;

$K_{uop} = 11$ pour les naphthènes purs ;

$K_{uop} = 12$ pour les chaînes et les cycles de poids équivalent ;

$K_{uop} = 13$ pour les paraffines purs.

➤ La viscosité :

La viscosité est une grandeur physique qui mesure la résistance interne à l'écoulement d'un fluide, résistance due au frottement des molécules qui glissent l'une contre l'autre. La viscosité est un critère particulièrement important pour apprécier les qualités de pompabilité des produits et définir le type d'écoulement dans les canalisations.

II.5. Classification du pétrole brut

➤ Classification industrielle :

Elle est liée à la densité, on distingue :

- Pétrole brut léger : $d_4^{20} < 0,828$
- Pétrole brut moyen : $0,828 < d_4^{20} < 0,884$
- Pétrole brut lourd : $d_4^{20} > 0,884$

➤ Classification chimique :

Cette classification tient en compte la prédominance d'une ou deux familles d'hydrocarbures, alors on distingue :

- Pétrole paraffinique ;
- Pétrole naphtéinique ;
- Pétrole naphtéino-paraffinique ;
- Pétrole aromatique ;
- Pétrole naphtéino-aromatique.

Chapitre II : Généralités sur le pétrole brut

➤ Classification technologique :

- **Selon la teneur en soufre** : On a 3 classes

BTS : pétrole à teneur en soufre basse $< 0,5 \%$;

MTS : pétrole à teneur en soufre moyenne $0,5 - 2 \%$;

HTS : pétrole à teneur en soufre élevée $> 2 \%$.

- **Selon la teneur en paraffine** : On a 3 classes

Pétrole peu paraffinique $< 1,5\%$;

Pétrole paraffinique $1,5 - 6\%$;

Pétrole trop paraffinique $> 6\%$. [16]

III.1. Introduction

Sans lubrification, deux pièces qui frottent l'une contre l'autre s'échauffent. La température atteinte peut devenir si importante qu'elle risque d'entraîner rapidement un grippage de surface de contact et la destruction des deux pièces. Pour éviter ce phénomène, il faut intercaler entre les deux corps une mince couche d'huile. La lubrification est fondamentale et réclame une attention toute particulière.

Les huiles lubrifiantes offrent une bonne capacité de pénétration et de mouillage pour assurer la dissipation de la chaleur du point du frottement, les huiles lubrifiantes sont également utilisées pour nettoyer les points de frottement.

III.2. L'objectif de la lubrification

Les lubrifiants permettent de séparer deux surfaces en mouvements pour :

- Réduire l'usure des organes en frottement ;
- Protégé les organes contre la corrosion ;
- Diminuer la température de régime des machines ;
- Evacuer la poussière et impuretés.

III.3. La composition des lubrifiants

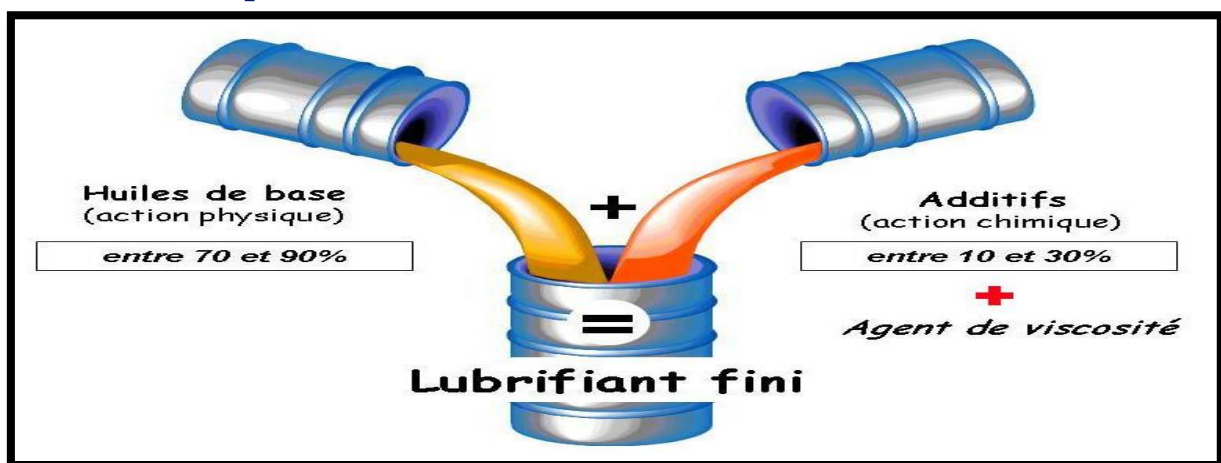


Figure III. 1 : Composition des lubrifiants

III.4. Les types des huiles lubrifiantes

III.4.1. Les huiles minérales :

Il s'agit des huiles de base obtenues par distillation du pétrole qui répondent à trois grandes tendances de caractère spécifique.

III.4.1.1. Les huiles à tendance paraffinique :

Ce sont des hydrocarbures saturés linéaires ou ramifiés caractérisés par :

- La stabilité à l'oxydation ;
- Un reflet de couleur verte ;
- Une masse volumique inférieure à 0.9kg/dm^3 ;
- Un indice de viscosité naturel voisin de 100 ;
- Un point d'aniline de l'ordre de 100°C ;
- Un point d'écoulement naturel de -10°C .

III.4.1.2. Les huiles à tendance naphthénique :

Ce sont des hydrocarbures cycliques saturés qui sont moins stables à l'oxydation et possédant un indice de viscosité plus faible caractérisées par :

- Un reflet bleu ;
- Une masse volumique supérieure à 0.9kg/dm^3 ;
- Un indice de viscosité de l'ordre de 40 à 60°C ;
- Un point d'aniline de l'ordre de 70°C ;
- Un point d'écoulement naturel de -30°C .

III.4.1.3. Les huiles à tendance aromatique :

Leur instabilité ne permet pas de les utiliser comme lubrifiant, grâce à leur grand pouvoir solvant on les utilise en tant qu'additif dans la fabrication des caoutchoucs et des encres.

Chapitre III : Chaine de fabrication des huiles lubrifiantes

III.4.2. Les huiles synthétiques :

Elles sont obtenues par synthèse chimique à partir des produits simples issus de la pétrochimie, elles sont des structures mieux définies que les bases minérales cela permet d'ajuster certaines de leurs propriétés, on distingue : Diester, polybutene, poly glycols...

III.5. Les caractéristiques principales d'une huile de base

III.5.1. Caractéristiques physiques :

Ces huiles de base doivent avoir des propriétés précises, déterminées au niveau de laboratoire par la norme ASTM, qui sont :

➤ **Viscosité :**

La viscosité est la propriété la plus connue des huiles lubrifiantes, c'est une grandeur physique qui mesure la résistance interne d'un fluide à l'écoulement. C'est une résistance due au frottement des molécules qui glissent les unes sur les autres. Elle décroît quand la température s'élève.

➤ **Taux de carbone Conradson :**

Détermine la teneur en corps résineux et en hydrocarbures polycycliques. Il peut être considéré comme degré de raffinage (épuration) de l'huile. Cette mesure caractérise la tendance d'une huile à former des dépôts carbonés lorsqu'elle est soumise à une carbonisation.

➤ **Point d'éclair :**

C'est la température minimale à laquelle l'huile doit être portée pour que les vapeurs émises s'enflamment et s'éteignent instantanément à l'approche d'une flamme. Il permet de juger la présence des légères dans huile.

➤ **Densité :**

Si deux huiles ont une même viscosité à une température déterminée, mais des densités différentes, alors l'huile d'une plus faible densité contient des hydrocarbures présentant plus de valeur, au point de vue propriétés physiques, que l'huile qui a une densité plus élevée.

Chapitre III : Chaine de fabrication des huiles lubrifiantes

➤ **Indice de viscosité :**

Il s'agit d'un nombre qui est le résultat d'un calcul faisant intervenir les viscosités à 40°C et à 100°C. Il caractérise la variation de la viscosité d'une huile en fonction de la température. Cette propriété peut être améliorée par des additifs.

➤ **Point d'écoulement :**

C'est la température minimale à laquelle l'huile peut encore couler après avoir été refroidie jusqu'au point de figeage (point de congélation) sans agitation dans des conditions normalisées. Celui-ci doit être très bas pour assurer le démarrage du moteur à froid. Il est lié à la viscosité et à l'indice de viscosité.

➤ **Résistance à l'oxydation et stabilité thermique:**

C'est la dégradation des caractéristiques des huiles sous l'influence de l'oxygène et de la température.

➤ **Couleur :**

Est un critère de la qualité du fonctionnement des huiles, son intensité est fonction du degré de raffinage.

➤ **Teneur en eau, en cendres et en impuretés :**

Déterminent le degré d'élimination des impuretés, donc influence directement sur le rendement d'huile.

➤ **Onctuosité :**

Caractérise la continuité et la solidité du film adhérent entre les pièces lubrifiées. Ce film parmi ces fonctions doit réduire les usures des éléments pendant le démarrage du moteur à froid.

➤ **Détergence :**

Cette caractéristique effectue la fonction de nettoyage et d'élimination des produits d'oxydation ou des dépôts charbonneux qui se forment pendant le fonctionnement sur les parois des cylindres et pistons.

Chapitre III : Chaîne de fabrication des huiles lubrifiantes

- Corrosion lame de cuivre.
- Teneur en soufre.

III.5.2. Caractéristiques chimiques :

La plus importante est la tenue à l'oxydation, elle sert à éviter la formation des acides, des gommages, des asphaltènes qui provoquent la formation de dépôts entraînant la corrosion des pièces.

III.6. Procédé de fabrication des huiles de bases

Pour obtenir des huiles de base à partir desquelles on fabrique des huiles finies, on prend le résidu atmosphérique qu'on passe à la distillation sous vide, puis on fait subir toute une série de traitement comme suit :

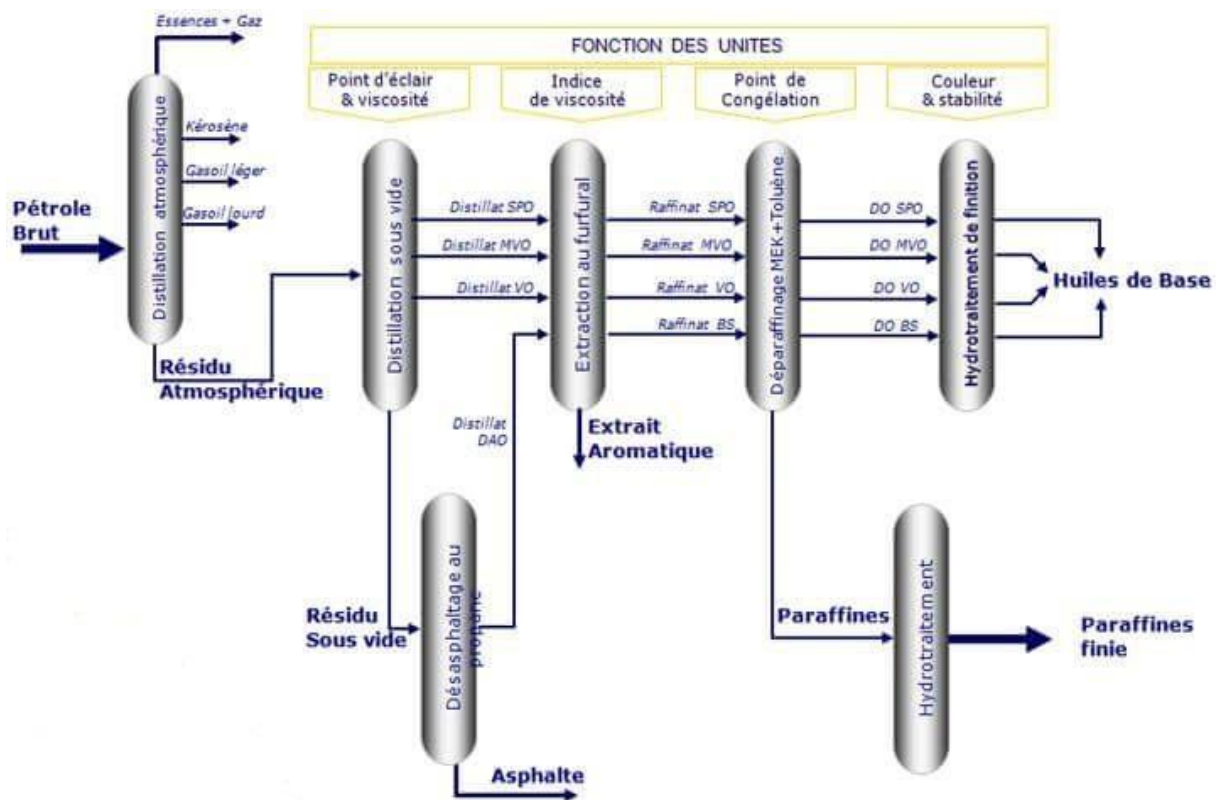


Figure III.2 : Schéma simplifié de production des lubrifiants.

III.6.1. La distillation sous vide

Cette opération consiste à séparer le résidu atmosphérique sortant au fond de colonne atmosphérique et d'extraire des coupes de distillats destinées soit pour la production des lubrifiants soit à alimenter des unités de conversion donnant des produits de haute valeur ajoutée. En effet, cette fraction résiduelle contient des hydrocarbures à longues chaînes et plus les chaînes sont longues plus elles sont fragiles, donc susceptibles d'être scindées en plusieurs morceaux si le chauffage continue sous la pression atmosphérique, c'est la raison de l'abaissement de la pression au dessous de la pression atmosphérique.

La distillation sous vide est utilisée pour obtenir des distillats à des viscosités souhaitées, les distillats obtenus sont :

- Spindle où huile légère (**SPO**) ;
- **SAE 10** où huile mi-visqueuse (**MVO**) ;
- **SAE 30** où huile visqueuse (**VO**) ;

- Résidu sous vide (**RSV**) est un résidu noir envoyé à l'unité 22 (désasphaltage au propane) comme matière première pour la fabrication des huiles de base très visqueuse appelées «Bright Stock» '**BS**'.

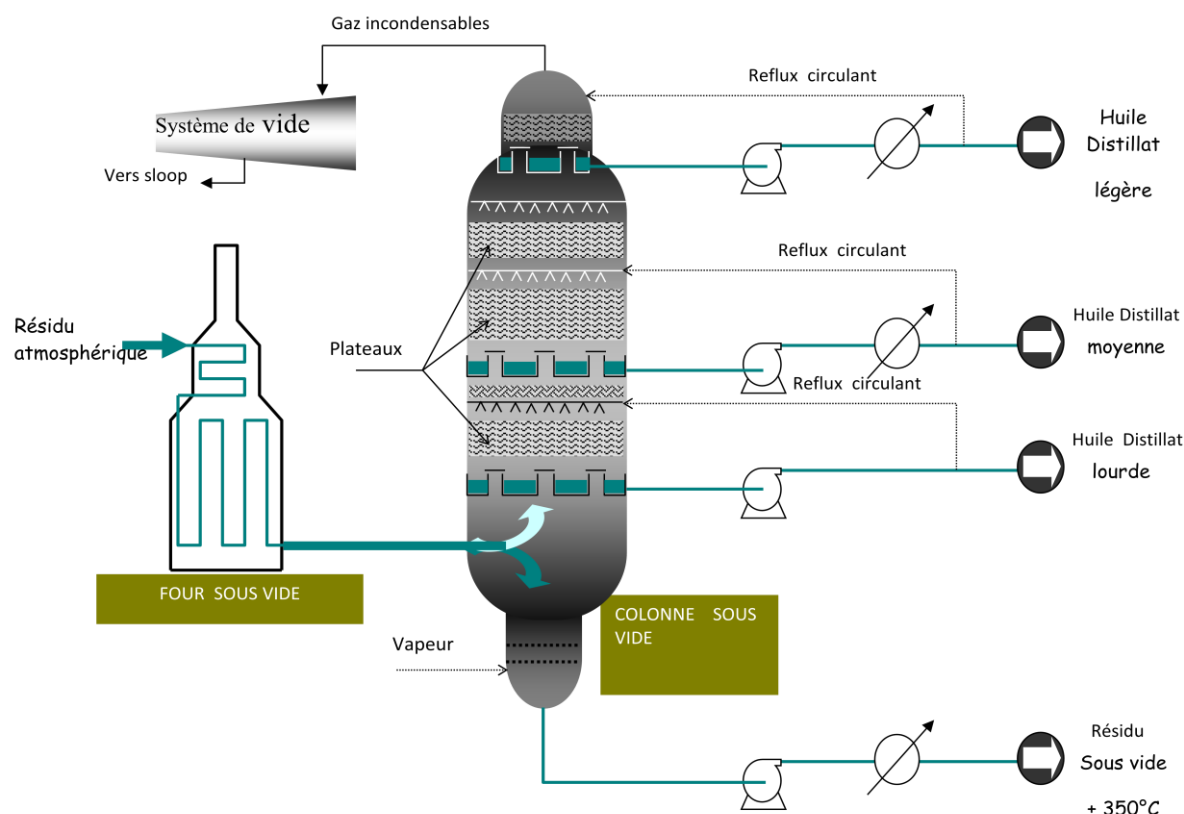


Figure III. 3 : Schéma simplifié de la distillation sous vide.

III.6.2. Le désasphaltage au propane :

Le but de ce procédé est d'obtenir une huile lourde appelée distillat « Bright stock » à partir du résidu sous vide, où sont éliminés les produits asphaltiques et résineux qui nuisent à la stabilité thermique de l'huile et donne une mauvaise couleur.

Le désasphaltage au propane est un procédé d'extraction réalisé par raffinage au solvant. Il est parmi les procédés les plus utilisés.

Dans une colonne à disques rotatifs, cette opération est effectuée à contre-courant d'un flux de résidu sous vide et un flux de propane. La phase huileuse appelée souvent « DAO » ; soluble dans le propane est séparée d'un mélange résines-asphalté qui décante au fond de la colonne.

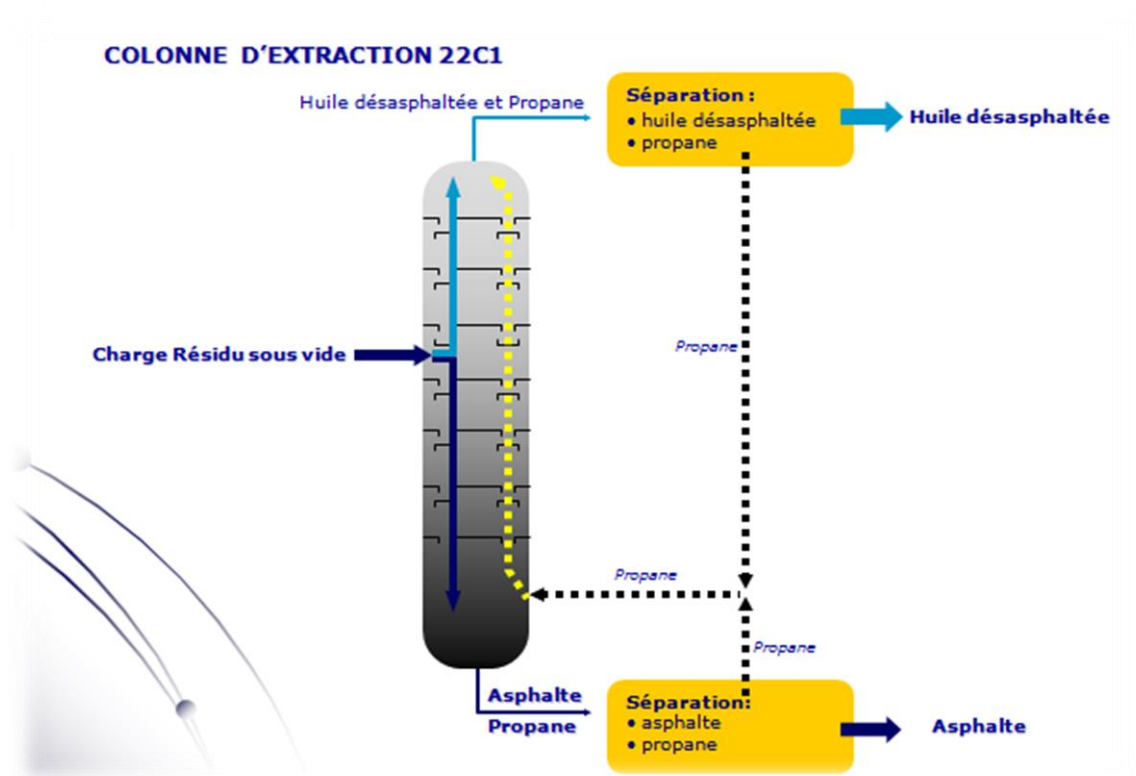


Figure III.4 : schéma simplifié de désasphaltage au propane.

III.6.3. l'extraction au furfural :

Le but de cette opération est l'amélioration de l'indice de viscosité, en se débarrassant des composés instables à l'oxygène, l'objectif visé de cette opération est l'élimination des constituants aromatiques contenant dans le distillat en présence d'un solvant sélectif tel que le furfural qui possède une solubilité préférentielle.

Le traitement avec le furfural est très actif surtout avec les hydrocarbures aromatiques puis avec les hydrocarbures naphéniques.

Après séparation on obtient deux phase dont la première est le raffinat riche en composants paraffiniques et la deuxième un extrait riche en aromatiques.

Chapitre III : Chaîne de fabrication des huiles lubrifiantes

L'unité traite quatre distillats provenant de l'unité distillation sous vide :

- La spindle ou SPO ;
- La mi-visqueuse ou MVO ;
- La visqueuse ou VO ;
- La brigt stock ou BS.

L'unité comprend quatre sections principales qui sont :

- La section de traitement de la charge ;
- La section de récupération du raffinat ;
- La section de récupération de l'extrait ;
- La section de récupération du solvant.

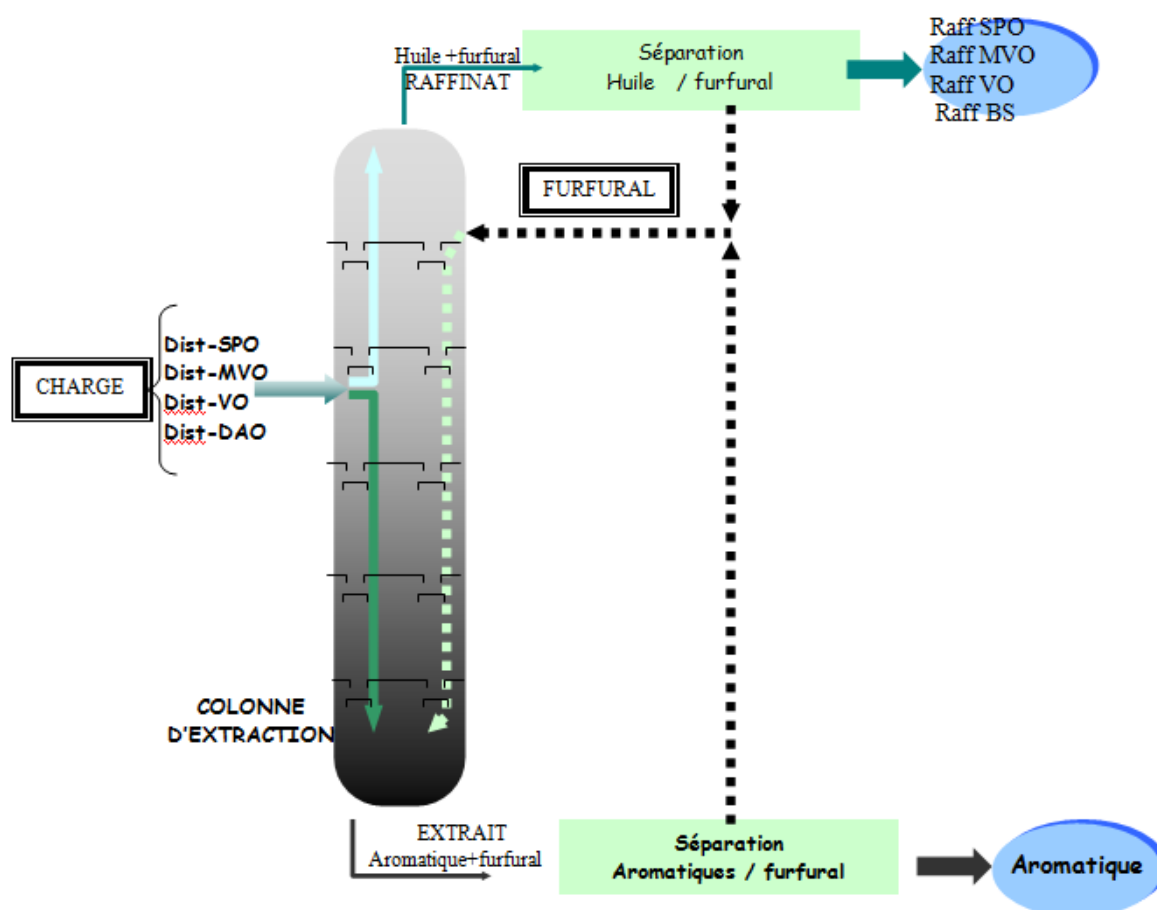


Figure III.5 : schéma simplifié de l'extraction au furfural

Chapitre III : Chaine de fabrication des huiles lubrifiantes

III.6.4. Le déparaffinage au méthylethylcétone /toluène :

Les quatre grades de raffinat ont été débarrassées de la majorité des aromatiques, cette opération a permis d'ajuster l'indice de viscosité (VI), le raffinat est constitué de molécules paraffiniques à chaines linéaires ou ramifiées et naphténiques.

Les molécules paraffiniques à chaines droites ou ramifiées ont tendance à se cristalliser lorsque la température baisse, or l'huile doit garder sa fluidité dans les moteurs à des températures très basses -20°C . Il est indispensable d'éliminer ces molécules à point de congélation élevé. L'objectif de l'unité est d'abaisser le point de trouble et le point d'écoulement. La méthode utilisée est le refroidissement et l'utilisation des solvants dispersants MEC/toluène.

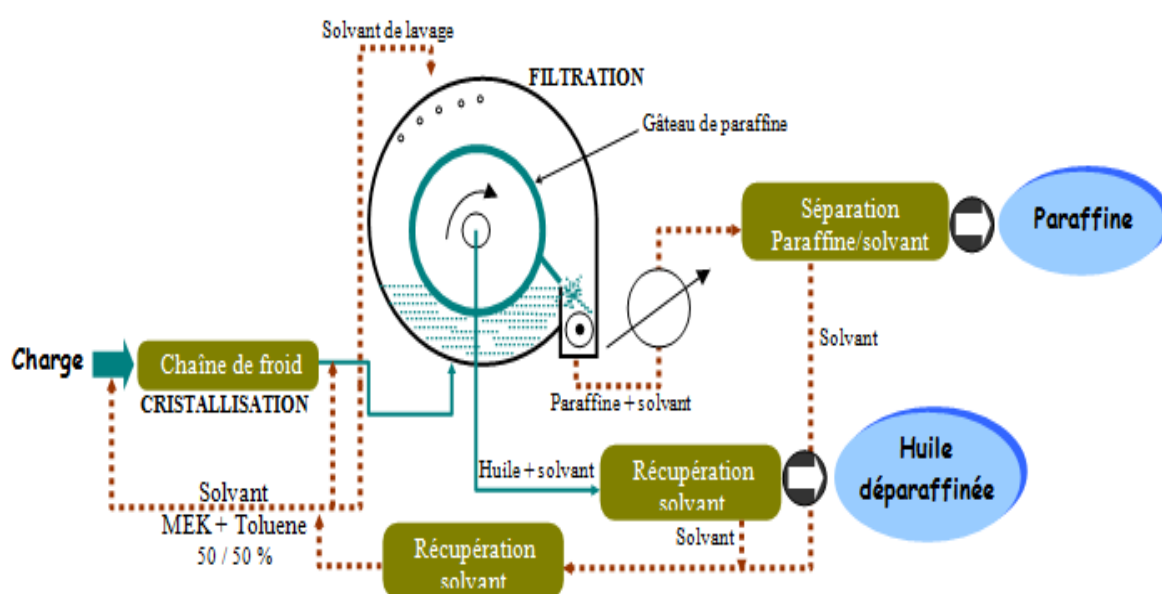


Figure III.6 : Schéma simplifié du déparaffinage au MEC/Toluène.

III.6.5. le traitement de finition :

La section d'hydrofinishing est une unité de faible sévérité. Elle a pour rôle d'éliminer les insaturés, le soufre, l'azote et l'oxygène dans le but d'améliorer les propriétés suivantes :

- la couleur ;
- Stabilité à l'oxydation ;
- Minimiser la teneur en impuretés.

Le traitement consiste essentiellement à faire passer de l'huile et de l'hydrogène à travers un lit catalytique sous des conditions modérées de température et de pression.

Chapitre III : Chaine de fabrication des huiles lubrifiantes

Le procédé utilise un catalyseur dans lequel est associé une base métallique où la réaction de décoloration et d'amélioration de la résistance à l'oxydation prend place.

Le schéma présenté par la figure ci-après, explique et montre les principaux équipements constituant l'opération d'hydrofinishing.

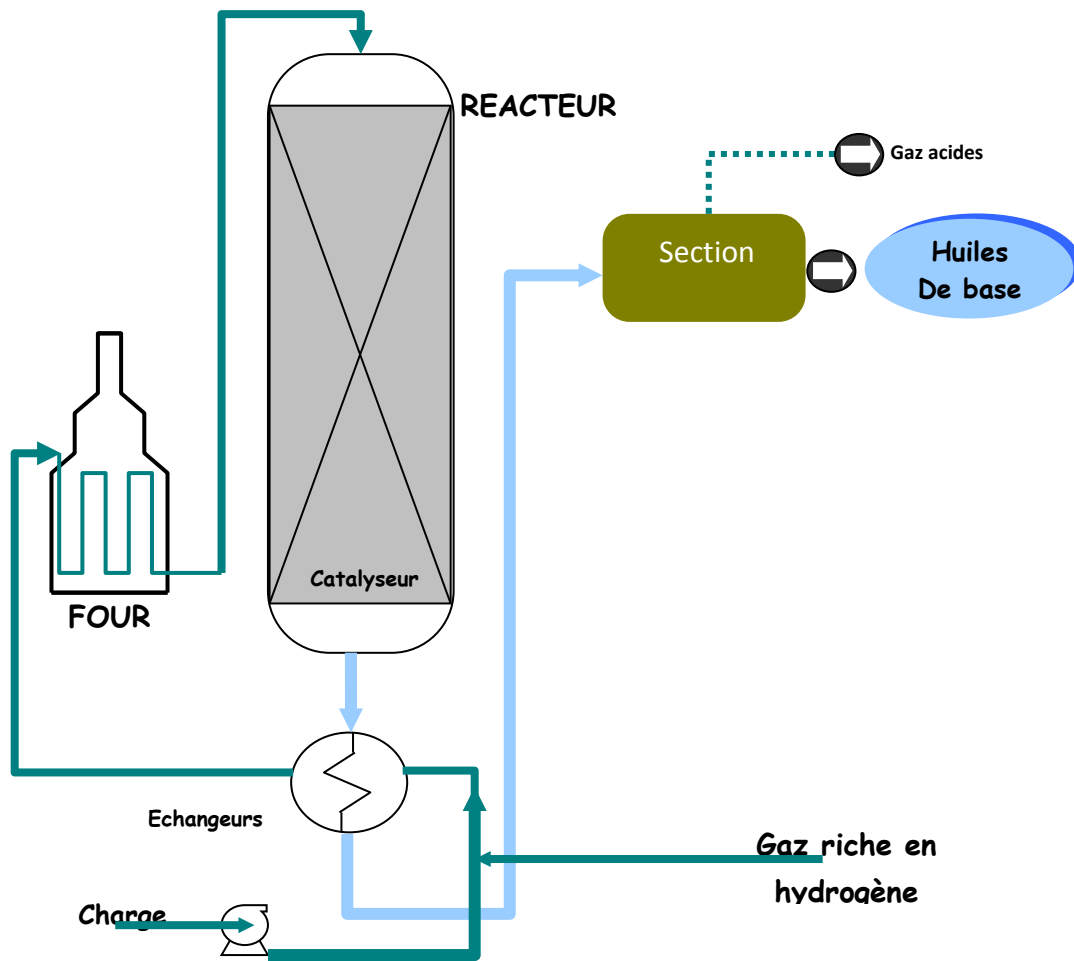


Figure III.7 : Schéma simplifié d'hydrofinishing.

III.7. Les additifs

Les additifs sont des produits chimiques complexes qui sont incorporés aux huiles de base, dont le but d'améliorer certaines propriétés ou de leur en apporter de nouvelles. Les mélanges et les dosages des différents composants entrant dans une formulation de lubrifiant doivent tenir compte des antagonistes ou des synergies des produits entre eux. Il existe des additifs ne possédant qu'une seule fonction tandis que d'autres, à structure souvent plus complexe sont «multifonctionnels».

En effet la réaction d'un additif avec une huile de base donnée dépend de la composition chimique de l'additif, de la quantité qui est utilisée, du type du degré de raffinage et de la nature chimique de l'huile de base.

Il dépend aussi du type de moteur et des conditions de service auxquelles il doit répondre le plus souvent

Le rôle essentiel des additifs est de permettre au lubrifiant de s'interposer entre les surfaces des pièces mécaniques en mouvement rotatif pour diminuer les frottements et éviter l'usure.

Dans le moteur, les additifs permettent également au lubrifiant d'assurer des démarrages à des températures pouvant être très basses et de supporter des températures très élevées au niveau des premières gorges de piston.

III.7.1. Classification des additifs :

On distingue les additifs lyophiliques et les additifs lyophobiques. Les premiers ont une affinité avec les solvants, qui est la base lubrifiante. Ils sont constitués de particules colloïdales de dimensions inférieures au micromètre : additifs de viscosité, polyméthacrylates, acides gras, savons, additifs antiusure. Les seconds n'ont pas d'affinités avec le solvant dont lequel ils restent en suspension.

III.7.2. Actions des additifs :

- **Additifs détergents** : Les additifs détergents ont pour principal effet de maintenir en suspension dans l'huile les boues et particules charbonneuses afin d'éviter qu'elles se déposent et « gommant » les pièces, surtout à haute température.

Chapitre III : Chaine de fabrication des huiles lubrifiantes

- **Additifs dispersants** : contrairement aux précédents, ils agissent essentiellement à basse température en retardant la formation de dépôt ou de boues. Ce sont des sels organiques, phénates, salysilates ou sulfonâtes de métaux alcalinoterreux : calcium, baryum, magnésium.
- **Additifs abaissant le point de congélation** : on les appelait autrefois inhibiteurs de figeage. Les méthylacrylates et les acrylates améliorent le comportement à froid des huiles paraffiniques. Grâce à leur structure fibreuse, ils forment sur les microcristaux de paraffines un film très mince qui évite leur grossissement et leur agglomération. Il existe une concentration optimale de l'ordre de 0.25% au delà de laquelle le point de congélation ne s'abaisse plus.
- **Additifs de viscosité** : La viscosité des huiles diminue beaucoup lorsque la température augmente et l'on a cherché à corriger ce défaut. Si l'huile ne doit pas être trop visqueuse à froid pour faciliter le démarrage, elle ne doit pas non plus être trop fluide à chaud pour conserver une solidité raisonnable aux films lubrifiants. On utilise un faible pourcentage de produits de masse moléculaire élevée, du genre polybutènes, polyméthacrylates, polyacrylates, polymères d'oléfines, qui tendent à limiter la liberté de mouvement des molécules de la base, et ce d'autant plus que la température est plus élevée.
- **Additifs anti usure** : Utiles surtout aux basses températures, ils s'accrochent aux surfaces par des liaisons chimiques et forment des films épais et plastique qui répartissent les contraintes et réduisent l'usure. Leurs propriétés dépendent du substrat et des autres additifs qui inhibent parfois leurs actions, en particulier les détergents qui entrent en compétition avec eux pour se fixer sur les surfaces. L'usure du lubrifiant correspond à la disparition progressive de l'additif transformé en divers produits de dégradation. Lorsqu'il a entièrement disparu, le coefficient de frottement et l'usure augmentent brutalement.

Chapitre III : Chaine de fabrication des huiles lubrifiantes

- **Additifs antioxydation** : Les huiles s'oxydent en formant divers produits, résines, polymères divers qui se déposent sous forme des boues ou des vernis acides. Les additifs antioxydants, phénols, amines, composés sulfurés ou phosphosulfurés, ajoutés en faible quantité, limitent cet effet tous en protégeant les pièces contre la corrosion.
- **Additifs anti mousses** : ils empêchent la formation de mousses, ils agissent en cassant les bulles de mousse grâce à leur faible tension de surface. Il s'agit principalement de silicones et de copolymères organiques, utilisés en très faible quantité. Les quantités doivent être ajustées, car un surdosage en additif peut conduire à l'effet inverse, c'est-à-dire à une augmentation du moussage.
- **Additifs anticorrosion** : les additifs anti-corrosion agissent par adsorption sur le métal en formant de multicouches "imperméables" qui protègent le métal de l'action de l'eau, de l'air ou des composés corrosifs formés par l'huiles. [6]

IV.1. Introduction

Le traitement de finition consiste à améliorer :

- La stabilité à l'oxydation ;
- La stabilité thermique ;
- La couleur.

Les huiles ayant subi les opérations de séparation et d'extraction n'ont pas en général, toutes les caractéristiques convenables pour les divers emplois. Elles possèdent encore des substances jugées indésirables. Il s'agit d'hydrocarbures insaturés (dioléfines), non hydrocarbures (composés azotés, oxygénés sulfurés). Pour cela, il est nécessaire de les faire subir une opération appelée raffinage des huiles ou traitement de finition.

Le but de cette opération consiste à clarifier et à stabiliser ces huiles en éliminant les composés indésirables cités ci-dessus en vue d'obtenir des produits répondant aux exigences commerciales du marché.

Ce traitement peut être réalisé par des terres activées appelées terres décolorantes de type silicate d'alumine ou par voie catalytique en présence d'hydrogène sur catalyseur.

IV.2. Raffinage des huiles par la terre activée

Généralement dans les raffineries, dans le domaine de la terre activée, on applique deux méthodes :

- Raffinage par contact à la terre activée finement broyée (raffinage par contact avec les adsorbants) ;
- Filtration à travers une couche de terre activée en granules (méthode de filtration ou de percolation).

Chapitre IV : Théorie sur le traitement de finition

IV.2.1. Raffinage par contact avec les adsorbants :

Le raffinage par contact avec les adsorbants est basé sur le fait que l'huile à traiter est mélangée en continu dans les proportions convenables à la terre activée. Le mélange ensuite est chauffé préalablement dans un préchauffeur, puis introduit dans un four où il est porté pendant quelques minutes à la température requise, pour achever le processus d'adsorption.

Après refroidissement, le mélange est filtré en vue de séparer l'adsorbant de l'huile.

La vitesse de pénétration des hydrocarbures dans les pores de l'adsorbant dépend de la granulométrie de celui-ci.

La température joue un rôle important dans le processus d'adsorption. La capacité de l'adsorbant dépend en grande mesure de la température de chauffage du mélange. Lorsque la température augmente, la viscosité de l'huile diminue et il en résulte l'amélioration de la pénétration de celle-ci dans les pores de l'adsorbant. Dans ce cas, la surface de l'adsorbant est utilisée complètement. Or, plus grande est la viscosité de l'huile, plus grande sera la température.

Chaque adsorbant exige une température optimale du procédé qui est fonction du diamètre des pores de l'adsorbant et de la perte de son activité au cours du chauffage.

Généralement, on effectue le raffinage par contact à des températures comprises entre 120 et 300°C en fonction de la viscosité de l'huile et de la nature de l'adsorbant.

Il faut signaler que l'augmentation de la température conduit à une décomposition catalytique partielle du produit de départ à raffiner, ce qui constitue un des inconvénients du traitement à haute température.

Les terres activées utilisées dans ce procédé sont des argiles naturelles activées (bentonites de la famille montmorillonite et les aluminosilicates) auxquelles on fait subir un traitement à l'acide sulfurique H_2SO_4 ou chlorhydrique HCl . Ce traitement permet en particulier d'éliminer les sels alcalins et alcalino – terreux et confèrent à ces argiles leur pouvoir adsorbant (décolorant). Parmi les terres décolorantes, on peut citer quelques argiles appartenant aux silicates d'alumine de formules diverses:

Chapitre IV : Théorie sur le traitement de finition

- Halloysite $\text{Al}_4(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$
- Attapulgite $\text{Mg}_5\text{Al}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Montmorillonite $5\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{MgCa})\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Les avantages et les inconvénients du procédé du raffinage par contact avec les adsorbants :

L'un des avantages de cette méthode consiste en ce que le produit est purifié en continu et toutes les impuretés sont extraites d'un seul coup.

Les inconvénients essentiels sont les pertes d'huile entraînées par l'adsorbant (30 à 40 %), la difficulté de récupération de l'adsorbant et la décomposition partielle des hydrocarbures du produit à traiter.

IV.2.2. Raffinage aux adsorbants par la méthode de filtration ou par percolation :

La filtration ou percolation est l'un des premiers procédés par adsorption utilisés lors de la production des huiles. La méthode consiste à faire passer le mélange d'huile sur un lit fixe d'adsorbant à l'état de granulés dans un ou plusieurs grands filtres cylindriques. L'huile passe lentement à travers la terre à une température basse. Lorsque le mélange est liquide comme dans le cas actuel, l'opération prend le nom de percolation.

L'adsorbant granulé utilisé dans le traitement par percolation est la terre décolorante naturelle ou la bauxite calcinée ou le gel de silice.

L'huile se clarifie et les portions de celle-ci sortant du filtre sont décolorées, les portions suivantes sont de plus en plus colorées par les corps résineux suite à l'épuisement de propriétés décolorantes de la terre. Selon la viscosité du produit à filtrer à laquelle est liée la capacité de diffusion des molécules d'huile, dans les pores de l'adsorbant et, par conséquent l'efficacité de l'opération, la filtration s'effectue avec des températures de 20 jusqu'à 100°C. L'augmentation de la température améliore les propriétés adsorbantes de la terre et comme la viscosité de l'huile est alors réduite, celle-ci pénètre plus aisément dans les pores de l'adsorbant.

Les produits à haute viscosité sont, avant de les faire passer à la filtration doivent être dissout dans la solution de l'essence ou de ligroïne.

Chapitre IV : Théorie sur le traitement de finition

Pour la régénération de la terre épuisée, celle-ci doit être lavée à l'essence ou la plupart des corps sont éliminés de la terre, puis on évapore l'essence qui reste dans la terre après égouttage. Ensuite la terre est transférée dans un four rotatif où elle est calcinée à une température variable supérieure à 600°C et suivant sa nature.

Les avantages et les inconvénients du procédé de la percolation de l'huile :

Si le procédé par percolation est économique du point de vue utilisation de la terre, il a un certain nombre d'inconvénients : la nécessité des installations très volumineuses ce qui entraîne des frais d'investissements considérables, les opérations de chargement, d'évacuation et de régénération des adsorbants exigeant beaucoup de main d'œuvre. Toutefois, les conditions de température modérées du procédé et l'absence de décomposition des hydrocarbures de l'huile constituent les principaux avantages du procédé.

Chaque cycle de filtration comprend les opérations suivantes :

- Remplissage de l'adsorbant ;
- Remplissage de l'huile ;
- Filtration ;
- Lavage à la ligroïne ;
- Évacuation de l'adsorbant ;
- Régénération de l'adsorbant.

IV.3. hydroraffinage ou traitement catalytique à l'hydrogène (ferrofinig)

Les procédés d'hydroraffinage ont pris une place très importante dans le raffinage des produits pétroliers. [15]

Le développement industriel de ces procédés a longtemps été limité par le coût élevé de l'hydrogène. La disponibilité de grandes quantités d'hydrogène, sous produits des opérations de réformation catalytique, et la demande en produits de qualité sans cesse améliorée ont conduit à un large développement de ces procédés.

Ce procédé consiste à traiter sous pression d'hydrogène une coupe pétrolière à l'aide d'un catalyseur solide et vise principalement à enlever les impuretés soufre, azote et oxygène, etc. (en quantités variables selon la nature et la provenance du pétrole brut) qui sont nuisibles à la

Chapitre IV : Théorie sur le traitement de finition

bonne qualité des produits pétroliers et à augmenter le rapport H/C par hydrogénation des composés insaturés. [16]

Parmi les nombreuses méthodes préconisées pour leur élimination, ce sont actuellement les traitements catalytiques en présence d'hydrogène qui sont les plus répondus. [15]

IV.3.1. Caractéristiques générales des réactions d'hydrosulfuration :

Les réactions d'hydrosulfuration sont essentiellement caractérisées par la rupture des liaisons C-S, C-O et C-N. Elles conduisent à la formation d'hydrocarbures et à l'élimination du S, N, O sous forme d'H₂S, NH₃ et H₂O respectivement.

Les réactions d'hydrosulfuration sont des réactions exothermiques. Sous pression d'hydrogène, elles peuvent toutes être considérées comme pratiquement complètes (en dessous de 400°C). Les réactions de saturation des oléfines le sont également.

L'exothermicité varie suivant les réactions. Les réactions parallèles de saturation sont elles beaucoup plus fortement exothermiques.

Chapitre IV : Théorie sur le traitement de finition

RÉACTIONS		CHALEUR DE RÉACTION		
		kcal/mole	kcal/mole H ₂	kcal/l H ₂
Dérivés sulfurés				
Mercaptans :	$R-S-H + H_2 \rightarrow RH + H_2S$	12,5 17,0*	12,5 17,0*	0,56 0,76
Thioéthers :	$R-S-R + 2H_2 \rightarrow RH + R'H + H_2S$	27,0 34,0*	13,5 17,0*	0,60 0,76
Cyclothioéthers :	$R-S + 2H_2 \rightarrow RH + H_2S$	28,0 34,0*	14,0 17,0*	0,62 0,76
Thiophènes :	 + 4H ₂ → R'H + H ₂ S	65,0	16,25	0,72
Disulfures :	$R-S-S-R' + 3 H_2 \rightarrow RH + R'H + 2H_2S$	50,0 42,0*	16,7 14,0*	0,75 0,62
Dérivés azotés				
Amines :	$R-NH_2 + H_2 \rightarrow RH + NH_3$	19,0*	19,0*	0,85
Dérivés oxygénés				
Alcools :	$R-OH + H_2 \rightarrow RH + H_2O$	24,0*	24,0*	1,07
Phénols :	 + H ₂ →  + H ₂ O	16,0 ⁺	16,0 ⁺	0,71
Éthers :	$R-O-R' + 2H_2 \rightarrow RH + R'H + H_2O$	47,0*	23,5*	1,05

Tableau IV.1 : les réactions de traitement à l'hydrogène

IV.3.2. Considérations cinétiques :

IV.3.2.1. Les réactions :

De nombreux travaux ont été publiés sur les réactions d'hydrotraitement de produits sur divers catalyseurs dont l'hydrodésulfuration ; les mercaptans, sulfures, disulfures réagissent aisément pour conduire aux hydrocarbures saturés ou aromatiques correspondants. Les thiophènes et principalement les dérivés benzothiophéniques et dibenzothiophéniques sont plus difficiles à hydrogéner. La réaction est généralement limitée à la rupture de la liaison C-S suivie de la saturation de la double liaison créée.

Chapitre IV : Théorie sur le traitement de finition

Les réactions d'hydrodénitification ont fait l'objet de travaux moins nombreux quoique, ces derniers temps, elles aient fait l'objet d'une attention particulière par suite de l'importance de l'élimination des dérivés azotés pour éviter l'empoisonnement des catalyseurs dans les réactions de réformation et d'hydrocraquage catalytiques. Ces réactions sont nettement moins rapides que les réactions de désulfuration. L'azote est éliminé sous forme d'ammoniac.

A coté des réactions d'hydroraffinage, des réactions de saturation peuvent se produire elles sont importantes dans le cas des oléfines et limitées dans celui des aromatiques. Pour une désulfuration de 90%, la saturation des oléfines est d'environ 70 %. L'augmentation de la pression favorise l'hydrogénation des oléfines.

Le rapport des vitesses de saturation et d'hydrodésulfuration est favorisé par l'augmentation de la pression.

IV.3.2.2. Les catalyseurs :

Les catalyseurs utilisés en hydroraffinage sont des catalyseurs d'hydrogénation non empoisonnés par le soufre et l'azote. Leurs caractères craquant a été réduit au minimum afin d'obtenir une bonne sélectivité d'hydroraffinage, donc une consommation d'hydrogène minimale. Notons que pour certaines applications ce caractère est au contraire recherché (hydrocraquage).

Les catalyseurs les plus employés sont à base d'oxyde ou de sulfure de métaux Co, Ni, Mo, W, généralement supportés sur alumine. La formule la plus employée est celle du "molybdate de cobalt sur alumine".

Le catalyseur agirait sous forme d'un complexe car il est plus actif que celui obtenu par simple mélange des constituants Mo et Co.

Le catalyseur est mis dans les réacteurs sous leur forme oxyde et il se sulfure in situ. Leur activité est plus élevée sous forme sulfure que sous forme oxyde. La durée de vie de ces catalyseurs est longue. Elle dépasse plusieurs années et ils peuvent subir plusieurs régénérations. Ces régénérations s'effectuent par combustion des dépôts de coke à l'air dilué à la vapeur d'eau. La température doit être contrôlée afin de ne pas dépasser une température généralement comprise entre 500 et 550°C suivant les catalyseurs.

Chapitre IV : Théorie sur le traitement de finition

Le support, généralement de l'alumine active, peut être différent : bentonite, addition de SiO_2 .

Le procédé d'hydrotraitement s'effectue dans un réacteur chimique catalytique.

IV.3.3. Principaux paramètres du procédé :

IV.3.3.1. Température :

A la température inférieure à 340°C , la désulfuration en phase vapeur se déroule faiblement. On utilise généralement 400°C , plus de cette température le catalyseur se cokéfie, c'est à dire il se produit l'hydrocraquage et la condensation des structures.

IV.3.3.2. Pression :

Le degré de désulfuration augmente avec l'augmentation de la pression ou précisément la pression partielle de l'hydrogène. L'augmentation de la pression partielle de l'hydrogène diminue la formation du coke du catalyseur, donc accroît la durée de vie du catalyseur, enfin augmente la saturation des oléfines et l'hydrogénation des aromatiques laquelle provoque une consommation élevée de l'hydrogène. On utilise une pression de 20 à 70 atmosphères.

IV.3.3.3. Vitesse spatiale :

La diminution de la durée de contact conduit à la diminution du degré d'hydroraffinage, donc de la diminution de la consommation de l'hydrogène et la cokéfaction du catalyseur.

IV.3.3.4. Pureté du gaz :

On emploie souvent un mélange de gaz provenant du reforming catalytique qui contient 65 à 85 % d'hydrogène. [17]

V.1. Introduction

Le procédé d'hydrofinishing a été développé par la compagnie de BRITISH PETROLEUM.

Ce procédé a pour but le traitement par l'hydrogène des huiles déparaffinées et raffinées par solvant, pour produire des huiles lubrifiantes de base ayant une couleur appropriée et thermiquement stable. Ce procédé remplace les unités de traitement à l'acide et à la terre classique.

En conséquence, grâce au procédé d'hydrofinishing on élimine les problèmes de manutention d'acide et de la terre exigés pour l'exploitation de l'unité. Par contre le rendement obtenu est plus faible par rapport au rendement de l'unité du traitement à l'acide et la terre.

V.2. Description du procédé

L'unité d'hydrofinishing consiste en les sections suivantes :

- Réaction catalytique du stock d'alimentation avec l'hydrogène ;
- Le strippage et le séchage des huiles hydrotraitées.

Le déroulement du procédé est démontré selon le schéma inclus :

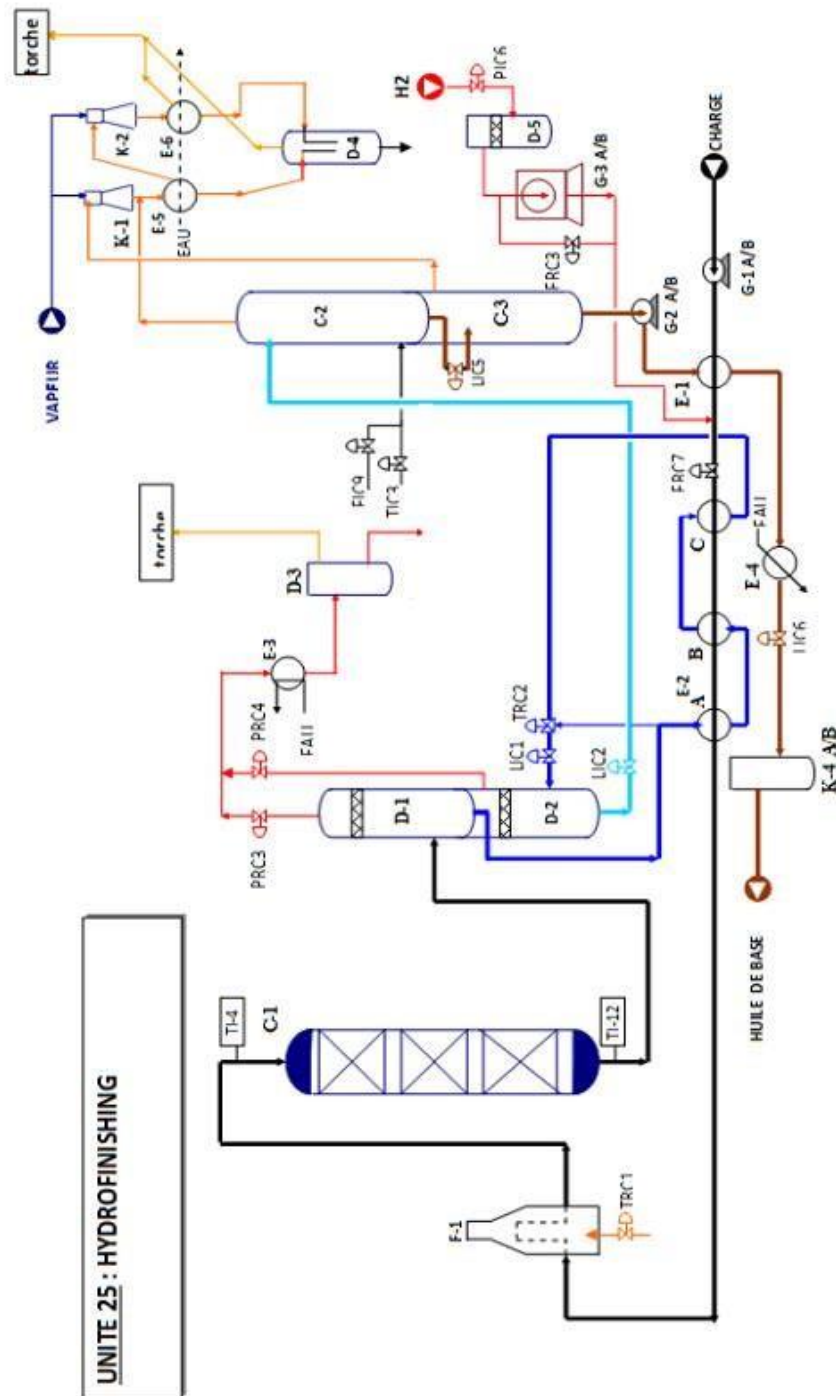


Figure V.1 : Schéma du circuit de l'unité d'hydrofinishing

Chapitre V : le procédé d'hydrofinishing

V.2.1. Section de réaction :

Le gaz riche en hydrogène est alimenté par l'unité d'hydrobon-platforming, et la pression est augmentée à un certain niveau conformément aux conditions de marche de l'unité par le compresseur de gaz (25-G3). L'huile déparaffinée est alimentée à l'unité par la pompe d'alimentation des huiles déparaffinée (25G1) et réchauffée à travers l'échangeur d'alimentation/fond de colonne de séchage, et par suite combinée au gaz riche en hydrogène. Le mélange d'huile et de gaz riche en hydrogène est réchauffé à travers l'échangeur d'alimentation/effluent de séparateur à haute pression (25-E2) et à travers le four de charge (25-F1) où il est élevé à la température de traitement avant qu'il soit chargé au réacteur (25-C1).

Le mélange d'alimentation passe uniformément à travers le plateau de répartition et à travers le lit fixe du catalyseur où la réaction d'hydrotraitement se produit.

L'effluent quittant le réacteur est introduit au séparateur à haute pression (25-D1) où le gaz détendu est séparé du liquide.

L'huile liquide provenant du séparateur haute pression (25-D1) où le gaz détendu est séparé du liquide. L'huile liquide provenant du séparateur à haute pression est refroidie à une température de 145-230°C à travers l'échangeur d'alimentation/effluent du séparateur à haute pression (25-E2) et ensuite conduit au séparateur à basse pression (25-D2) fonctionnant à 40 psig, le gaz léger détendu est enlevé de la tête. Le gaz provenant des deux stages des séparateurs à haute pression et basse pression est refroidi à 37,8°C à travers le réfrigérant du gaz d'échappement (25-E3) et ensuite dirigé au tambour de séparateur (25-D3) où le gaz est envoyé vers le réseau gaz de la raffinerie et le liquide est drainé comme rejet de fabrication.

V.2.1. Section de stripping et séchage des huiles hydrotraitées

L'huile issue de séparateur basse pression 25D2 est introduite dans la colonne de stripping 25C2 fonctionnant à 100 mm Hg qui reçoit une injection de la vapeur d'eau pour obtenir une huile ayant un point d'éclair propre ; ensuite l'huile est introduite dans la colonne de flash 25C3 fonctionnant sous vide où l'huile est débarrassée de ces derniers traces d'impuretés. Ces gaz incondensables sont aspirés par un vide créé par les éjecteurs puis ils passent à travers des condenseurs 25E5 et 25E6 où les traces d'eau sera condensées puis décantées dans 25D4 alors que le reste des gaz sont acheminés vers la torche.

Chapitre V : le procédé d'hydrofinishing

Le système sous vide est équipé des éjecteurs à deux étages avec des condenseurs à surface.

Le fond de la colonne de séchage est refroidi à travers l'échangeur d'alimentation/fond de colonne de séchage (25-E1) et le réfrigérant de produits (25-E4) et ensuite passe à travers un filtre avant son déchargement dans un bac de stockage de l'huile de base comme produit fini.

Conditions de marche :

Conditions du réacteur

- Intervalle de température opératoire pour le lit de catalyseur, °C

Spindle	Mi-Visqueux	Visqueux	Bright stock
250-275	250-290	250-290	250-290

- Vitesse spatiale horaire liquide

1 volume de charge liquide à 15,5 °C / volume du catalyseur/heures à 10 m³/h

La vitesse spatiale donc varie entre 1 v/v/h dans le cas du spindle et 0,66 v/v/h dans le cas du Bright stock ;

- La pression partielle de l'hydrogène à l'entrée du réacteur est de 22 kg/ cm² absolu ;
- Le taux d'hydrogène à l'entrée du réacteur est de 25 m³/m³ ;
- La consommation chimique de l'hydrogène dans le réacteur est de 5 m³/m³.

V.3. Effets des variables du procédé

Le procédé de l'unité d'hydrofinishing est contrôlé par les variables décrites ci-dessus. Elles sont classées selon l'importance de leurs effets sur la qualité des produits.

V.3.1. La température du réacteur est contrôlée par la température d'entrée :

L'élévation de la température à l'entrée du réacteur augmente la température du lit de catalyseur, ce qui favorise les réactions de l'hydrodésulfuration et de l'hydrogénation. Cependant l'élévation excessive de la température du lit du catalyseur ne donne pas toujours des résultats favorables sur les produits. La température du réacteur doit être contrôlée d'une manière précise afin qu'elle soit proche de la température de calcul. La température est élevée proportionnellement à la diminution de l'activité du catalyseur.

V.3.2. Vitesse spatiale :

La vitesse spatiale nominale varie entre 10 m³/h dans le cas du spindle et 6,6 m³/h pour le Bright stock.

V.3.3. Pression du réacteur :

La pression à l'entrée du réacteur est maintenue constamment à la pression nominale de 400 psig , indépendamment de la teneur en hydrogène dans le gaz d'appoint.

V.3.4. Consommation d'hydrogène :

La consommation d'hydrogène est variable selon les propriétés et la nature des huiles déparaffinées constituant la charge de l'unité d'hydrofinishing.

Dans les conditions de fonctionnement normales le gaz contient une quantité d'hydrogène supérieure à celle nécessaire pour la réaction chimique, l'excédent d'hydrogène réduit le dépôt du carbone sur le catalyseur ce qui permet une durée d'utilisation plus longue du catalyseur entre chaque régénération.

V.3.5. Rapport H₂/huile :

Le taux d'hydrogène à l'entrée du réacteur, exprimé en hydrogène pur, est de 25m³ / m³ d'huile alimentée.

L'hydrogène contenu dans le gaz frais représente 80% du gaz .Il est convenable au point de vue de fonctionnement de l'unité de maintenir le taux du gaz à ce niveau meme pendant le traitement des autres grades à des taux d'alimentation inférieurs. Il n'y a aucun avantage pour la qualité des produits et la durée du catalyseur que l'exploitation s'effectue à un taux de gaz supérieur au niveau nominal de 25m³ d'hydrogène par m³ d'huile alimentée. [7]

VI.1. Introduction

La transmission de la chaleur ou la théorie d'échange de chaleur est une science qui traite de la propagation de la chaleur dans différents milieux. [8]

L'application des différents modes de transfert de chaleur dans le design des appareils industriels d'échange de chaleur est d'une grande importance. Les dépenses thermiques au niveau d'une unité industrielle sont énormes et il est indispensable de récupérer cette énergie pour l'utiliser au mieux dans la chaîne de fabrication. [5]

L'expérience montre que deux corps isolés de l'ambiance et à température différente échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à disparition complète de leur différence de température. Cet échange peut se faire de trois façons différentes : la conduction, la convection et le rayonnement. [9]

En réalité, tout échange thermique s'effectue simultanément sous les trois formes précédentes mais, généralement, l'une d'elles est prédominante et les autres peuvent être négligées.

Les procédés utilisés dans l'industrie du raffinage des produits pétroliers demandent souvent que les fluides traités soient réchauffés ou refroidis, avec ou sans changement de phase. De ce fait les fours et les échangeurs de chaleur constituent des appareillages importants dans toute unité de raffinage. [10]

VI.2. Les fours pétroliers

Dans la plupart des unités de raffinage ou pétrochimie l'apport de la chaleur nécessaire au procédé se fait par l'intermédiaire d'un four dans lequel la chaleur produite par la combustion est transmise directement à un fluide à réchauffer qui circule dans un faisceau de tube. C'est pour cette raison qu'on l'appelle four tubulaire. [10]

Les fours sont des appareils dans lesquels le chauffage des fluides s'effectue par les fumées produites par la combustion d'un combustible liquide ou gazeux. Ils sont dits à chauffage direct, car la chaleur des fumées est cédée directement au fluide froid qui circule dans un serpentin tubulaire.

Ces fours sont distincts des fours à chauffage indirect, dans lesquels le fluide à réchauffer circule dans un faisceau tubulaire baignant dans un fluide chaud, lui-même chauffé directement par les fumées du combustible. [11]

Chapitre VI : Théorie sur le transfert de chaleur

Le principe de fonctionnement de ces fours pétroliers se base sur les 3 modes de transfert de chaleur :

- **La conduction** : c'est le transfert de chaleur d'une partie d'un corps à une autre partie du même corps sans déplacement appréciable des particules de ce corps (solide). La conduction caractérise également le transfert de chaleur d'un corps à un autre corps en contact physique avec le premier.
- **La convection** : c'est le transfert de chaleur d'un point à un autre dans un fluide (gaz ou liquide) par déplacement des particules de ce fluide.
- **Le rayonnement** : c'est le transfert de chaleur d'un corps à un autre, sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace. [9]

Les usages de ces fours sont multiples mais chaque cas nécessite une étude particulière dans le but de concevoir le four le plus économique et le mieux adaptés aux conditions imposées.

On peut citer les exemples suivants :

- **Réchauffage d'un fluide sans changement de phase :**

C'est le cas, par exemple, des fours à huile chaude placés sur un circuit alimentant plusieurs échangeurs où se fait le transfert des calories au procédés ; c'est encore le cas des fours de charge de certaines installations où il s'agit de porter le fluide à la température nécessaire pour obtenir une réaction chimique qui se produit dans une capacité extérieure au four (réacteur) en présence ou non d'un catalyseur. Ou bien, encore s'il s'agit du réchauffage intermédiaire d'un fluide, au cours d'une réaction chimique sur catalyseur, entre les divers stades de la réaction, pour remonter la température du produit à un niveau convenable lorsque l'endothermicité de la réaction est importante.

- **Réchauffage d'un fluide avec vaporisation partielle :**

C'est le cas de la plupart des fours des installations de distillation (four de charge ou four rebouilleur en fond de colonne). Les fours de ce type sont d'ailleurs des plus nombreux et sont, en général, ceux dont la capacité thermique est la plus élevée.

Chapitre VI : Théorie sur le transfert de chaleur

➤ Réchauffage d'un fluide avec réaction chimique :

C'est le cas des fours de charge des unités de craquage et de réformation thermiques. Le produit est d'abord réchauffé jusqu'à la température de réaction, puis est maintenu à cette température un certain temps dans une section spéciale du faisceau appelée zone de soaking ou de maturation, où les calories transmises compensent celles absorbées par la réaction. [10]

VI.2.1. Caractéristiques générales des fours tubulaires :

Un four tubulaire est conçu et calculé pour permettre de transférer au fluide une quantité de chaleur donnée par heure, le débit et les températures d'entrée et de sortie étant fixés à l'avance. Il faut donc faire apparaître dans le four une quantité de chaleur suffisante, à la température voulue, pour réchauffer le fluide et compenser les pertes, et transférer la chaleur disponible au fluide dans des conditions telles que celui-ci ne soit pas détérioré.

Le four doit donc être avant tout agencé en vue de la combustion d'une quantité suffisante de combustible.

Il devra comporter les brûleurs nécessaires ; ceux-ci devront pouvoir être alimentés en combustible et en air.

Dans la plupart des fours de raffinerie, l'admission de l'air de combustion dans le four est obtenue par la dépression qui règne à l'intérieur du four. Cette dépression est elle-même due au tirage de la cheminée.

Les températures obtenues dans les produits de la combustion sont toujours très élevées. Les produits de la combustion cèdent leur chaleur aux tubes par radiation et convection ; à travers les parois des tubes, le transfert se fait par conduction ; à l'intérieur des tubes, c'est la convection qui intervient de nouveau ; enfin, les pertes calorifiques à travers les murs du four se font par conduction.

Le phénomène le plus important à prendre en considération est la radiation des produits de la combustion.

VI.2.2. Constitution d'un four :

D'une façon générale, les fours comportent les parties principales suivantes :

➤ Une zone de radiation, constituée essentiellement d'une chambre de combustion, dans laquelle des tubes sont disposés. Le fluide à réchauffer circule à l'intérieur de ce faisceau de

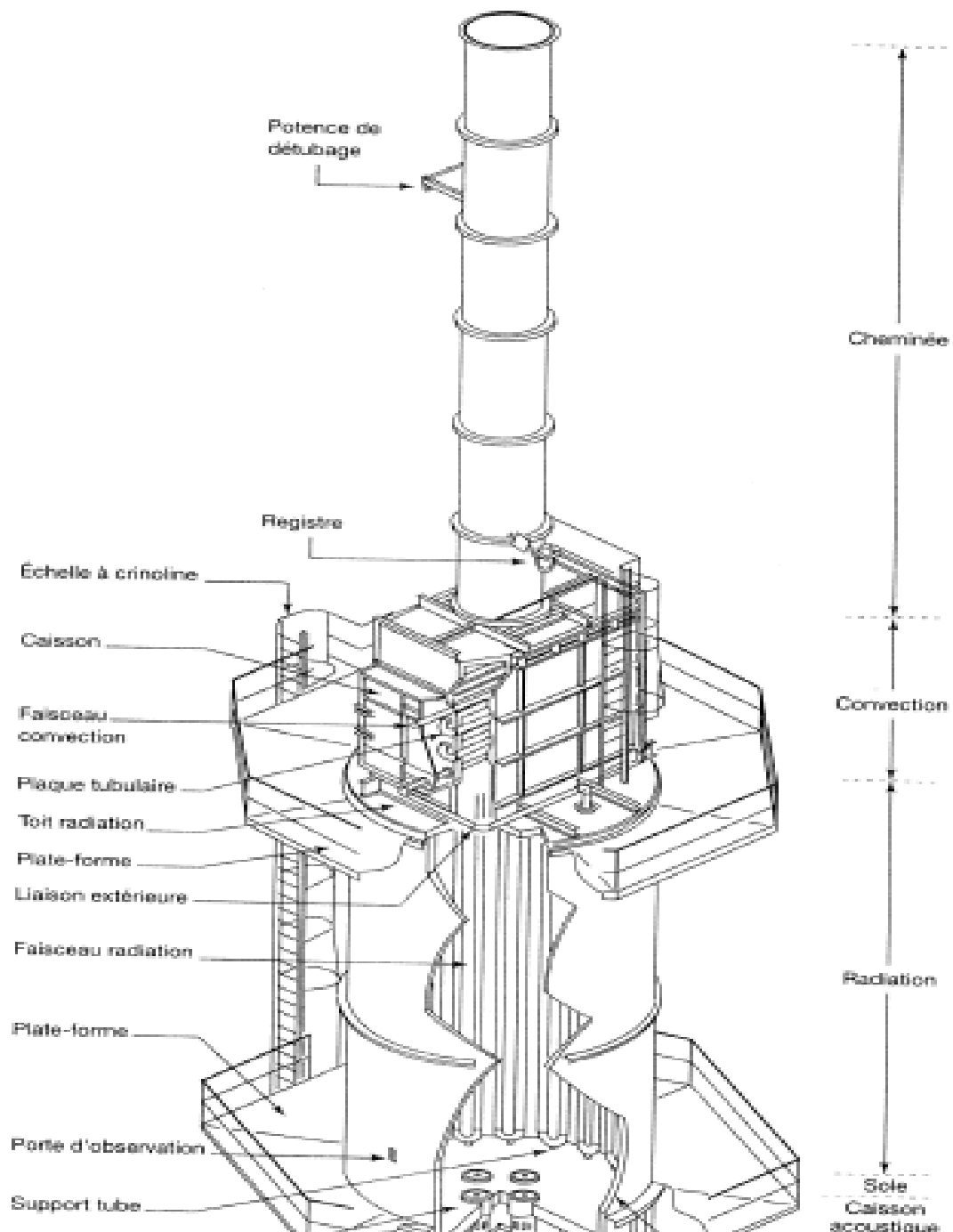
Chapitre VI : Théorie sur le transfert de chaleur

tubes. La transmission de chaleur s'effectue principalement par radiation. Une fraction de l'échange se fait également par convection entre les fumées et les tubes.

➤ Afin de récupérer la chaleur sensible des fumées, ces derniers circulent à vitesse élevée à travers un faisceau de tubes, où l'échange s'effectue principalement par convection. Cette zone est, en conséquence, qualifiée de section de convection.

Le rendement d'un four avec zone de convection est supérieur à celui d'un four ne comportant qu'une zone de radiation. Le rendement dépend de la température d'entrée du fluide chauffé, mais également de l'importance de la surface d'échange que l'on a installée.

➤ Une cheminée d'évacuation des fumées.



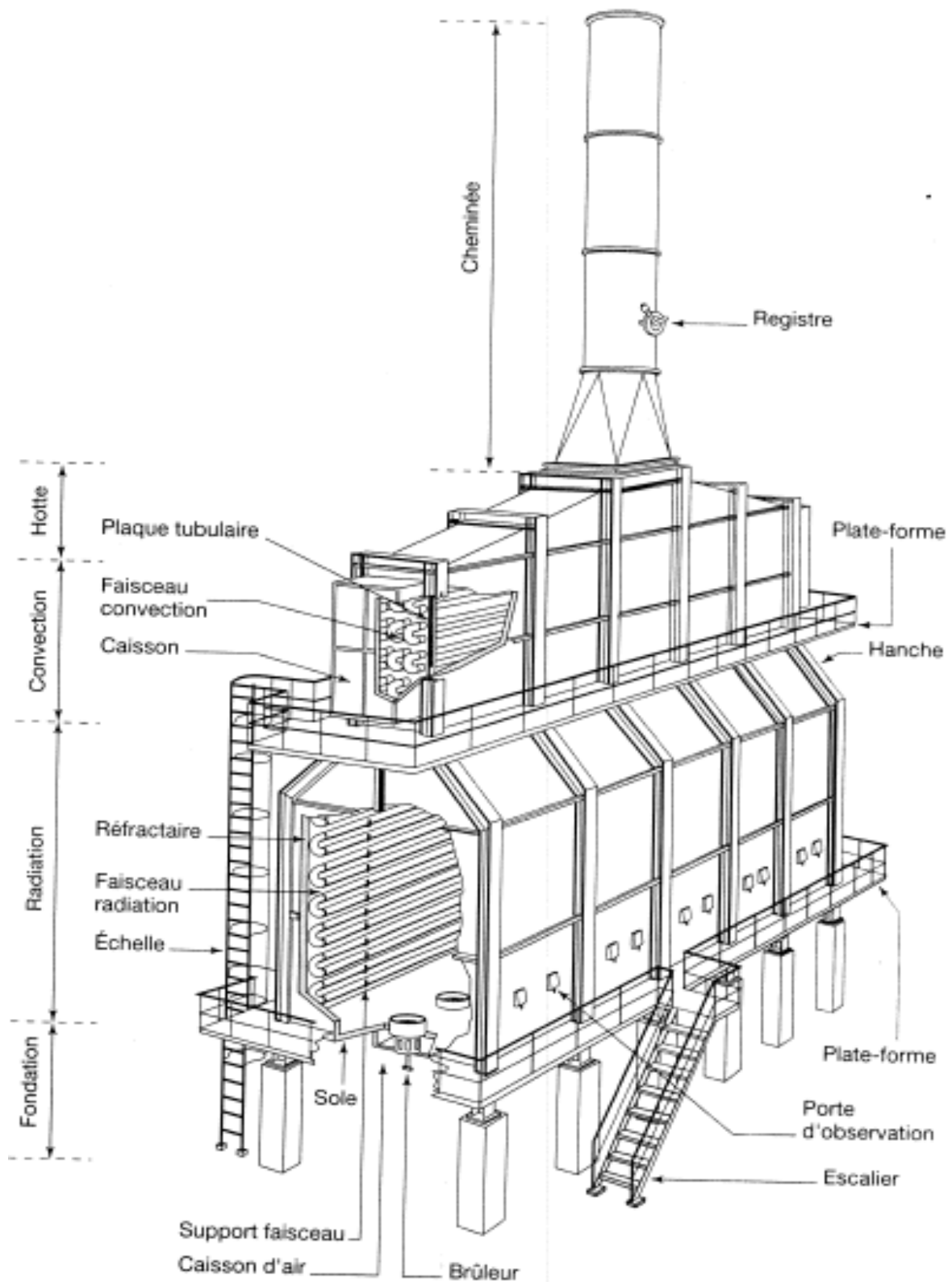


Figure VI.2 : Four cabine à tubes horizontaux.

VI.2.3. Les différents types des fours :

Il existe de nombreuses dispositions des tubes, dans les zones de radiation et de convection, il en résulte de nombreux types de fours. On peut, toutefois, distinguer les différentes catégories suivantes :

VI.2.3.1. Les fours cylindriques verticaux : la zone de radiation se présente sous la forme d'un cylindre à axe vertical, les brûleurs sont placés sur la sole, à la base du cylindre. La surface d'échange couvre les parois verticales et présentes donc une symétrie circulaire par rapport au groupe de chauffage.

VI.2.3.2. Les fours cylindriques «boîtes» à tubes verticaux : dans ces fours, la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède. Les brûleurs sont situés sur la sole, la surface d'échange couvre les parois verticales latérales. Parfois la chambre de combustion est divisée en plusieurs cellules, par des rangées de tubes parallèles à une des faces des parois latérales.

VI.2.3.3. Les fours dits «cabines» à tubes horizontaux : dans ces fours la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède, dont la plus grande longueur est horizontale. Les tubes sont placés horizontalement le long des parois latérales les plus longues. Les brûleurs sont situés sur la sole, ou sur la partie inférieure des murs latéraux les plus longs, ou encore sur les murs d'extrémités ne recevant pas les tubes.

VI.2.3.4. Les fours à chauffage par murs radiants : la surface d'échange est placée dans le plan médian de la chambre de combustion. Les brûleurs sont répartis sur les parois latérales longitudinales.

VI.2.3.5. Les fours dits à double chauffe : dans ces derniers, le plan des tubes constituant la surface d'échange, est dans le plan médian des rangs de brûleurs.

VI.2.4. Les critères de choix des fours :

Le choix d'un type de four dépend principalement des facteurs suivants :

- Nature du produit chauffé et condition de service (débit, température, pression) ;
- Drainabilité des faisceaux tubulaires ;
- Présence ou non de catalyseur dans les tubes ;
- Combustible ;
- Encombrement ;
- Facilité de construction ou de transport ;
- Coût pour une application donnée.

IV.2.5. Rendement thermique d'un four :

Les pertes de chaleur à travers les parois du four dépendent de l'épaisseur et de la matière du garnissage réfractaire isolant. Toutefois, pour un garnissage isolant économiquement optimum, ces pertes sont faibles. Pour un four d'une puissance de 10 MW ou plus, elles sont de 1 à 2% du pouvoir calorifique inférieur.

Les pertes de chaleur les plus importantes sont celles dues au rejet à la cheminée de fumées chaudes. Celles-ci sont le résultat de deux facteurs : le débit de fumées et leur température. Le débit de fumées s'accroît avec l'excès d'air. Il y a donc lieu de fonctionner avec un excès d'air aussi faible que possible, tout en veillant à obtenir une combustion complète, sans imbrulés. Un fonctionnement à excès d'air trop bas peut conduire à des pertes par imbrulés plus importantes que le gain réalisé par la réduction de l'excès d'air.

Indépendamment de la perte due à la chaleur latente des imbrulés, ceux-ci entraînent l'encrassement des surfaces d'échange et, par conséquent, une élévation de la température des fumées qui persiste après le retour à un fonctionnement sans imbrulés.

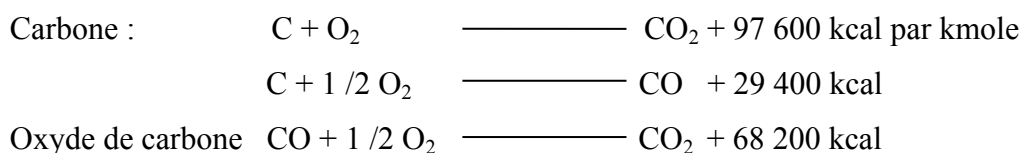
VI.2.6. La combustion :

C'est l'ensemble des réactions chimiques, se produisant au cours de l'oxydation complète ou partielle du carbone, de l'hydrogène contenus dans le combustible alimentant le four (fuel gaz : mélange d'hydrocarbures). La combustion n'est assurée qu'en présence d'un bruleur qui donne naissance à une flamme. [11]

Les combustibles utilisés dans les fours de raffinerie sont des gaz (gaz naturel ou gaz de raffinerie provenant des opérations de distillation ou de craquage ou de réformation) ou des liquides (distillats, résidus de distillation ou fuel-oils commerciaux). Ces combustibles contiennent souvent des impuretés, en particulier du soufre dont la teneur peut être négligeable suivant l'origine du combustible. Ces combustibles sont des mélanges d'hydrocarbures. [10]

➤ Réactions de combustion :

Les principales réactions de combustion sont données comme suit :



Chapitre VI : Théorie sur le transfert de chaleur

Hydrogène	$H_2 + 1/2 O_2$	—————	$H_2O + 58\,200 \text{ kcal (eau vapeur)}$ $+ 69\,100 \text{ kcal (eau liquide)}$
Soufre	$S + O_2$	—————	$SO_2 + 138\,600 \text{ kcal}$
Méthane	$CH_4 + 2 O_2$	—————	$CO_2 + 2H_2O + 192\,500 \text{ kcal (eau vapeur)}$ $+ 214\,300 \text{ kcal (eau liquide)}$
Ethane	$C_2H_6 + 7/2 O_2$	—————	$2 CO_2 + 3H_2O + 342\,000 \text{ kcal (eau vapeur)}$ $+ 373\,600 \text{ kcal (eau liquide)}$
Propane	$C_3H_8 + 5O_2$	—————	$3 CO_2 + 4H_2O + 485\,100 \text{ kcal (eau vapeur)}$ $+ 528\,700 \text{ kcal (eau liquide)}$
Butane	$C_4H_{10} + 13/2 O_2$	—————	$4 CO_2 + 5H_2O + 625\,700 \text{ kcal (eau vapeur)}$ $+ 680\,200 \text{ kcal (eau liquide)}$

Ces réactions permettent de déterminer la quantité d'oxygène et donc d'air nécessaire à la combustion.

VI.2.7. Excès d'air :

Pour avoir une combustion complète, c'est-à-dire sans présence d'oxyde de carbone dans les fumées sortant du four, il est nécessaire d'introduire dans le four une quantité d'air supérieure à celle strictement nécessaire à la combustion. Cette quantité est l'excès d'air.

Cette notion d'excès d'air est extrêmement importante. En effet, l'air en excès qui est inutile à la combustion est réchauffé au cours de son passage dans le four à la température des fumées, ce qui constitue une perte supplémentaire. Il y a donc intérêt à réduire l'excès d'air au minimum, sans toutefois descendre au-dessous d'une limite raisonnable, car l'apparition de CO dans les fumées réduit considérablement la quantité de chaleur dégagée par la combustion et peut fort bien rendre nécessaire d'augmenter la quantité de combustible, donc en définitive, diminuer le rendement plus que ne le ferait un excès d'air légèrement plus élevé permettant une combustion complète. [10]

VI.3. Les échangeurs de chaleur

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant la récupération de l'énergie thermique d'un fluide par un autre. Le flux thermique traverse la paroi de séparation des deux fluides. En effet, la chaleur peut être caractérisée comme un transfert d'énergie d'un système à un autre dû à une différence de température, ce transfert s'effectue de la température la plus importante vers la plus faible. Il s'arrête donc lorsque les deux milieux sont de températures identiques.

Chapitre VI : Théorie sur le transfert de chaleur

VI.3.1. Rôle et importance des appareils d'échange dans les procédés industriels :

La fabrication industrielle des produits chimiques nécessite de porter les charges correspondantes à des températures différentes de la température ambiante, le plus souvent par élévation de la température, parfois par abaissement. Ensuite, il convient de ramener les produits formés à une température de stockage voisine de l'ambiante. Les dépenses thermiques correspondantes sont énormes et il est indispensable de récupérer cette énergie pour l'utiliser au mieux dans la chaîne de fabrication. Pour cela, on utilise des appareils pouvant réaliser le transfert de chaleur entre phases. Ces appareils ont pour but de récupérer la plus grande quantité d'énergie possible.

Exemples d'utilisation des échangeurs de chaleur :

- Chauffer une charge d'une unité de GPL ;
- Refroidir des produits finis avant le stockage ;
- Refroidir ou chauffer des effluents intermédiaires. [12]

VI.3.2. Les fonctions des échangeurs de chaleurs :

Les échangeurs de chaleur peuvent avoir à assurer des fonctions différentes.

En général, la terminologie utilisée renseigne sur la fonction principale de l'appareil, on distingue :

VI.3.2.1. La fonction réfrigération :

Les réfrigérants refroidissent un liquide ou un gaz par circulation d'un liquide auxiliaire qui peut être un fluide de procédé ou de l'eau.

VI.3.2.2. La fonction réchauffage :

Les réchauffeurs réchauffent un fluide de procédé par de la vapeur d'eau ou un autre fluide chaud de procédé ; ces termes sont surtout employés dans le cas du réchauffage d'un produit stocké pour en assurer sa pompabilité.

VI.3.2.3. La fonction condensation :

Les condenseurs assurent la condensation totale ou partielle de vapeur par circulation d'eau ou de fluide de procédé suffisamment froid. Les aérocondenseurs assurent cette fonction en utilisant l'air comme fluide froid.

Chapitre VI : Théorie sur le transfert de chaleur

VI.3.2.4. La fonction vaporisation :

Les vaporiseurs assurent la vaporisation totale ou partielle d'un liquide de procédé, l'apport de chaleur étant fait par la vapeur d'eau ou un fluide chaud de procédé éventuellement en condensation. [12]

VI.3.3. Différents types d'échangeurs de chaleur :

On peut classer les échangeurs thermiques selon :

VI.3.3.1. Le sens d'écoulement des fluides :

- A courants parallèles : les deux fluides circulent parallèlement et vont dans le même sens ;
- A contre-courants : les deux fluides circulent parallèlement mais vont dans le sens opposé ;
- A courant croisés : les deux fluides circulent perpendiculairement.

VI.3.3.2. Le procédé de transfert :

- Les échangeurs à surface : L'échange de chaleur s'effectue entre deux fluides séparés par une paroi ;
- Les échangeurs à contact direct(ou échangeur à mélange) : aucune paroi ne sépare les deux fluides qui sont alors mélangés.

VI.3.3.3. Principe de réalisation technologique (surface d'échange) :

- Echangeurs double-tube : Ces échangeurs sont constitués par des éléments rectilignes de deux tubes raccordés à chaque extrémité par des coudes ;

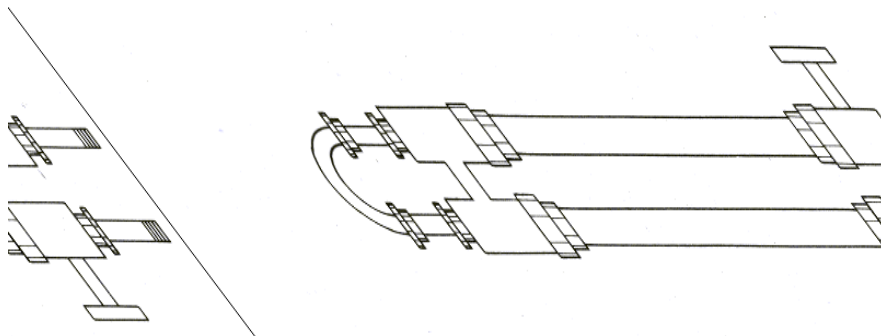


Figure VI.3 : Echangeur double-tube.

Chapitre VI : Théorie sur le transfert de chaleur

- Echangeurs à faisceau et calandre : c'est le plus répandu en raffinerie, l'appareil est constitué par un faisceau de tubes montés sur deux plaques tubulaires et portant un certain nombre de chicanes.

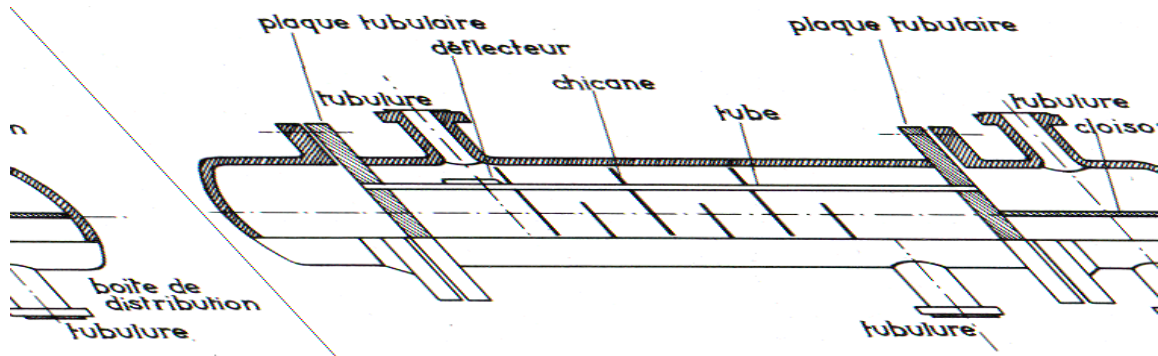


Figure VI.4 : Echangeur à plaques tubulaires fixes

VI.3.4.Critères de choix des échangeurs de chaleurs

Pour une application thermique spécifique, le choix de type d'échangeur de chaleur dépend de nombreux facteurs, on peut citer :

- Conditions de fonctionnement ;
- Conditions de tenue mécanique ;
- Conditions de maintenance ;
- Impératifs économiques (le prix de l'échangeur). [11]

VI.3.5.Etude du transfert de chaleur

Etant donné deux produits dont les températures sont différentes, la transmission de chaleur s'effectue d'un milieu plus chaud à un milieu plus froid.

Quel que soit le type de l'appareil utilisé il est possible d'établir le bilan thermique global en écrivant que la quantité de chaleur Q perdue par le fluide chaud est égale à celle récupérée par le fluide froid, si l'on néglige les pertes thermiques :

$$Q = M C_p (T_1 - T_2) = m c_p (t_2 - t_1)$$

Soit :

$$Q = M (H_1 - H_2) = m (h_2 - h_1)$$

Chapitre VI : Théorie sur le transfert de chaleur

Les lettres majuscules sont réservées pour le fluide chaud, les minuscules pour le fluide froid.

Où :

1 et 2 : indices correspondant respectivement à l'entrée et à la sortie ;

M et m : débits massiques des fluides en kg /h ;

C_p : chaleur spécifique moyenne du fluide chaud, en kcal /kg °C ;

c_p : chaleur spécifique moyenne du fluide chauffé, en kcal /kg °C

T et t : températures des fluides en °C ;

H et h : enthalpies des fluides en fonction de leurs températures T et t en kcal /kg.

Par ailleurs on peut appliquer l'équation de Fourier

$$Q = U S \Delta T_{LM}$$

Où :

Q : quantité de chaleur transmise par unité de temps en kcal /h ;

U : coefficient global de transfert de chaleur en kcal /h. m². °C ;

S : surface totale d'échange de l'appareil en m² ;

ΔT_{LM} : différence de température logarithmique moyenne en °C.

Le coefficient de transfert U dépend de plusieurs facteurs : nature du fluide, sa vitesse d'écoulement, composition chimique du matériau et dimension du tube, taux d'encrassement de la paroi qui sépare les deux fluides...etc. [12]

Chapitre VIII : Vérification du rendement du four

VIII.1. Conditions de service du four 25-F1 de l'unité d'hydrofinishing

Le four 25-F1 qui réchauffe l'huile déparaffinée est de type cylindrique qui comprend une zone de radiation et une zone de convection. Il est équipé d'un seul brûleur à air induit. Les conditions de service sont données dans le tableau suivant :

Température entrée (°C)	164
Température sortie (°C)	230
Débit de la charge (m ³ /h)	8
Débit de fuel gaz (m ³ /h)	63
Température de surface des tubes	315

Tableau VIII.1 : Conditions de marche du four.

VIII.2. Tableau récapitulatif des compositions des fumées

Les résultats de calcul de la combustion sont portés dans le tableau ci-dessous :

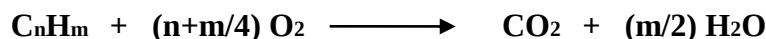
Composition du combustible	Pourcentage molaire Yi %	O ₂ de la combustion m ³	Composition des fumées			
			CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
H ₂	26.62	13.31	-	26.62	-	49.65
C ₁	72.17	144.34	72.17	144.34	-	538.42
C ₂	0.25	0.875	0.5	0.75	-	3.26
C ₃	0.71	3.55	2.13	2.84	-	13.24
iC ₄	0.11	0.715	0.44	0.55	-	2.66
nC ₄	0.11	0.715	0.44	0.55	-	2.66
iC ₅	0.01	0.08	0.05	0.06	-	0.3
nC ₅	0.01	0.08	0.05	0.06	-	0.3
TOTAL	100	163.67	75.78	175.77	19,64	610.49
O ₂ dans l'excès d'air			19,64			
O ₂ dans l'air de combustion			183.31			
N ₂ dans l'excès d'air			73,26			
N ₂ dans l'air de combustion			683,75			
Nombres de m ³ d'air de combustion pour 100 m ³ de gaz combustible			867,06			
Nombre de m ³ de fumées pour 100 m ³ de gaz combustible			954,94			
Pourcentage molaire des fumées			7,94	18,41	2,06	71,60

Tableau VIII.2 : Composition des fumées.

Chapitre VIII : Vérification du rendement du four

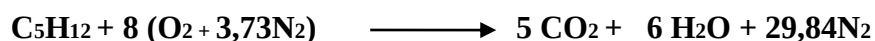
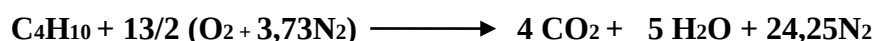
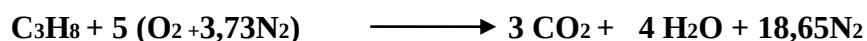
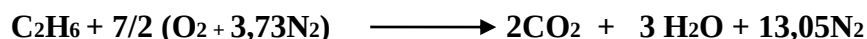
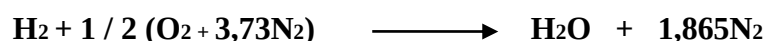
VIII.2.1. Réactions de combustion :

Le calcul est basé sur les équations stœchiométriques de la combustion des hydrocarbures ayant la formule chimique générale suivante :



Soit la composition d'air : $N_2 = 78.07\%$, $O_2 = 20.93\%$ et 1% autre gaz, donc on trouve pour chaque mole O_2 un nombre de 3.73 de N_2

Les réactions qui peuvent avoir lieu sont :



Ces réactions permettent de déterminer la quantité d'oxygène, et donc d'air nécessaire pour la combustion ainsi que la quantité des fumées formées lors de la combustion.

A partir du tableau d'avancement :

Exemple de méthane :

	CH ₄	+	2 O ₂	→	CO ₂	+	2H ₂ O
t=0	N ₁		N ₂		0		0
t=t ₁	N _{1-x}		N _{2-2x}		x		2x

Comme les réactions de combustion sont des réactions stœchiométriques (oxydation totale), donc pour le cas du méthane, chaque 1 mole de méthane nécessite 2 moles d'oxygène, dégage 1 mole de CO_2 et 2 moles de H_2O .

VIII.2.2. Calcul de la quantité totale d'oxygène :

L'excès d'air est égal à 12 %, le rapport $N_2/O_2 = 3,73$

$$V_{O_2 \text{ total}} = V_{O_2 \text{ consommé}} + V_{O_2 \text{ dans l'excès d'air}} = 163,67 + 19,64 = 183,31 \text{ m}^3$$

VIII.2.3. Calcul la quantité totale du gaz inerte :

Le volume de gaz inerte N_2 est :

$$V_{O_2 \text{ total}} = V_{N_2} + V_{N_2 \text{ dans l'excès d'air}} = 610,49 + 73,26 = 683,75 \text{ m}^3$$

Chapitre VIII : Vérification du rendement du four

VIII.2.4. Calcul de volume total des fumées :

La composition finale des fumées = la sommes des composants au sortie du four

$$V_{\text{total des fumées}} = 75,78 + 175,77 + 19,64 + 683,75 = 954,94 \text{ m}^3$$

VIII.2.5. Calcul de la quantité des fumées formées par la combustion de 1 kg de gaz :

La quantité des fumées formées par la combustion de 1 kg de gaz combustible est déterminée en calculant les paramètres suivants :

VIII.2.5.1. Masse moléculaire des fumées :

$$M_f = \Sigma(M_i * Y_i)$$

$$M_f = \Sigma(M_i * Y_i) = M_{\text{CO}_2} * Y_{\text{CO}_2} + M_{\text{O}_2} * Y_{\text{O}_2} + M_{\text{H}_2\text{O}} * Y_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{N}_2} * Y_{\text{N}_2}$$

Constituant des fumées	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
Pourcentage molaire	7,94	18,41	2,06	71,60
Masse moléculaire	44	18	32	28

Tableau VIII.3 : La composition des fumées.

$$M_{\text{m fumées}} = (0,0794 * 44) + (0,1841 * 18) + (0,0206 * 32) + (0,7160 * 28) = 27,51 \text{ kg/kmoles}$$

VIII.2.5.2. Masse volumique des fumées aux conditions normales de T et de P :

$$\rho_f = M_f / 22,4$$

$$\rho_f = 27,51 / 22,4 = 1,228 \text{ kg/m}^3$$

VIII.2.5.3. Masse moléculaire du gaz combustible :

$$M_{\text{com}} = \Sigma(M_i * Y_i)$$

$$M_{\text{com}} = M_{\text{H}_2} * Y_{\text{H}_2} + M_{\text{C}_1} * Y_{\text{C}_1} + M_{\text{C}_2} * Y_{\text{C}_2} + M_{\text{C}_3} * Y_{\text{C}_3} + M_{\text{iC}_4} * Y_{\text{iC}_4} + M_{\text{nC}_4} * Y_{\text{nC}_4} \\ + M_{\text{iC}_5} * Y_{\text{iC}_5} + M_{\text{nC}_5} * Y_{\text{nC}_5}$$

Chapitre VIII : Vérification du rendement du four

Constituant de combustible	H ₂	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	n C ₄	iC ₅	nC ₅
Pourcentage molaire	26,62	72,17	0,25	0,71	0,11	0,11	0,01	0,01
Masse molaire	2	16	30	44	58	58	72	72

Tableau VIII.4 : La composition de gaz combustible.

$$M_{\text{com}} = 2 * 0,2662 + 16 * 0,7217 + 30 * 0,025 + 44 * 0,0071 + 58 * 0,0011 + 58 * 0,0011 + 72 * 0,0001 + 72 * 0,0001 = 13,28 \text{ kg/kmole}$$

VIII.2.5.4. Masse volumique du gaz combustible aux conditions normales de température et de pression :

$$\rho_{\text{com}} = M_{\text{com}}/22.4$$

$$\rho_{\text{com}} = 13,28/22.4 = 0,593 \text{ kg / m}^3$$

➤ Le volume de fumées :

100 m³ de fuel gaz dégagent un volume de fumées V_f = 954,94 m³

Donc 1 m³ de gaz dégage un volume de fumées V_f = 9,5494 m³

Pour 1kg de fuel gaz la masse des fumées :

$$m_f = \frac{\rho_f * V_f * m_{\text{com}}}{\rho_{\text{com}} * V_{\text{com}}} = \frac{1,228 * 9,5494 * 1}{0,593 * 1} = 19,78 \text{ kg}$$

Alors :

1kg de gaz combustible dégage 19,78 kg de fumées.

VIII.2.6. La quantité de l'air nécessaire pour la combustion de 1 kg de gaz :

100 m³ de fuel gaz nécessitent 867,06 m³ d'air.

Donc 1m³ de gaz combustible nécessite 8,6706 m³ d'air.

$$m_{\text{air}} = \frac{\rho_{\text{air}} * V_{\text{air}} * m_{\text{com}}}{\rho_{\text{com}} * V_{\text{com}}} = \frac{1,294 * 8,6706 * 1}{0,593 * 1} = 18,92 \text{ kg}$$

Chapitre VIII : Vérification du rendement du four

Alors :

1kg de gaz combustible nécessite 18,92 kg d'air.

VIII.3. Calcul du rendement du four 25-F1

Le rendement d'un four η est défini comme le rapport du débit de chaleur absorbée par le fluide par rapport au débit de chaleur fourni au four par la combustion (Q entrée).

$$\eta(\%) = \frac{Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{pertes}}}{Q_{\text{entrée}}} * 100$$

VIII.3.1. Calcul de la quantité de chaleur dégagée $Q_{\text{entrée}}$:

$$Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{comb}} + Q_{\text{sens}}$$

Fuel gaz	Réel
température (°C)	20
pression (bar)	3,5
Débits m ³ /h	63
Masse volumique (kg/m ³)	0,593

Tableau VIII. 5 : Les paramètres de fuel gaz.

➤ **Chaleur sensible de l'air :**

$$Q_{\text{sen}} = m_{\text{air}} * C_{p\text{air}} * (T - T_0)$$

$$Q_{\text{sen}} = 18,92 * 0,24 * (20 - 0) = 90,58 \text{ kcal/ kg}$$

Avec :

$C_{p\text{air}}$: chaleur spécifique de l'air prise à partir de l'annexe A, $C_{p\text{air}} = 0,24 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$

➤ **Calcul de la quantité de chaleur dégagée par le combustible**

$$Q_{\text{com}} = \text{PCI}_{\text{com}} * G_{\text{com}}$$

Chapitre VIII : Vérification du rendement du four

Avec :

PCI_{com} : pouvoir calorifique de fuel gaz.

La composition du gaz combustible est donnée par l'analyse chromatographique. Les fractions molaires sont citées dans les tableaux ci- dessous.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz combustible est donné par l'annexe B.

Constituants	Fraction molaire Y _i %	PCI _i (kcal / m ³)	PCI _i *Y _i (kcal/ m ³)
H ₂	26,62	2610	694,782
C ₁	72,17	8714	6288,893
C ₂	0,25	15272	38,18
C ₃	0,71	21655	153,75
iC ₄	0,11	27941	30,735
nC ₄	0,11	27941	30,735
iC ₅	0,01	34670	3,467
nC ₅	0,01	34670	3,467
Total	100	-	7244,009

Tableau VIII. 6 : Analyse chromatographique de fuel gaz.

Donc la quantité de chaleur dégagée par le fuel gaz :

$$Q_{\text{comb}} = 7244,009 \times 63 = 456372,570 \text{ kcal/h}$$

➤ **La quantité de chaleur totale dégagée par le combustible :**

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{sens}} + Q_{\text{comb}} = 90,58 + 456372,57 = 456463,150 \text{ kcal/h}$$

VIII.3.2. Calcul des pertes de chaleur:

➤ **Par les parois**

Nous admettons que les pertes au niveau du four sont réparties comme suit :

Pertes par parois en zone de radiation : 1%

Pertes par parois en zone de convection : 0.5%

$$Q_{\text{paroi}} = 456463,15 \times 0,015 = 6846,947 \text{ kcal/h}$$

Chapitre VIII : Vérification du rendement du four

➤ Par les fumées :

Les pertes les plus importantes sont les pertes à la cheminée, dissipé à l'atmosphère par les fumées qui sortent du four à une température assez élevée.

$$Q_{\text{fumée}} = G_{\text{fumées}} \cdot H_{\text{fumées}}$$

Avec : $G_{\text{fumées}}$: débit des fumées (kg/h).

$H_{\text{fumées}}$: enthalpie des fumées (kcal/kg).

1. Calcul de l'enthalpie des fumées $H_{\text{fumées}}$:

$$H_i = C_{p_i} \cdot t$$

Avec :

C_{p_i} : chaleur spécifique des constituants du fumées (kcal/kg °C).

t : température des fumées (°C)

Chaleur spécifique des constituants du fumées est déterminée par l'annexe C.

La température des fumées dans le cas actuel est égale 678 °C.

Composition des fumées	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
Pourcentage molaire (%)	8.54	19.80	2.32	69.35
C _p (kcal/kmole°C)	11,82	8,74	7,68	7,27
C _{p fumées} (kcal/kmole°C)	7,96			
C _{p fumées} (kcal/kg°C)	0,29			

Tableau VIII.7 : Chaleur spécifique des fumées.

2. Calcul de débit des fumées $G_{\text{fumées}}$

$$G_{\text{fumée}} = G_{\text{com}} \cdot \rho_{\text{com}} \cdot m_f = 63 \cdot 0,593 \cdot 18,29 = 683,3 \text{ kg/h}$$

Donc :

$$Q_{\text{fumée}} = 683,3 \cdot 0,29 \cdot 678 = 134350,44 \text{ kcal/h}$$

Chapitre VIII : Vérification du rendement du four

Alors :

$$Q_{\text{pertes totales}} = Q_{\text{parois}} + Q_{\text{fumée}}$$

$$Q_{\text{pertes totales}} = 6846,947 + 134350,44 = 141197,387 \text{ kcal/h}$$

Donc le rendement du four 25-F1 :

$$\eta = \frac{456463,150 - 141197,387}{456463,150} = 0,69$$

$$\eta (\%) = 69$$

Chaleur	Cas actuel (kcal/h)
Chaleur fournie par la combustion	456463,150
Chaleur perdue à travers les parois	6846,947
Chaleur perdue par fumées	134350,44
Le rendement de four η (%)	69%

Tableau VIII. 8 : Bilan thermique du four 25-F1.

Interprétation des résultats :

Le rendement du four dans les conditions actuelles est de 69 % reste faible par rapport au rendement exigé par le constructeur (au tour de 80%), cette diminution du rendement est dû :

- A l'augmentation de débit de fuel gaz consommé ;
- Aux pertes de chaleur par les fumées ;
- Le changement de la composition de fuel gaz ce qui influe sur le pouvoir calorifique du combustible.

Chapitre IX: Conception d'un nouvel échangeur de chaleur

Objectif

Dans tout calcul d'échangeur de chaleur, le but est d'obtenir la récupération d'une certaine quantité de chaleur dans des conditions économique.

Notre but actuel est d'augmenter la température de sortie du four 25-F1, de 230°C à 270°C (cas design) par l'installation d'un nouvel échangeur de chaleur à l'entrée du four de l'unité d'hydrofinishing. Pour cela on doit connaître les propriétés thermiques du fluide caloporteur (vapeur surchauffée) et la charge à chauffer, pour effectuer ce calcul on a appliqué la méthode de KERN.

IX.1. Données de départ

Les différentes caractéristiques sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Propriété du fluide	Côté calandre (Fluide chaud)	Côté tube (Fluide froid)
Nature de fluide	La vapeur d'eau	L'huile déparaffiné
Température d'entrée T_e [°C]	300	164
Température de sortie T_s [°C]	255	221
Capacité calorifique C_p moy [kcal/kg°C]	0,808	0,64
Conductivité thermique λ moy [W/m°C]	0,0421	0,108
Viscosité dynamique μ moy [Kg/m s]	0,00002	0,003973
Masse volumique ρ [kg/m ³]	46,235	860.6
Débit massique [Kg/h]	A déterminer	6884,8

Tableau IX 1 : Données nécessaires pour le calcul de l'échangeur

IX.2. Bilan thermique

A partir des données de tableau ci-dessus, on calcule la quantité de chaleur absorbée par la charge d'huile déparaffinée suivant la formule:

$$Q_{\text{absorbée}} = \dot{m} * C_{p_{\text{huile}}} * (T_s - T_e)$$

$$Q_{\text{absorbée}} = 6884.8 * 0.64 * (221 - 164) = 251157.5 \text{ kcal/h}$$

Chapitre IX: Conception d'un nouvel échangeur de chaleur

➤ Calcul du débit de la vapeur d'eau surchauffée :

On suppose que la température de sortie de la vapeur d'eau est 255°C et le rendement de l'échangeur est fixé pour une valeur de 95%.

Ce qui permet de déterminer le débit de la vapeur d'eau dans l'échangeur de chaleur :

$$\dot{m}_{\text{vapeur d'eau}} = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{C_{p_{v,e}} * \eta * (T_e - T_s)} = \frac{251157.5}{0,808 * 0,95 * (300 - 255)} = 7271,07 \text{ Kcal/h}$$

IX.3. Calcul de ΔT_{LM}

L'écoulement contre courant est représenté comme suit:

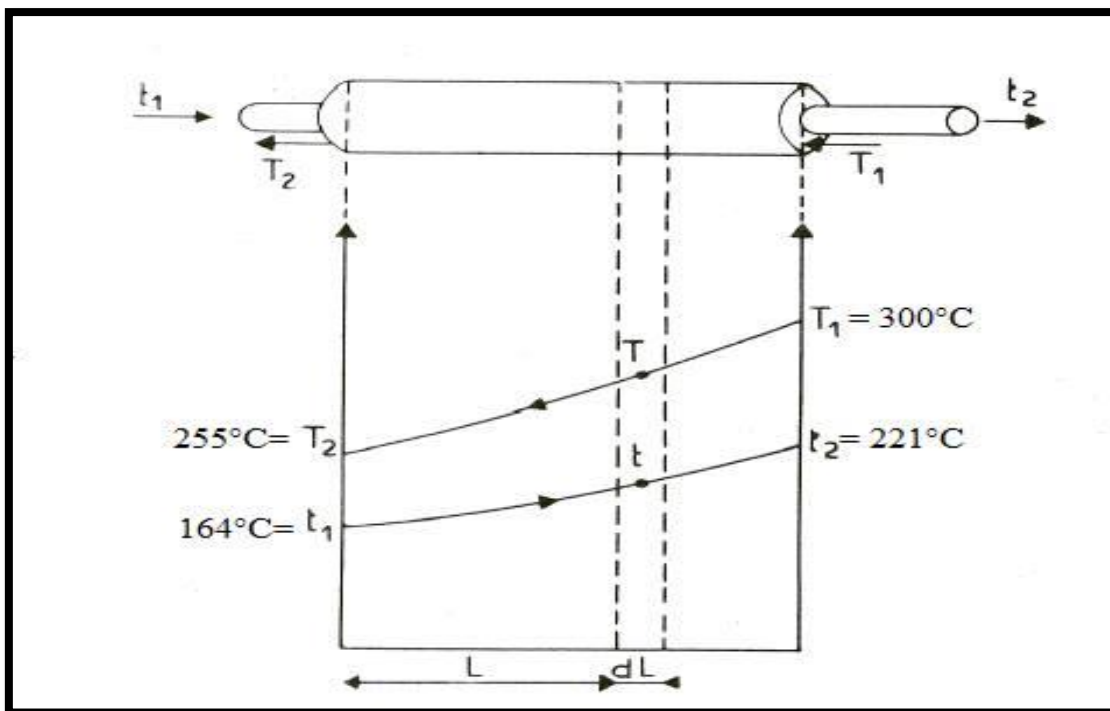


Figure IX.1: Ecoulement à contre courant

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{2.3 * \ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Tel que : $\Delta T_1 = T_1 - t_2 = 300 - 221 = 79^\circ\text{C}$

$\Delta T_2 = T_2 - t_1 = 255 - 164 = 91^\circ\text{C}$

$$\Delta T_{LM} = \frac{79 - 91}{2.3 * \log \frac{79}{91}} = 85.71^\circ\text{C}$$

Chapitre IX: Conception d'un nouvel échangeur de chaleur

$$\Delta TLM_{\text{corrigé}} = F * \Delta TLM$$

Où F : facteur de correction déterminé graphiquement à partir de R et E (voir l'annexe D)

Avec :

$$\text{Le rapport calorique : } R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{300 - 255}{221 - 164} = 0,79$$

$$\text{Le rendement de l'échangeur : } E = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{221 - 164}{300 - 164} = 0.42$$

Donc : $F = 0.95$

$$\Delta TLM_{\text{corrigé}} = 0.95 * 85.71 = 81.42^\circ\text{C}$$

Remarque :

Nous proposons l'installation d'un échangeur de type 1.4 (un passe côté calandre et 4 passes côté tube).

IX.4. Choix de la géométrie de l'appareil

IX.4.1. Choix de la valeur de coefficient d'échange U_s' :

Selon la nature des fluides misent en service (voir annexe E) : $U_s' = 50 \text{ kcal/h m}^2\text{°C} = 58 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

IX.4.2. Calcul de l'aire d'échange nécessaire au transfert :

$$A_s' = \frac{Q_{\text{abs}}}{U_s' * \Delta TLM_{\text{corrigé}}} = \frac{251157.5}{58 * 81.42} = 53.18 \text{ m}^2$$

IX.4.3. Choix de la longueur de l'échangeur :

Les longueurs des tubes normalisés les plus utilisés industriellement sont (en ft) :

8-12-16-20

On propose 16 ft donc $l = 4,877 \text{ m}$ (1 ft = 30,48 cm).

IX.4.4. Choix de diamètre extérieur d_o et intérieur d_i des tubes ainsi que le pas P et l'espacement entre chicanes B :

La disposition des tubes des échangeurs utilisés dans l'industrie de raffinage est en carré normal (pas carré), c'est-à-dire les axes des tubes sont situés aux sommets d'un carré.

L'espacement entre chicanes B est déterminé par (l'annexe F) : les limites admissibles ($D_c/5 < B < D_c$).

Chapitre IX: Conception d'un nouvel échangeur de chaleur

D'après (l'annexe G), on choisit les caractéristiques suivantes avec un calibre BWG de 14 (Birmingham Wire Gage) :

do (m)	di (m)	e (m)	Dc (m)
0,01905	0,01483	0.0021	0,489

Avec un pas $P=0,0254\text{m}$.

IX.4.5. Surface d'échange d'un tube a_0 :

$$a_0 = \pi * d_o * l = \pi * 0,01905 * 4,877 = 0,292\text{m}^2$$

IX.4.6. Estimation du nombre des tubes N_t et du diamètre de la calandre :

$$N_t' = \frac{A_s'}{a_0 * n_c} = \frac{53.18}{0.292 * 1} = 182\text{tubes}$$

A partir de (l'annexe H) avec un pas de 0.0254cm et un nombre de passe coté tube égale à 4 ; on trouve :

$$N_t = 204\text{ tubes et le diamètre de la calandre } D_c = 0,489\text{m}$$

IX.5. Choix de l'emplacement des fluides à l'intérieur du faisceau (côté tubes) et à l'extérieur du faisceau (côté calandre)

Connaissions que l'huile déparaffinée est le fluide le plus sale par rapport à la vapeur surchauffée, donc l'huile passe à travers les tubes alors que la vapeur passe à travers la calandre.

IX.6. Détermination de coefficient d'échange U_s de l'appareil

$$U_s = \frac{U_s' * N_t'}{N_t} = \frac{58 * 182}{204} = 51.74\text{w/m}^2\text{°C}.$$

IX.7. Température calorique

$$T_c = T_2 + F_c (T_1 - T_2)$$

$$t_c = t_1 + F_c (t_2 - t_1)$$

$$F_c = \frac{DTLM - \Delta T_2}{\Delta T_1 - \Delta T_2} = \frac{85.71 - 91}{79 - 91} = 0,44$$

$$T_c = 255 + 0,44 * (300 - 221) = 289.76\text{°C}$$

$$t_c = 164 + 0,44 * (221 - 164) = 189.08\text{°C}$$

IX.8. Calcul du coefficient de transfert propre U_p

IX.8.1. Calcul de coefficient d'échange de film interne h_{i0} et externe h_0 :

IX.8.1. 1. Côté tube :

IX.8.1. 1.1. Calcul de section par passe :

$$a_t = \frac{N_t}{n_t} * \frac{\pi * d_i^2}{4} = \frac{204}{4} * \frac{\pi * 0,01483^2}{4} = 0,008 \text{ m}^2$$

Avec : n_t : Nombre de passe coté tube.

N_t : Nombre des tubes.

d_i : Diamètre intérieur de tube (m).

IX.8.1. 1.2. Calcul de la vitesse massique :

$$G_t = \frac{\dot{m}}{a_t} = \frac{6884,8}{3600 * 0,008} = 239,05 \text{ kg/s.m}^2$$

Avec : $\dot{m}$: Débit massique de fluide froid (l'huile déparaffinée).

IX.8.1. 1.3. Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re_t = \frac{G_t * d_i}{\mu_c} = \frac{239,05 * 0,01483}{0,003973} = 892,30$$

Avec : G_t : Vitesse massique de fluide froid (kg/h.m²).

d_i : Diamètre intérieur de tube (m).

μ_c : La viscosité dynamique de fluide froid (kg/h.m²).

$Re_t < 2000$ donc le régime est laminaire.

IX.8.1. 1.4. Détermination de j_h :

D'après l'annexe (I), $j_h = f(Re_t, L/d_i)$

$$\frac{L}{d_i} = \frac{4,87}{0,01483} = 328,38 \text{ et } Re_t = 892,30$$

On trouve : $J_h = 2,3$ et $f = 0,0023$

Chapitre IX: Conception d'un nouvel échangeur de chaleur

IX.8.1. 1.5. Détermination de coefficient d'échange de film interne h_{i0} :

$$\frac{h_i}{\phi_t} = j_h \frac{\lambda}{d_i} \left(\frac{Cp \cdot \mu}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{h_i}{\phi_t} = 2,3 * \frac{0,108}{3600 * 0,01483} \left(\frac{0,63 * 3600 * 0,003973}{0,108} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,02 \text{ Kcal/s m}^2 = 83,73 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

$$\frac{h_{i0}}{\phi_t} = \left(\frac{h_i}{\phi_t} \right) \frac{d_i}{d_o} = 83,73 * \frac{0,01483}{0,01905} = 65,18 \text{ w/m}^2\text{°C}.$$

$$\frac{h_{i0}}{\phi_t} = 65,18 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

IX.8.1. 2. Côté calandre :

IX.8.1. 2.1. Calcul de section par calandre :

$$a_{cT} = \frac{D_c}{P} (P - d_0) * B = \frac{0,489}{0,0254} * (0,0254 - 0,01905) * \frac{0,489}{2} = 0,029 \text{ m}^2$$

Avec : B : espace entre chicanes ($B = D_c / 2$) (m) ; voir (l'annexe J)

IX.8.1. 2.2. Calcul de la vitesse transversale de fluide chaud :

$$G_{CL} = \frac{M}{a_{cT}} = \frac{7510,69}{3600 * 0,029} = 71,94 \text{ kg/s.m}^2$$

IX.8.1. 2.3. Calcul de diamètre équivalent :

$$D_e = \frac{4 * P^2}{\pi * d_0} - d_0 = \frac{4 * 0,0254^2}{\pi * 0,01905} - 0,01905 = 0,024 \text{ m}.$$

IX.8.1. 2.4. Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re_C = \frac{D_e * G_c}{\mu_h} = \frac{0,024 * 71,94}{0,00002} = 86328$$

$Re_C > 2000$ Donc le régime est turbulent.

IX.8.1. 2.5. Détermination de j_h' et f' :

D'après l'annexe (K) : $J_h' = 180$ et $f' = 0,12$

IX.8.1. 2.6. Détermination de coefficient d'échange de film externe h_0 :

$$\frac{h_0}{\phi_c} = j_h' * \frac{\lambda'}{D_e} \left(\frac{Cp' * \mu'}{\lambda'} \right)^{\frac{1}{3}} = 180 * \frac{0,042}{0,024} \left(\frac{2,67 * 1000 * 4,18 * 0,00002}{0,042} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{h_0}{\phi_c} = 547,26 \text{ w/m}^2\text{°C}.$$

Chapitre IX: Conception d'un nouvel échangeur de chaleur

IX.8.2. Calcul de la température des tubes :

$$t_t = T_c - \frac{\frac{h_{io}}{\varnothing_t}}{\frac{h_o}{\varnothing_c} + \frac{h_{io}}{\varnothing_t}} (T_c - t_c)$$

$$t_t = 289,76 - \frac{65,18}{547,26 + 65,18} (289,76 - 189,08) = 279,05^\circ\text{C}$$

IX.8.3. Calcul de $\varnothing_c$ et $\varnothing_t$:

Côté tube : pour l'huile déparaffinée

$$\varnothing_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0.14} = 1 \quad \text{psq} \quad \mu < 1 \text{ cpo}$$

Donc :

$$h_{io} = \left(\frac{h_{io}}{\varnothing_t} \right) \varnothing_t = 65,18 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

Côté calandre : pour la vapeur d'eau

$$\varnothing_c = \left(\frac{\mu'}{\mu_t} \right)^{0.14} = 1 \quad \text{psq} \quad \mu' < 1 \text{ cpo}$$

Donc :

$$h_o = \left(\frac{h_{io}}{\varnothing_t} \right) \varnothing_c = 547,26 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

IX.8.4. Calcul du coefficient de transfert propre :

$$U_p = \frac{h_{io} * h_o}{h_{io} + h_o} = \frac{65,18 * 547,26}{65,18 + 547,26} = 58,24 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

IX.9. Calcul de la résistance d'encrassement

IX.9.1. La résistance d'encrassement calculée :

$$R_s \text{ calculé} = \frac{U_p - U_s}{U_p * U_s} = \frac{58,24 - 51,74}{58,24 * 51,74} = 0,0021 \text{ m}^2\text{°C/w}$$

Chapitre IX: Conception d'un nouvel échangeur de chaleur

IX.9.2. La résistance d'encrassement admissible :

$$R_s = R_{so} + R_{si} * \frac{d_o}{d_i}$$

A partir de l'annexe (L) :

$$R_{si}(\text{résistance d'encrassement interne}) = 2.10^{-4} \text{ h m}^2\text{°C/Kcal}$$

$R_{so}(\text{résistance d'encrassement externe}) = 0$ parce que la vapeur d'eau n'a pas une résistance d'encrassement

$$R_s = R_{so} + R_{si} * \frac{d_o}{d_i} = \frac{2.10^{-4} * 3600 * 0,01905}{4,18 * 1000 * 0,01483} = 2,21.10^{-4} \text{ m}^2\text{°C/w}$$

IX.10. Calcul des pertes de charge

IX.10.1. Côté tube :

$$\Delta P_t = \frac{n_c * n_t * G_t^2}{1,271 * 10^{15} * d} \left[\frac{f_t * l}{d_i * \phi_t} + 2 \right]$$

$$\Delta P_t = \frac{1 * 4 * (239,05 * 3600)^2}{1,271 * 10^{15} * 0,860} \left[\frac{0,0023 * 4,87}{0,01483 * 1} + 2 \right]$$

$$\Delta P_t = 0,0074 \text{ kg/cm}^2$$

IX.10.2. Côté calandre :

$$\Delta P_c = \frac{n_c * f_{CT} * G_{CT}^2 * (N_c + 1) * D_c}{1,271 * 10^{15} * d' * D_e * \phi_c}$$

Où : n_c : le nombre de chicane $n_c = \frac{l}{B} = 20$

$$\Delta P_c = \frac{1 * 0,12 * (71,94 * 3600)^2 * (20 + 1) * 0,489}{1,271 * 10^{15} * 0,0462 * 0,024}$$

$$\Delta P_c = 0,058 \text{ kg/cm}^2$$

D'après le calcul de la surface d'échange, on peut déterminer les dimensions constructives de l'échangeur à placer. Les résultats de calcul sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Chapitre IX: Conception d'un nouvel échangeur de chaleur

Dimensions de l'échangeur	Valeurs
Nombre des tubes	204
Diamètre extérieur (m)	0,01905
Diamètre intérieur (m)	0,01483
Epaisseur (m)	0,0021
Longueur (m)	4,877
Pas (m)	0,0254
Espacement entre chicane (m)	0,2955
Surface (m ²)	53.18
Diamètre de calandre (m)	0,489

Tableau IX 2 : les dimensions d'un nouvel échangeur

Interprétation des résultats

L'analyse des résultats de calcul de projet de l'échangeur de préchauffe a donné des résultats escomptés permettant de réduire considérablement la consommation du fuel gaz dans le four et d'augmenter la température de l'huile déparaffinée à la sortie du four du four de 221°C à 270°C au lieu de 164°C à 230 °C actuellement.

Chapitre X : Etude économique

X.1. Introduction

Ce chapitre est consacré au calcul économique afin d'évaluer les gains apportés par la modification du schéma de la zone de fabrication des huiles de base (l'unité 25) par l'incorporation d'un nouvel échangeur.

X.2. Gain de consommation du fuel gaz après la modification

Soit 221 °C la nouvelle température d'entrée de l'huile déparaffinée dans le four après la modification apportée.

X.2.1. Calcul de la quantité de chaleur absorbée par l'huile déparaffinée :

$$Q_{\text{absorbée}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$$

	Réel	Après modification
Température d'entrée [°C]	164	221
Température de sortie [°C]	230	270
Densité	0,860	0,716
C _{p moy} [kcal/kg C°]	0,640	0,750
Débits [kg/h]	6884	A déterminer

Tableau X.1: Les paramètres de la charge (DO) avant et après modification.

$$Q_{\text{absorbée}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) = 6884 \cdot 0,75 \cdot (270 - 221) = 252987 \text{ kcal/h}$$

$$Q_{\text{absorbée}} = 252987 \text{ kcal/h}$$

X.2.2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée par la vapeur d'eau :

$$\eta = Q_{\text{absorbée}} / Q_{\text{dégagée}}$$

$$Q_{\text{dégagée}} = Q_{\text{absorbée}} / \eta$$

Chapitre X : Etude économique

Si on suppose que le rendement du four réel reste constant au tour de 69 % :

$$Q_{\text{dégagée}} = Q_{\text{absorbée}} / \eta = 252987 / 0,69 = 366647,826 \text{ kcal /h}$$

$$Q_{\text{dégagée}} = 366647,826 \text{ kcal /h}$$

X.3. Calcul de débit de fuel gaz suite à la modification

$$Q_{\text{dégagée}} = \dot{m}_{\text{combustible}} * PCI_{\text{combustible}}$$

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = Q_{\text{dégagée}} / PCI_{\text{combustible}}$$

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = Q_{\text{dégagée}} / PCI_{\text{combustible}} = 366647,826 / 7244 = 50,614 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = 50,614 \text{ m}^3/\text{h}$$

Débit de fuel gaz actuel [m ³ / h]	Débit de fuel gaz après modification [m ³ / h]
63	50,614

Tableau X.2: Différence en débit de fuel gaz.

Le tableau ci-dessous montre le gain en fuel gaz suite à l'incorporation d'un nouvel échangeur :

	Le gain en fuel gaz après modification
m ³ /h	12,386
m ³ /j	297,264
m ³ /an	99583,44
pendant 10 ans	995834,4

Tableau X.3: Le gain en fuel gaz.

X.3. Perte de production avant la modification

L'unité d'hydrofinishing est prévue pour fonctionner 335 J/AN, elle est destinée pour traiter une charge de 8638 kg/h de l'huile déparaffinée ce qui correspond à un taux de charge de 100%.

Actuellement, l'unité ne traite que 6884 kg/h de l'huile déparaffinée équivalent à 6,884 t/h, cette capacité de production correspond à un taux de charge de 80%.

Chapitre X : Etude économique

Les pertes de production = la charge à un taux de 100 % - la charge à un taux de 80 %.

Les pertes de production = $8638 - 6884 = 1754 \text{ kg/h} = 1,754 \text{ t/h}$.

	Les pertes de production
t/h	1,754
t/j	42,096
t/an	14102,160
pendant 10 ans	141021,60

Tableau X.4: Les pertes de production.

X.4. Gain de production après la modification

X.4.1. Calcul du nouveau taux de charge :

Si on considère un fonctionnement du four avec les conditions suivantes:

Un rendement du four de 69%.

Un débit de fuel gaz de $63 \text{ m}^3/\text{h}$.

La température d'entrée est 221°C et la température de sortie est 270°C .

$$Q_{\text{dégagée}} = 456463,150 \text{ kcal/h}$$

$$Q_{\text{absorbée}} = \eta * Q_{\text{dégagée}} = 0,69 * 456463,150 = 314959,573 \text{ kcal/h}$$

$$Q_{\text{absorbée}} = \dot{m} * C_p * (T_s - T_e)$$

alors :

$$\dot{m} = Q_{\text{absorbée}} / C_p * (T_s - T_e) = 314897,073 / 0,75 * (270 - 221)$$

$$\dot{m} = 8570,328 \text{ kg/h}$$

➤ Design:

Débit de l'huile déparaffinée : 8638 kg/h pour un taux de charge de 100%

➤ Après modification :

Débit de l'huile déparaffinée : $8570,328 \text{ kg/h}$

Alors le nouveau taux de charge est :

$$\tau = (\text{débit de charge actuel} / \text{débit de charge design}) * 100$$

$$\tau = (8570,328 / 8638) * 100 = 99,21 \%$$

$$\tau = 99,21 \%$$

X.5. Le gain de production

Après la modification : le taux de charge devient 99,19% équivalent à 8638 Kg/h.

Le gain de production = $8570,328 - 6884 = 1686,328$ Kg/h = 1,686 t/h

	Gain de production
t/h	1,686
t/j	40,471
t/an	13558,077
pendant 10 ans	135580,771

Tableau X.5: Gain de production

Conclusion :

Une différence de température de l'huile déparaffinée à l'entrée du four de 57 °C entraîne un gain de 12,386 m³/h de gaz combustible.

Après la modification le taux de charge passe de 80 % à 99,19 % qui correspond à un débit de fuel gaz de 50,614 m³/h.

Si on garde le même taux de charge, ceci nous fait gagner 12,386 m³/h de gaz combustible.

Conclusion et recommandation

Conclusion :

Le stage qui a été effectué au sein de la raffinerie d'Arzew nous a donné une large vision sur le domaine industriel principalement le domaine pétrolier.

On a appris des nouvelles connaissances de la vie industrielle ce qui a comblé le manque de savoir sur l'industrie particulièrement le côté pratique, tout cela a été assuré par un encadrement de haut niveau facilitant la compréhension.

Nous sommes basées dans cette étude sur le calcul thermique des équipements de transfert de chaleur (four et échangeur) afin d'améliorer la performance de l'unité de traitement de finition tel que le taux de charge.

Le présent travail a été réalisé dans la perspective de trouver des solutions permettant de rendre l'unité de traitement de finition plus performante.

L'étude a conduit aux résultats suivants :

- Le rendement du four dans les conditions actuelles reste inférieur au rendement exigé par le constructeur suite à l'augmentation de débit du fuel gaz ;
- Le calcul dimensionnel de l'échangeur installé à l'entrée du four est jugé très satisfaisant vu que le coefficient d'échange est important permettant un meilleur transfert de chaleur entre les deux fluides assuré par la surface totale d'échange ainsi une faible perte de charge ;
- Cette étude permet d'augmenter la température à l'entrée du four de 164 à 221°C ;
- L'installation d'un nouvel échangeur à l'entrée du four assure une augmentation du taux de charge de 20%.

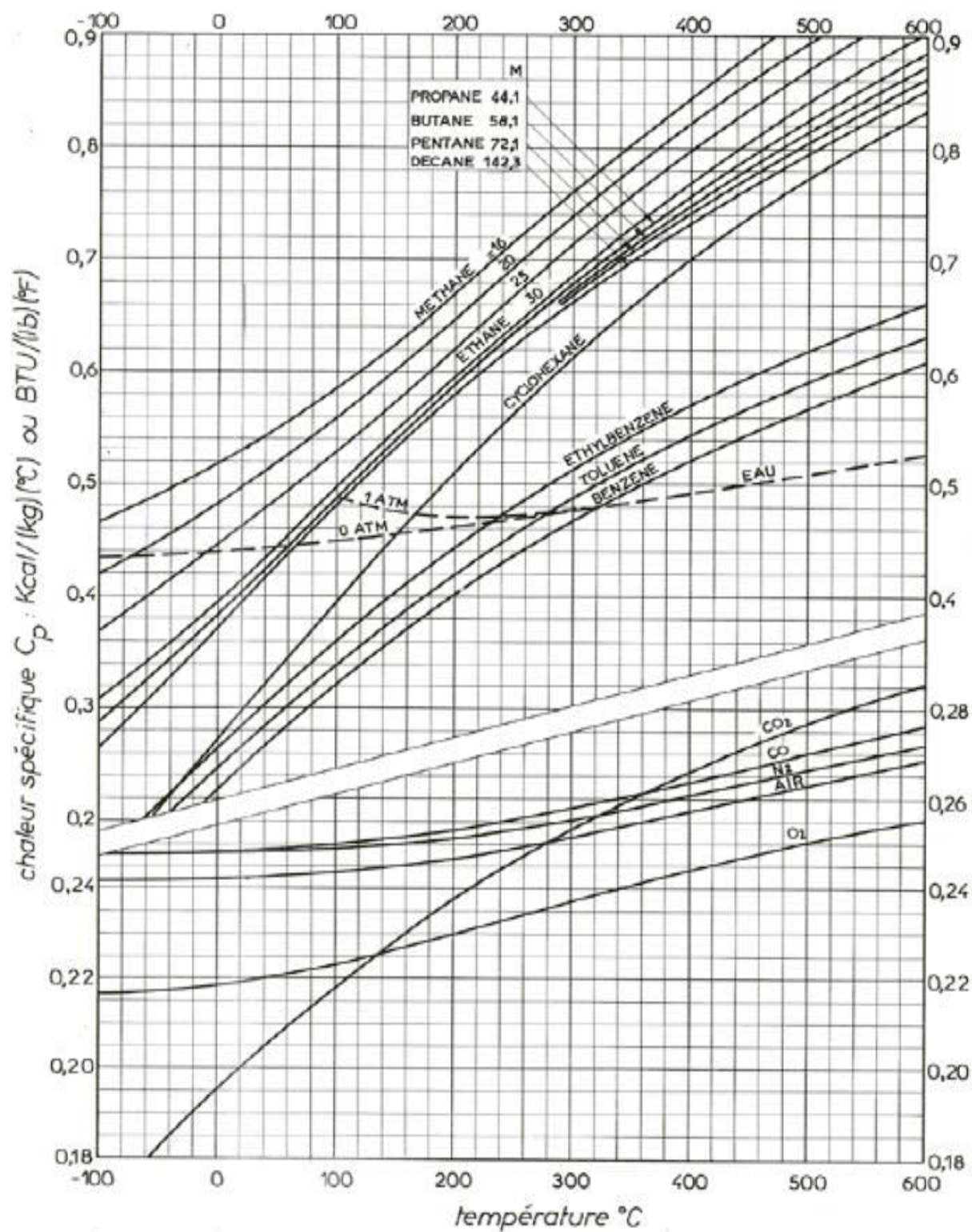
Recommandations :

Afin d'améliorer le rendement thermique et préserver le four on propose les recommandations suivantes :

- Suivre régulièrement les analyses de la composition du fuel gaz, car le combustible influe d'une façon directe sur le rendement du four ;
- Pour assurer un taux de charge élevé il est recommandé d'effectuer un décokage du four pour éliminer l'encrassement des faisceaux ;

- [1] : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/petrole-le-petrole-brut/>
- [2] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Raffinage_du_p%C3%A9trole
- [3] : http://www.memoireonline.com/02/12/5405/m_Problematique-de-l-exploitation-petrolier-sur-la-destruction-de-l-environnement-dans-le-territoire10.html
- [4] : Jean pierre wauquier tome 1 : Pétrole brut et produits pétroliers Edition technip 1994
- [5] : Information Amont-Aval-Transport Ifp Procédés et unités de raffinage (Procédés de distillation)
- [6] : Total: Les lubrifiants, Manuel de formation cours exp-PR-UT130
- [7] : Manuel opératoire pour l'unité d'hydrofinishing U25, Raffinerie d'Arzew, SONATRACH
- [8] : IAP SKIKDA cour des échangeurs de chaleur
- [9] : Technique d'ingénieur : Transfert de chaleur par René LELEU.
- [10] : Pierre Withier tome 2 : Le pétrole Raffinage et génie chimique.
- [11] : Jean Pierre Wauquier tome 4 : Matériels et équipements Edition technip 1999.
- [12] : Equipements d'échange thermique Dr M.A.MASRI Ecole de Boumerdes Mai 2013
- [13] : https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9curit%C3%A9_industrielle
- [14] : http://www.officiel-prevention.com/protections-collectives-organisation-ergonomie/risque-chimique/detail_dossier_CHSCT.php?rub=38&ssrub=69&dossierid=373
- [15] : Pierre Withier tome 1
- [16] : Cours de technique d'analyse du pétrole
- [17] : Cours de Procédés de raffinage
- [18] : http://www.klueber.com/fr/fr/huiles_lubrifiantes/
- [19] : Jean Ayel, Morice Born : Lubrifiants et fluides pour l'automobile Edition Technip 1998.

Annexe A : Chaleur spécifique des hydrocarbures gazeux et de quelques gaz sous pression atmosphériques.



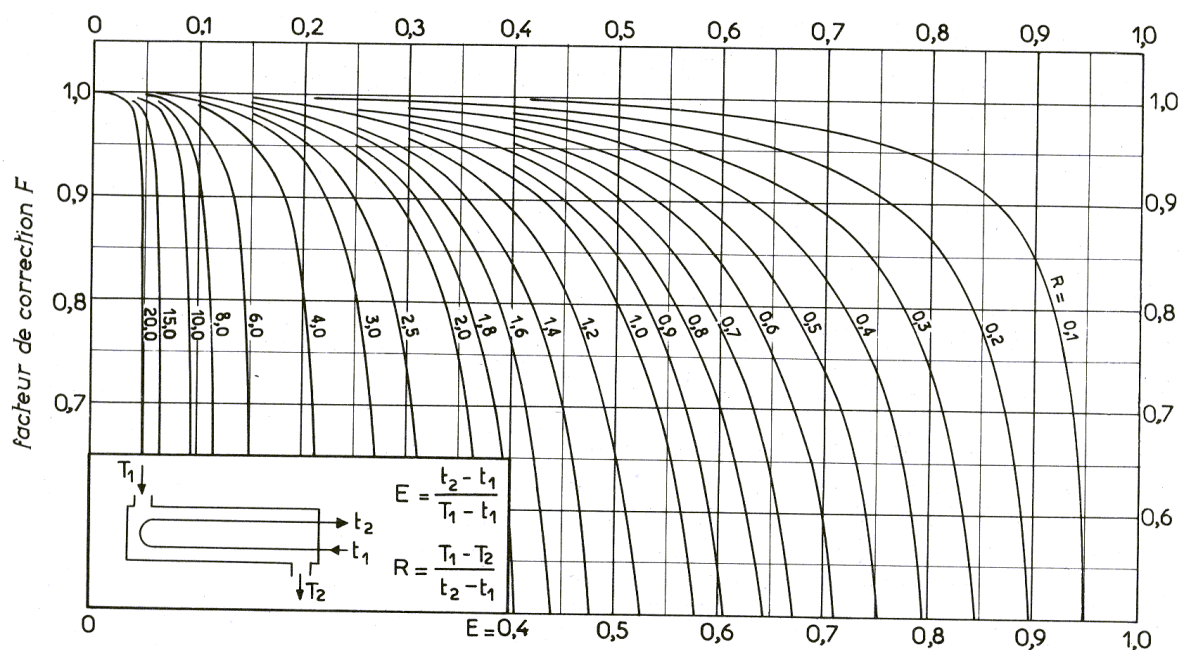
Annexe B : pouvoir calorifique inférieur massique PCI_m de composés organiques purs (à 20 °C).

Composé	PCI_m (kJ/kg)	Composé	PCI_m (kJ/kg)
Paraffines		Acétyléniques	
Méthane	50 009	Acétylène	48 241
Ethane	47 794	Méthylacétylène	46 194
Propane	46 357	Butyne-1	45 590
Butane	45 752	Pentyne-1	45 217
Pentane	45 357	Aromatiques	
Hexane	44 752	Benzène	40 170
Heptane	44 566	Toluène	40 589
Octane	44 427	o-Xylène	40 961
Nonane	44 311	m-Xylène	40 961
Décane	44 240	p-Xylène	40 798
Undécane	44 194	Ethylbenzène	40 938
Dodécane	44 147	1,2,4-Triméthylbenzène	40 984
Isoparaffines		Propylbenzène	41 193
Isobutane	45 613	Cumène	41 217
Isopentane	45 241	Alcools	
2-Méthylpentane	44 682	Méthanol	19 937
2,3-Diméthylbutane	44 659	Ethanol	28 865
2,3-Diméthylpentane	44 496	n-Propanol	30 680
2,2,4-Triméthylpentane	44 310	Isopropanol	30 447
Naphtènes		n-Butanol	33 075
Cyclopentane	43 636	Isobutanol	32 959
Méthylcyclopentane	44 636	Tertiobutanol	32 587
Cyclohexane	43 450	n-Pentanol	34 727
Méthylcyclohexane	43 380	Ethers	
Oléfines		Oxyde de diméthyle	28 703
Ethylène	47 195	Oxyde de diéthyle	33 867
Propylène	45 799	Oxyde de dipropyle	36 355
Butène-1	45 334	Oxyde de dibutyle	37 798
Butène-2 cis	45 194	Aldéhydes et cétones	
Butène-2 trans	45 124	Formaldéhyde	17 259
Isobutène	45 055	Acétaldéhyde	24 156
Pentène-1	45 031	Propionaldéhyde	28 889
2 Méthylpentène-1	44 799	Butyraldéhyde	31 610
Hexène-1	44 426	Acétone	28 548
Dioléfines		Autres espèces chimiques	
Butadiène 1-3	44 613	Carbone (graphite)	32 808
Isoprène	44 078	Hydrogène	120 971
Dérivés nitrés		Oxyde de carbone	10 112
Nitrométhane	10 513	Ammoniac	18 646
Nitropropane	20 693	Soufre	4 639

Annexe C : Chaleur spécifique moyenne entre 0°C et T°C .

t°C	H ₂	N ₂	O ₂	CO	H ₂ O _v	CO ₂
100	6,92	6,97	7,05	6,97	8,03	9,17
200	6,95	7,00	7,15	7,00	8,12	9,65
300	6,97	7,04	7,26	7,06	8,22	10,06
400	6,98	7,09	7,38	7,12	8,34	10,40
500	6,99	7,15	7,49	7,19	8,47	10,75
600	7,01	7,21	7,59	7,27	8,60	11,03
700	7,03	7,27	7,68	7,34	8,74	11,28
800	7,06	7,35	7,77	7,43	8,89	11,50
900	7,09	7,42	7,85	7,50	9,04	11,70
1 000	7,12	7,49	7,92	7,57	9,10	11,88
1 100	7,15	7,56	7,98	7,64	9,32	12,05
1 200	7,20	7,62	8,04	7,70	9,45	12,19
1 300	7,24	7,67	8,11	7,76	9,58	12,32
1 400	7,28	7,73	8,16	7,81	9,72	12,45
1 500	7,32	7,78	8,20	7,85	9,84	12,56
1 600	7,36	7,82	8,24	7,90	9,96	12,66
1 700	7,40	7,86	8,28	7,94	10,09	12,75
1 800	7,45	7,91	8,33	7,98	10,20	12,84
1 900	7,49	7,94	8,38	8,02	10,30	12,92
2 000	7,53	7,98	8,42	8,05	10,41	12,99
2 100	7,57	8,01	8,45	8,09	10,52	13,06
2 200	7,62	8,05	8,48	8,12	10,61	13,13
2 300	7,66	8,08	8,52	8,15	10,71	13,19
2 400	7,70	8,10	8,56	8,18	10,79	13,24
2 500	7,74	8,14	8,59	8,21	10,87	13,30

Annexe D : Détermination du facteur de correction F_C en fonction de R et E.



a. une passe côté calandre, deux passes (ou plus) côté tubes.

Annexe E : Coefficient de transfert sale U_s

ÉCHANGEURS		U_s	
FLUIDE CHAUD	FLUIDE FROID	kcal/h.m ² .°C	BTU/hr. ft ² .°F
Eau	Eau	1 250 - 2 500	250 - 500
Solutions aqueuses	Solutions aqueuses	1 250 - 2 500	250 - 500
Hydrocarbures légers ⁽²⁾	Hydrocarbures légers	200 - 370	40 - 75
Hydrocarbures moyens ⁽²⁾	Hydrocarbures moyens	100 - 300	20 - 60
Hydrocarbures lourds ⁽²⁾	Hydrocarbures lourds	50 - 200	10 - 40
Hydrocarbures lourds	Hydrocarbures légers	150 - 300	30 - 60
Hydrocarbures légers	Hydrocarbures lourds	50 - 200	10 - 40
RÉFRIGÉRANTS			
Eau, méthanol, ammoniac et solutions aqueuses	Eau	1 250 - 2 500	250 - 500
Hydrocarbures légers	Eau	370 - 730	75 - 150
Hydrocarbures moyens	Eau	250 - 610	50 - 125
Hydrocarbures lourds	Eau	25 - 730	5 - 75
Gaz	Eau	10 - 250	2 - 50
Eau	Saumure	500 - 1 000	100 - 200
Hydrocarbures légers	Saumure	200 - 500	40 - 100
RÉCHAUFFEURS			
Vapeur d'eau	Eau, méthanol, ammoniac	1 000 - 3 400	200 - 700
Vapeur d'eau	Solutions aqueuses : $\mu < 2$ cPo	1 000 - 3 400	200 - 700
	$\mu > 2$ cPo	500 - 2 500	100 - 500
Vapeur d'eau	Hydrocarbures légers	500 - 1 000	100 - 200
Vapeur d'eau	Hydrocarbures moyens	250 - 500	50 - 100
Vapeur d'eau	Hydrocarbures lourds	30 - 300	6 - 60
Vapeur d'eau	Gaz	25 - 250	5 - 50
Dowtherm	Gaz	20 - 200	4 - 40
Dowtherm	Hydrocarbures lourds	30 - 300	6 - 60

Annexe F : Les valeurs limites conseillées de B (distance entre chicane).

D_c	B_{mini}
$D_c \leq 10''$	2''
$10'' < D_c \leq 30''$	$0,2 D_c$
$30'' < D_c \leq 60''$	6''
$D_c > 60''$	$0,1 D_c$

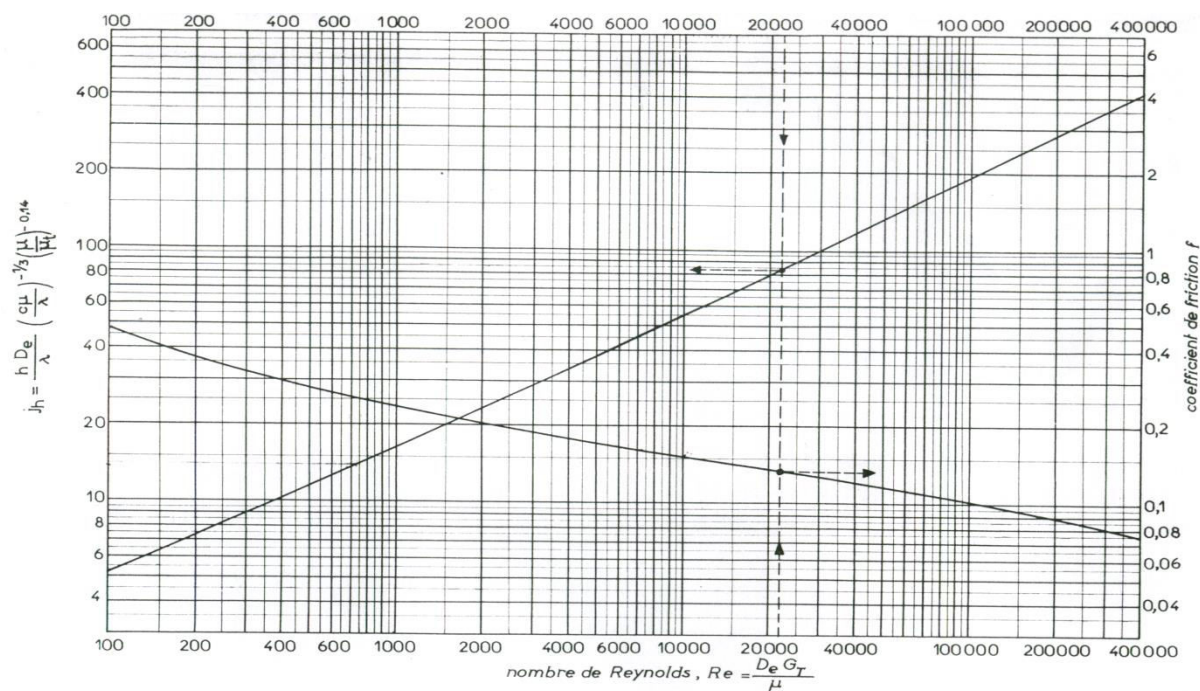
Annexe G : Caractéristiques des tubes d'échangeurs

DIAMÈTRE EXTÉRIEUR (in et mm)	BWG	ÉPAISSEUR (mm)	DIAMÈTRE INTÉRIEUR (cm)	SECTION (cm ²)	SURFACE (m ² /m)		POIDS (kg/m)
					extérieure	intérieure	
1/2 in (12,7 mm)	14	2,10	0,848	0,565	0,0399	0,0266	0,600
	16	1,65	0,940	0,694		0,0295	0,490
	18	1,24	1,021	0,819		0,0321	0,384
3/4 in (19,05 mm)	10	3,40	1,224	1,177	0,0598	0,0384	1,436
	12	2,77	1,351	1,434		0,0424	1,216
	14	2,10	1,483	1,727		0,0466	0,963
	16	1,65	1,575	1,948		0,0495	0,774
	18	1,24	1,656	2,154		0,0520	0,597
1 in (25,4 mm)	10	3,40	1,859	2,714	0,0798	0,0584	2,024
	12	2,77	1,986	3,098		0,0624	1,696
	14	2,10	2,118	3,523		0,0665	1,324
	16	1,65	2,210	3,836		0,0694	1,057
	18	1,24	2,291	4,122		0,0720	0,811
1 1/4 in (31,75 mm)	10	3,40	2,494	4,885	0,0997	0,0783	2,604
	12	2,77	2,616	5,375		0,0822	2,158
	14	2,10	2,743	5,909		0,0862	1,682
	16	1,65	2,845	6,357		0,0894	1,340
	18	1,24	2,921	6,701		0,0918	1,024
1 1/2 in (38,1 mm)	10	3,40	3,124	7,665	0,1197	0,0981	3,185
	12	2,77	3,251	8,300		0,1021	2,634
	14	2,10	3,378	8,962		0,1061	2,039
	16	1,65	3,480	9,512		0,1093	1,622
	18	1,24	3,556	9,931		0,1171	1,237

Annexe H: Disposition des tubes en carré

D _c calandre		Tubes : 3/4" P = 1"				Tubes : 1" P = 1 1/4"				Tubes : 1 1/4" P = 1 9/16"			
		nombre de passes : n _t				nombre de passes : n _t				nombre de passes : n _t			
(in)	(cm)	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
8	20,3	26	20	20		16	14			12	10		
10	25,4	52	40	36		32	26	24		24	22	16	16
12	30,5	76	68	68	60	45	40	38	36	30	30	22	22
13 1/4	33,7	90	82	76	70	56	52	48	44	40	37	35	31
15 1/4	38,7	124	116	108	108	76	68	68	64	53	51	48	44
17 1/4	43,9	166	158	150	142	112	96	90	82	73	71	64	56
19 1/4	48,9	220	204	192	188	132	128	122	116	90	86	82	78
21 1/4	54,0	270	246	240	234	166	158	152	148	112	106	102	96
23 1/4	59,1	324	308	302	292	208	192	184	184	135	127	123	115
25	63,5	394	370	356	346	252	238	226	222	160	151	146	140
27	68,6	460	432	420	408	288	278	268	260	188	178	174	166
29	73,7	526	480	468	456	326	300	294	286	220	209	202	193
31	78,8	640	600	580	560	398	380	368	358	252	244	238	226
33	83,8	718	688	676	648	460	432	420	414	287	275	268	258
35	88,9	824	780	766	748	518	488	484	472	322	311	304	293
37	94,0	914	886	866	838	574	562	544	532	362	348	342	336
39	99,0	1024	982	968	948	644	624	612	600				

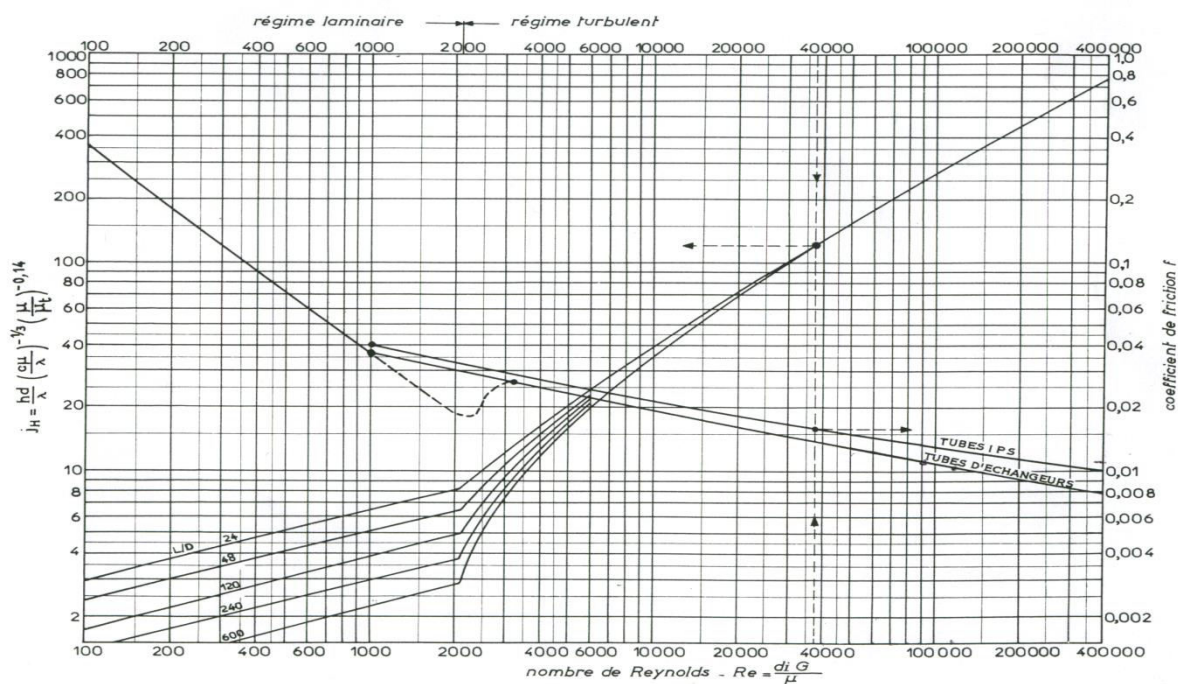
Annexe I : Coefficient de transfert et coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds modifié, à l'extérieur des tubes



Annexe j : Les valeurs limites conseillées de B (distance entre chicane).

D_c	B_{mini}
$D_c \leq 10''$	2''
$10'' < D_c \leq 30''$	$0,2 D_c$
$30'' < D_c \leq 60''$	6''
$D_c > 60''$	$0,1 D_c$

Annexe k : Coefficient de transfert et coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds, à l'intérieur des tubes



Annexe l : Résistance d'encrassement $R_s \cdot 10^{-4}$ (h.m²°C/Kcal)

PRODUITS PÉTROLIERS			
DISTILLATIONS ATMOSPHÉRIQUES ET SOUS VIDE		TRAITEMENT DES HUILES	
Essences et kérosène	2	Huile + solvant	4
Gasol léger	4	Raffinat	2
Gasol lourd	6	Extrait	5
Résidu atmosphérique	6-8	Solvants (furfurol, MEK, propane)	2
Résidu sous vide	10	Huile raffinée	2
Asphalte	20		