



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Pétrochimie

Thème

Production du bitume au niveau de la raffinerie de Skikda RA1K

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom : Gassem Prénom : Moussa

Nom : Benmahdi Prénom : Nadir

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Beloufa Khadidja	MAA	IMSI	Président
Talbi Zahera	MCD	IMSI	Encadreur
Mechken Amel	MAA	IMSI	Examineur

Juin 2018

Sommaire

Introduction	01
Chapitre I : Présentation de la Raffinerie de Skikda	
I.1 Historique	02
I.2 Présentation de la RA1K	04
I.3 Implantation	06
I.4 Différents départements de la RA1K	07
I.4.1 Département maintenance.....	07
I.4.2 Département production	08
I.5 Organisation et structure de l'unité	11
Chapitre II : Généralité sur les bitumes	
II.1 Caractéristiques des bitumes	12
II.2 Classification des bitumes	12
II.3 Fabrication des bitumes	14
II.4 Applications des bitumes	14
II.5 Propriétés recherchées pour les bitumes	15
II.6 La rhéologie	19
II.7 Constitution des bitumes	19
II.8 Bitume oxydé	24
II.8.1 Pratique de l'oxydation	24
II.8.2 Réaction mise en jeu	24
Chapitre III : Description de l'unité U70	
III.1 Description du procédé de l'unité.....	27
III.2 Généralités sur le four.....	34
III.2.1 Utilisations des fours tubulaires	34
III.2.2 Rendement thermique du four	36
III.3 Four d'unité d'affectation	44
III.3.1 Description du four 70-F-1	44
III.3.2 Contrôle de la marche du four 70F1	46

Chapitre VI : Partie calcul

IV.1 Calcul du rendement du four 70 F1	47
IV.1.1 Caractéristiques de la charge entrée et sortie du four 70 F1	47
IV.1.2 Composition des fumés issus de la combustion du gaz	48
IV.1.3 Réactions de combustion	48
IV.1.4 Etude de la combustion	49
IV.1.5 Calcul de pouvoir calorifique	53
IV.1.6 Calcul du rendement du four η	54
IV.2 Compagne de suivi des propriétés physiques des bitumes routiers et oxydés	55
IV.2.1 Sources possibles de perturbation du point de ramollissement et de pénétration	55
IV.2.2 Suivi des analyses de pénétrabilité du bitume routier en fonction de la température du four	56
IV.2.3 Evolution du point de ramollissement du bitume routier en fonction de la température du four	57
IV.2.4 Effet du débit de la vapeur de stripping sur le ramollissement du bitume routier	57
IV.2.5 Compagne de Suivi du Bitume oxydé	58
IV.2.5.1 Effet de la température du lit sur la pénétrabilité	58
IV.2.5.2 Effet de la température du lit sur le point de ramollissement	60
Conclusion	63

Liste des Tableaux

Tableaux	page
Tableau IV.1 : Caractéristiques de la charge entrée et sortie du four	47
Tableau IV.2 : Composition des fumés issus de la combustion du gaz	48
Tableau IV.3: la quantité de fumées issues de la combustion du gaz	49
Tableau IV.4 : les enthalpies de composition des fumés	53
Tableau IV.5: Calcul de pouvoir calorifique	54

Listes des figures

Figures	page
Figure I.1 : Diagramme d'une raffinerie	03
Figure I.2 : Organigramme de RAF 1K	05
Figure I.3 : le complexe de raffinage de Skikda RA1K	06
Figure I.4 : Organisation et structure de l'unité	11
Figure II.1 : schéma logique de production de bitume modifié	13
Figure II.2 : essaie de pénétrabilité à l'aiguille	16
Figure II.3 : essaie de point de ramollissement	17
Figure II.4 : essaie ductilité	17
Figure II.5 : mesure de point d'éclair	18
Figure II.6 : Structures typiques des fractions SARA	22
Figure II.7 : Structure de bitume	23
Figure II.8 : produits chimiques de bitume oxydé	25
Figure II.9 : déroulement des réactions en fonction d'oxygène et de la température	26
Figure III.1 : Schéma de production du bitume routier	32
Figure III.2 : Schéma de production du bitume oxydé	33
Figure III.3 : Représentation graphique du bilan thermique d'un four	38
Figure III.4 : Schéma général d'un four	45
Figure IV.1 : Pénétration de bitume routier en fonction de température du four (°C)	56
Figure IV.2 : Ramollissement de bitume routier en fonction de température du four (°C)	57
Figure IV.3 : Ramollissement de bitume routier en fonction de vapeur de stripping (kg/h)	58
Figure IV.4 : Pénétration de bitume oxydé en fonction de température du lit (°C)	59
Figure IV.5 : Pénétration de bitume oxydé en fonction de Slop wax (m ³ /h)	60
Figure IV.6 : Ramollissement de bitume oxydé en fonction de température du lit (°C)	61
Figure IV.7 : Ramollissement de bitume oxydé en fonction de débit d'air (m ³ /h)	61

I.1 Historique :

A l'origine le raffinage été une activité intégrée dans la société SONATRACH, en janvier 1982 le raffinage et la distribution des produits pétroliers ont été séparé et érigé en entreprise nationale de raffinage et de distribution des produits pétroliers ERDP. L'ERDP créé par décret 80-101 du 06 Avril 1980 dans le cadre de la restructuration de la SONATRACH, mis en place le 02 Janvier 1982, l'ERDP est placée sous tutelle du ministère de l'énergie et des industries pétrochimique. A partir du 02 Janvier 1985 l'ERDP a été transformée sous le nom commercial qui est la NAFTAL, cette dernière est subdivisée en quatre unités à savoir :

- Unité NAFTAL de raffinage
- Unité NAFTAL de distribution
- Unité NAFTAL de maintenance
- Unité NAFTAL portuaire

L'effectif de l'entreprise NAFTAL est de 35 000 travailleurs, elle est présente sur tout le territoire national.

A compter du 25 Août 1987 et par décret 87 fut créée l'entreprise nationale NAFTEC de l'entreprise nationale NAFTAL et mise en place le 02 Janvier 1988, elle a pour mission de promouvoir, développer, gérer et organiser l'industrie de raffinage, traiter le pétrole brut et les condensât, ainsi que le brut réduit importé en vue d'obtenir des produits raffinés destinés à la consommation nationale et a l'exportation.

Le nombre total des travailleurs de la NAFTEC est d'environ 4 500 travailleurs. Actuellement l'entreprise nationale de raffinage de pétrole gère l'ensemble des quatre raffineries se trouvant dans les villes de : Skikda, Alger, Arzew, Hassi Messaoud.

La capacité totale de transformation de l'entreprise est de 26 491 100 t/an et elle est répartie comme suit : ^[2]

Raffinerie	Capacité de traitement	
Skikda (RA ₁ K)	Pétrole brut :	15.000.000 t/an
	Brut réduit importé :	271.100 t/an
Alger (RA ₁ G)	Pétrole brut :	2.700.000 t/an
Arzew (RA ₁ Z)	Pétrole brut :	2.500.000 t/an
	Brut réduit importé :	320.000 t/an
	GPL :	1.000.000 t/an
	Condensât stabilisé :	3.000.000 t/an
Hassi Messaoud (RA ₁ HS)	Pétrole brut :	1.400.000 t/an
Ain Amenas (RA ₁ AA)	Brut réduit importé :	300.100 t/an

a) OBJECTIF :

L'entreprise NAFTEC a pour objectif de promouvoir, développer, gérer et organiser l'industrie du raffinage, le traitement brut en vue d'obtenir des produits raffinés destinés à la consommation nationale et à l'exportation.

b) PRINCIPALES RAFFINERIES :

- raffinerie D'ALGER RA 1 G sa production annuelle est de 2700000 tonne / an
- raffinerie D'ARZEW RA1 Z sa production annuelle est de 2500000 tonne / an de BRI.
- raffinerie de GPL / condensât RA2 I sa production est de 1000000tonne / an de GPL et de 3000000 tonne / an .
- raffinerie de SKIKDA RA1K production annuelle est de 15000000tonne / an de brut est de 271000 tonne / an de BRI.
- Raffinerie de HASSI MESSOUED RAHM la première 1961, sa production est de 300000 t / an et la deuxième 1967 sa production est de 1100000 tonne / an.

c) DIAGRAMME D'UNE RAFFINERIE :

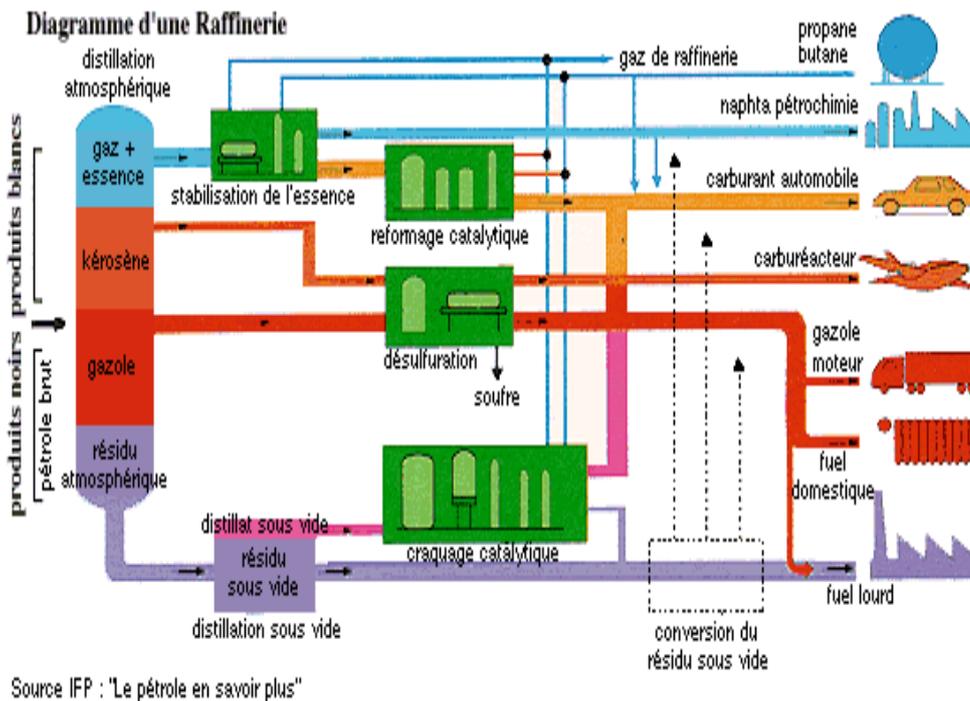


Figure I.1 : Diagramme d'une raffinerie

I.2 Présentation de la RA1K :

La réalisation de RAK a été confiée à TECHNI qui est constituée de deux sociétés ITALIENNES ainsi que certain entreprise nationale comme sou traitantes.^[2]

- SONATRO : traitement
- SONATIBA : génie civil et traitement.
- SN_ metol : montage d'une partie des réservoirs.
- Signature de contrat : 11 -3-1975.
- .Démarrage du chantier : 02-01-1978.
- Coût de réalisation : 3402872000 DA
- Démarrage des unités de productions progressivement a partir de MARS 1980

a) SITUATION :

Le complexe de raffinage de SKIKDA RA1 K est situé dans la zone industrielle à l'est de SKIKDA.

- Dénomination RA1 K
- Organisme gestionnaire : NAFTEC.
- Surface emménagée : 190 HECTARES
- INUGURATION : 27 -11-1983.

b) OBJECTIF :

- La transformation de brut de HASSI MOSSAOUD : un pipeline de 70 km relie de champs de HASSI MESSOUED à la raffinerie
- Mélange D'ARZEW : des bateaux citernes et OCCODU assurent le transport des hydrocarbures vers la raffinerie, ce brut traite par les deux unités de distillation atmosphérique – TOPPING
- Le brut réduit : il est importé pour la production des bitumes car le brut algérien est léger, et de densité 0.9, .le pétrole brut lourd est importé de KUWAIT, et de VINZUILA, il est de densité de 0.97.

c) PRODUCTION DE RAFFENERIE :

Les produits de raffinerie sont :

PROPANE, BUTANE, ESSENCE, NAPHTA, TOLUEN, FUEL OIL LOURD, GAZ OIL, BUNKER FUEL OIL, BITUME ROUTIER, ET BITUME OXYDE.

d) **EFFECTIF :**

L'effectifs atteint environ 35000travailleur a compté de 25 AOUT 1987 fut crée l'entreprise NAFTEC et mis en place le 02 JANVIER 1982.

e) **CHARGES TRAITÉES PAR LA RAFFINERIE :**

- Brut de HASSI MESSOUD : un pipeline de 70 km relie le champ de HASSI MESSOUD à la raffinerie.
- Mélange d'ARZEW : des bateaux citernes et ocedu assurent le transport des hydrocarbures vers la raffinerie, ce brut et traitées par les deux unités de distillation atmosphériques –topping.
- Le brut réduit : il est importé pour la production des bitumes, car le brut Algérien est légée de densité 0.9, le pétrole lourd est importé de KUWAIT, et de VENZEULA il est densité 0.97. [2]

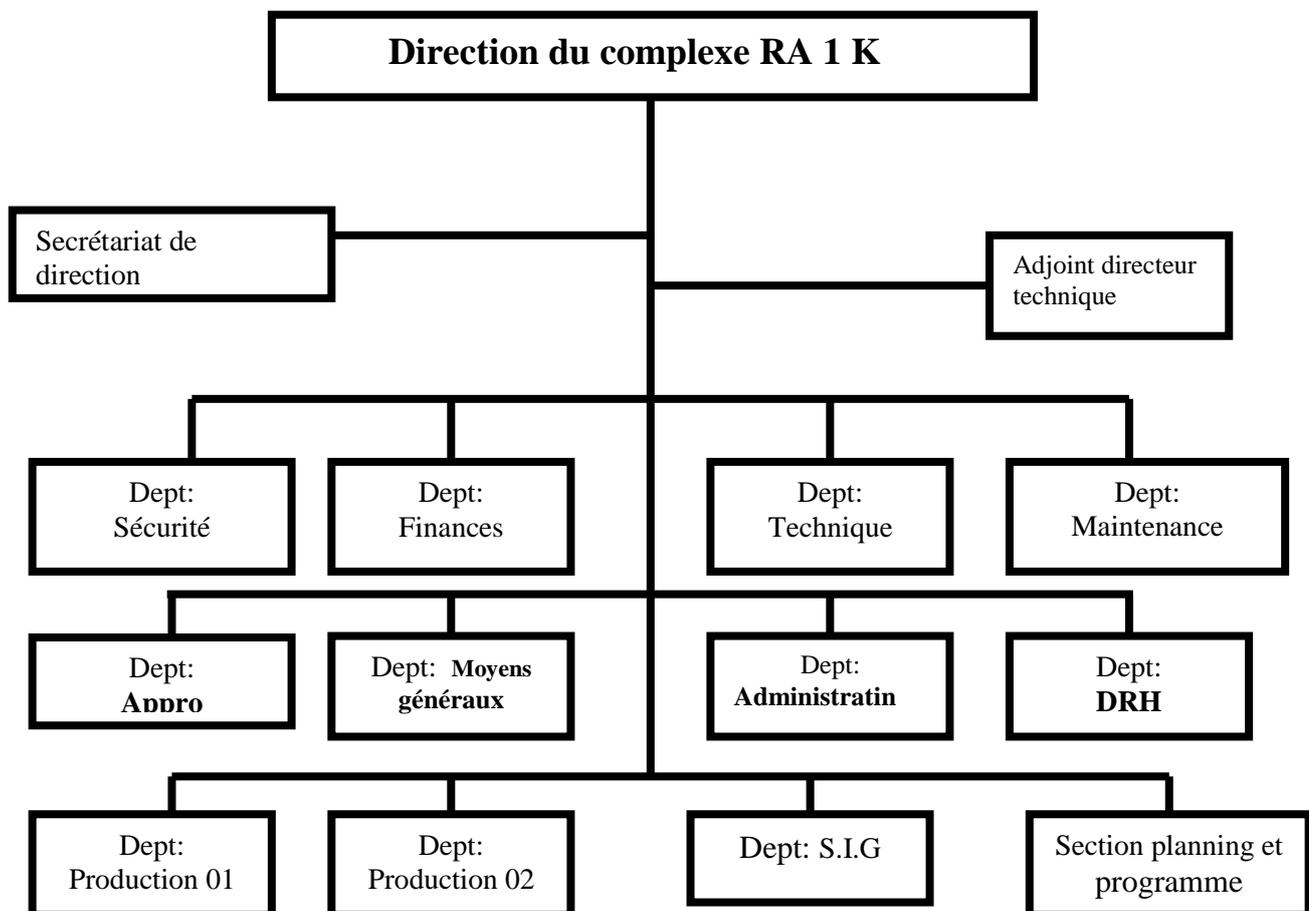
f) **Organigramme de RAF 1K :**

Figure I.2 : Organigramme de RAF 1K

I.3 Implantation :

Le complexe de raffinage de pétrole de Skikda (RA1 K), a pour objectif de transformer le pétrole brut provenant de Hassi Messaoud et le brut mélange d'Arzew avec une capacité de traitement de 15.000.000 t/an, ainsi que le brut réduit importé (275.000 t/an).

La raffinerie de Skikda est située dans la zone industrielle à 7 km à l'est de Skikda et à 2 km de la mer elle est aménagée sur une superficie de 190 hectares avec un effectif à l'heure actuelle de 1280 travailleurs.

Elle est alimentée en brut Algérien par l'unité de transport est (UTE) de Skikda qui est une station intermédiaire de Hassi Messaoud.

Le transport du pétrole brut est réalisé à l'aide d'un pipeline de 27 pouces de diamètre, la distance entre les champs pétroliers et la raffinerie de Skikda est de 640 km.

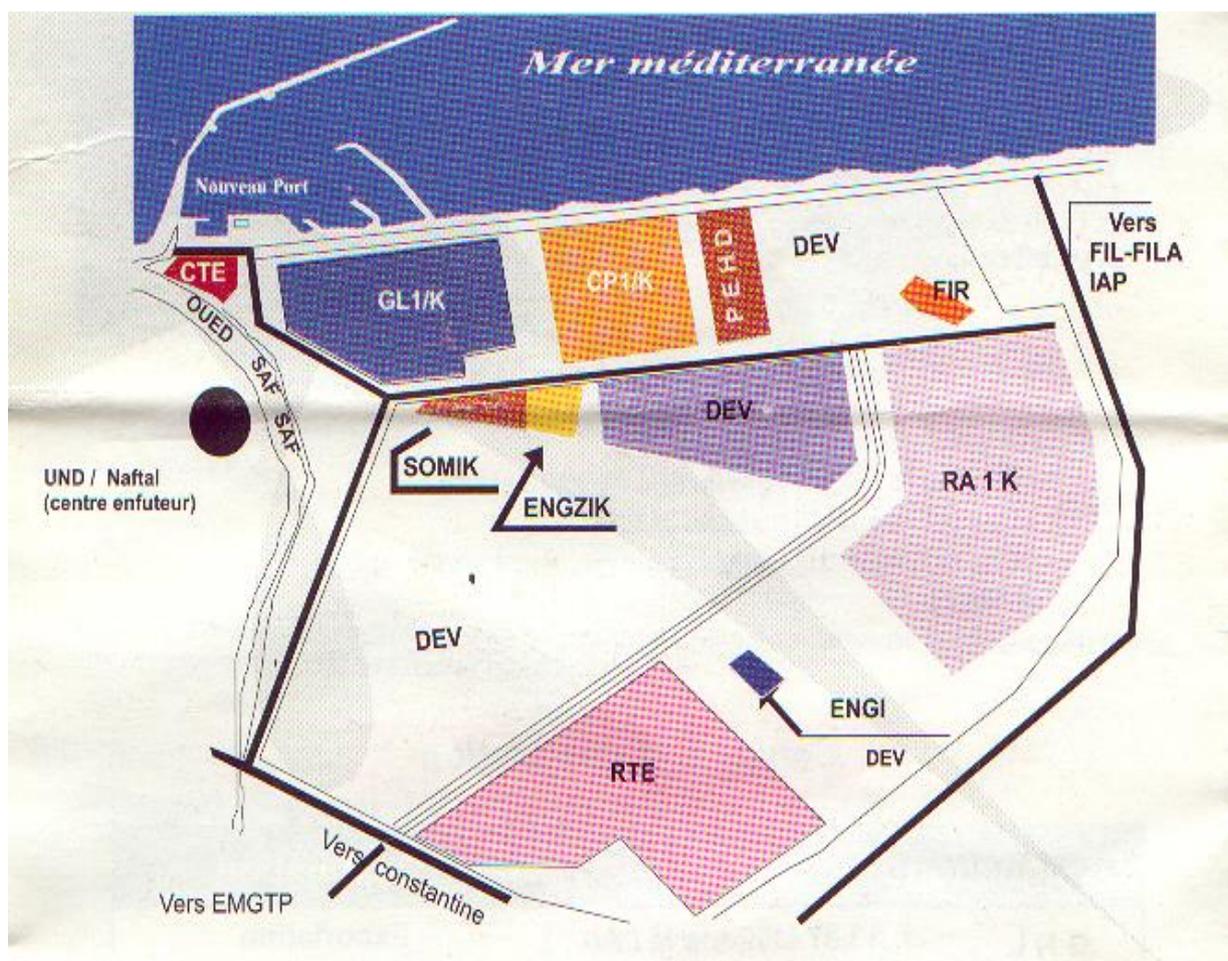


Figure I.3 : le complexe de raffinage de Skikda RA1K

I.4 Différents départements de la RA1K :

I.4.1 Département maintenance :

Le département maintenance a pour mission d'effectuer la maintenance des équipements qui se trouvent au niveau de la raffinerie, et limiter ainsi les arrêts qui peuvent se produire dans les unités de production en prévoyant un entretien préventif, le département se divise en deux secteurs :

a) Le secteur méthode :

Le secteur méthode a pour objectif d'optimiser et diriger les travaux mis en œuvre, dans le but d'aboutir à des solutions efficaces et rentables. Il est constitué de trois services :

- Service planning
- Service préparation
- Service statistique

b) Le secteur réalisation :

Ce secteur se compose de cinq services :

1. Service électricité :

Il est chargé de la gestion et de la maintenance de tous les équipements et appareils électriques du complexe après signalisation des unités de productions.

2. Service instrumentation :

Il est chargé d'étudier les appareils de mesure telle que les manomètres, débitmètres, etc.

3. Service logistique :

Ce service occupe des travaux de génie civil ainsi que la maintenance des locaux, les routes et les ateliers.

4. Service chaudronnerie :

Il s'occupe de la réparation, du nettoyage et l'entretien des équipements statiques : échangeurs, purgeurs, tuyauteries.

5. Service mécanique :

Ce service est assigné pour réparer les équipements mécaniques et effectuer les travaux d'entretien et fabrication des pièces mécaniques en cas de pannes.

I.4.2 Département production :

Le département joue le rôle primordial dans la raffinerie, il est chargé de la transformation du pétrole brut provenant de Hassi Messaoud, le brut mélange d'Arzew, et le brut réduit importé (BRI) de l'extérieur, afin de produire des dérivés (essences, kérosène, gasoil,...) de haute qualité qui rentre dans les normes internationales.^[3]

C'est le département rentable vue les réussites qu'il réalise chaque année dans sa capacité de production, le département comprend douze unités de procédé :

- Unité 10/11 de distillation atmosphérique (TOPPING).
- Unité 100 de pré traitement et de reforming catalytique (MAGNAFORMING).
- Unité 101/103 de pré traitement et de reforming catalytique (PLATFORMING).
- Unité 30/31 et 104 de traitement et séparation des gaz (GPL).
- Unité 200 d'extraction des aromatiques.
- Unité 400 de cristallisation et séparation du paraxylène.
- Unité 70 de distillation sous vide (Production des bitumes).
- Unité 600 de stockage, mélange et expédition (MELEX).
- Unité C.T.E centrale thermique électrique et utilités (C.T.E)

a. TOPPING U 10/11 :

Le topping ou distillation atmosphérique a pour but de fractionner le brut en différentes coupes stabilisées, pouvant être utilisées pour l'obtention de produits finis naphta, gasoil ou devant alimenter d'autres unités situées en aval magnaforming, platforming.

b. MAGNAFORMING - PLATFORMING U 100 /103 :

Le magnaforming et platforming a pour but de transformer le naphta moyenne et lourde obtenue à partir du topping en un produit (reformat) utilisé comme charge pour les unités d'aromatiques (unités 200 et 400). Cette transformation qui a pour conséquence une augmentation de l'indice d'octane de 45 à 99 permet aussi d'utiliser le reformat obtenu pour la fabrication des essences.

c. GPL U30/31 ET 104 :

Ces unités ont pour but de séparer à partir des GPL obtenus des unités topping et magnaforming ainsi que platforming, le butane et le propane commercial, le reste est utilisé comme fuel gaz.

d. EXTRACTION DES AROMATIQUES U200 :

Cette unité utilise une charge obtenue à partir de l'unité de magnaforming, par extraction au sulfolane, elle permet de séparer le benzène et le toluène des autres familles d'hydrocarbures. Le mélange benzène - toluène est ensuite fractionné en vue de l'obtention de produits à très haute pureté.

e. CRISTALLISATION DU PARAXYLENE U400 :

Cette unité utilise aussi une charge venant de l'unité de magnaforming, elle permet par cristallisation de séparer le paraxylène des autres xylènes (métha, ortho) et éthylène benzène, le para xylène est commercialisé sous forme de mélange xylène qui peut être utilisé comme solvant pour la fabrication des peintures.

f. PRODUCTION ET CONDITIONNEMENT BITUMES U 70 :

Cette unité est constituée de deux sections :

- La section bitume routier : elle produit par distillation sous vide d'un brut réduit importé, du bitume routier.
- La section bitume oxydé : cette section utilise comme charge une partie du bitume et du Slop wax, elle permet d'obtenir le bitume oxydé, qui après conditionnement (mis en sachet) peut être utilisé pour les revêtements, l'étanchéité,

g. CENTRALE THERMOELECTRIQUE (CTE) ET UTILITES :

La centrale thermoélectrique et utilités sont conçues par la production, le conditionnement et la distribution au sein de la raffinerie des utilités suivantes :

- air comprimé.
- vapeur basse, moyenne et haute pression.
- roues de refroidissement, eaux potables et anti-incendie.

- azote (gaz inerte).
- Fuel-oils et gaz naturel.
- Electricité.

h. UNITE DE STOCKAGE ET EXPEDITION (MELEX) U600 :

La raffinerie possède une capacité de stockage de 2.500.000 m³ environ. L'unité comprend tous les équipements nécessaires au mouvement et exportation des produits finis.

L'évacuation des produits finis se fait par un réseau de canalisation vers les deux ports de Skikda, les dépôts GPL et carburants de Skikda, ainsi que le centre installations intégrées de distributions du Khroub (Constantine). L'évacuation du bitume routier se fait quant à elle par camions et par pipelines vers le port.

La raffinerie de Skikda est conçue pour permettre la production des carburants, aromatiques, bitumes et gaz selon les répartitions suivantes :

- Propane - Butane : utilisation domestique.
- Essence normale - Essence Super : utilisation automobile.
- NAPHTA (A, B et C) : industrie pétrochimique.
- Kérosène - Jet A1 : Transport aérien.
- Gasoil MI - Gasoil BP - Gasoil NP : véhicules lourdes, utilisation domestique.
- Aromatiques et Benzène : utilisation peinture, plastique, pharmaceutique
- Bitume routier - Bitume oxydé : pour le pavage, revêtement d'étanchéité.

k. UNITE DE REFORMING CATALYTIQUE :

L'unité de reforming catalytique, a pour but de produire une essence à un indice d'octane élevé égal à 100 à partir des naphthas B et C de l'unité 10 ou 11.

Cette unité se divise en deux sections :

- Section pré traitement de naphta (U 101) : Son but est de purifier la charge des impuretés telles que : Le soufre, l'azote, l'oxygène et les métaux, ces derniers qui provoquent l'empoisonnement du catalyseur R- 62.

- Section platforming (U 103) : Ayant pour objectif la production du plat format avec un indice d'octane de 100 qui est utilisé comme base pour le mélange des essences.^[3]

I.5 Organisation et structure de l'unité :

L'unité "70" de production de bitume est organisée comme suit :

Un chef d'unité et un contre maître, qui ont la qualité des chefs par intérim, Ces deux responsables chapeautent les différents quarts "équipes" de l'unité, les quarts sont les équipes de travail et suivi de l'unité, qui ont un chef de quart qui supervise le travail des opérateurs, ces derniers se divisent en deux catégories:

- Opérateurs tableau, chargés de suivre le process à partir de la salle de contrôle
- Opérateurs extérieurs qui sont chargés d'effectuer les manœuvres nécessaires sur cite.

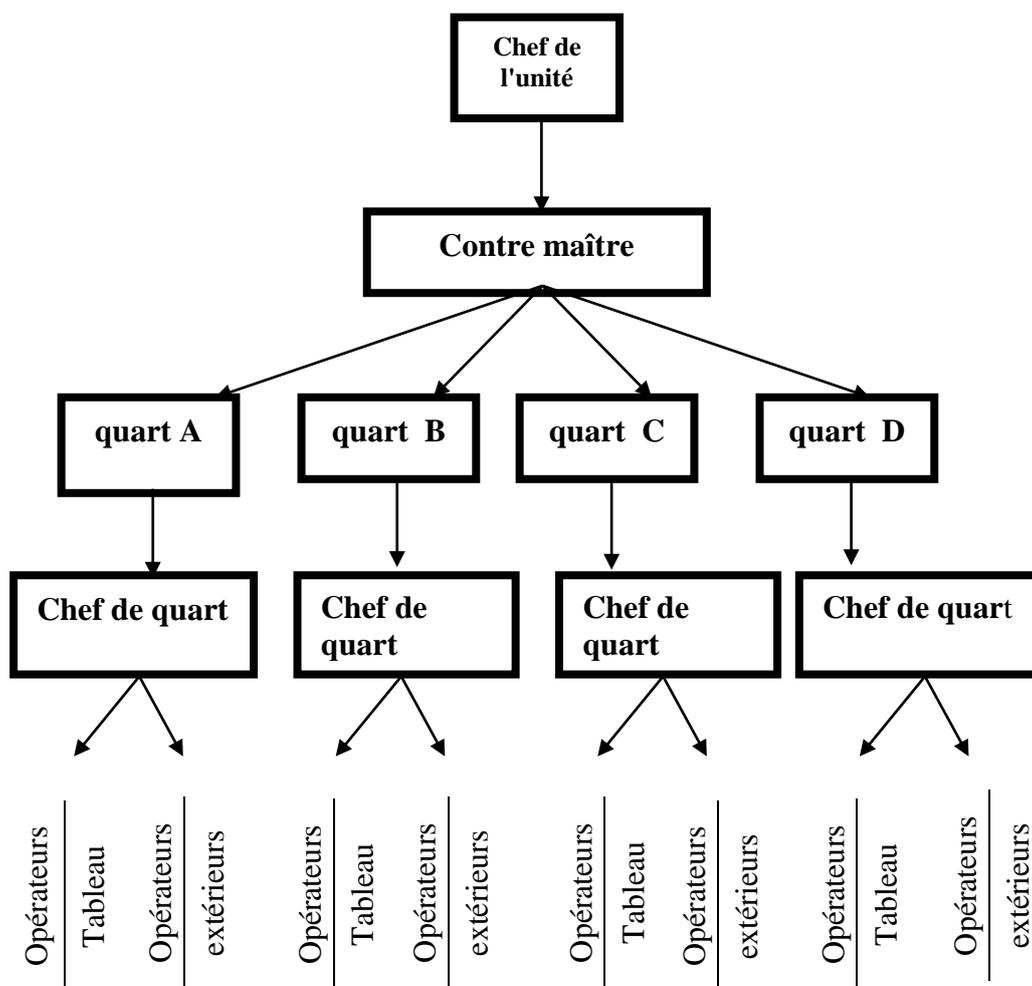


Figure I.4 : Organisation et structure de l'unité

Le bitume est un mélange d'hydrocarbures avec un poids moléculaire élevé et une structure colloïdale.

II-1- Caractéristiques des bitumes

La signification du terme bitume n'est pas la même dans tous les pays. Les bitumes appartiennent à une catégorie de produit que l'on appelle « les liants hydrocarbonés ». Ceux-ci sont définis et classés dans la norme française NF T 65-000. ^[4]

Les liants hydrocarbonés comprennent :

- Les bitumes qui sont des produits solides ou semi-solides extraits du pétrole ;
- Les émulsions de bitumes, qui résultent de la dispersion d'un bitume dans une phase réceptrice, en générale aqueuse ;
- Les goudrons, qui sont produits par cokéfaction à haute température du charbon.

II-2- Classification des bitumes

L'expression « liants hydrocarbonés » recouvre :

- **Les bitumes purs** : qui sont directement issus du raffinage du pétrole ;
- **Les bitumes fluidifiés (cut-backs)** : qui sont des bitumes mélangés avec un solvant plus ou moins volatil d'origine pétrolière qui généralement une coupe kérosène de qualité non commerciale. La viscosité de ses produits se trouve ainsi abaissée, permettant une mise en œuvre à température plus faible ;
- **Les bitumes fluxés** : qui sont des bitumes mélangés avec une huile de faible viscosité. Ces liants sont souvent plus visqueux que les bitumes fluidifiés. Le produit de fluxage est généralement une huile de houille, mais peut être une huile d'origine pétrolière ;
- **Les émulsions de bitume** ;

A côté de ses grandes catégories, il faut citer :

- **Les bitumes fluxés mixtes** : ou l'huile de fluxage est un mélange de produits d'origine pétrolière et de produits de la houille ;
- **Les bitumes composés** : qui sont des mélanges bitume-goudron ou bitume-brai de houille dans lesquels le bitume est majoritaire.

- **Les bitumes modifiés** : ce sont des bitumes additionnés des substances d'origine diverses, généralement des polymères qui modifient certaines de leurs propriétés. ^[6]

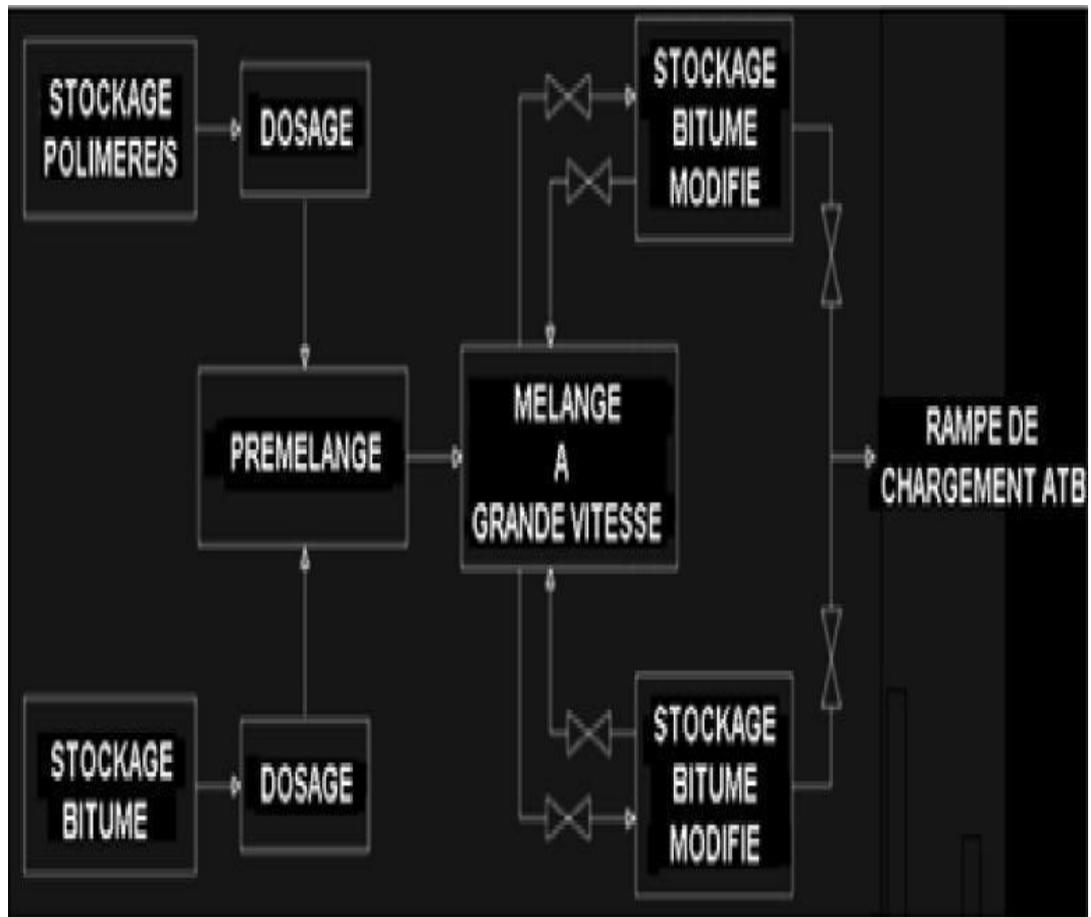


Figure II-1 : schéma logique de production de bitume modifié

II-3-Fabrication des bitumes

Il existe plusieurs procédés de fabrication des bitumes à partir des pétroles bruts :

- **La distillation** : des bruts choisis pour leurs rendements en coupes lourdes est le moyen le plus utilisé. Les bitumes sont extraits des résidus de la distillation sous pression réduite (quelque dizaines de mm de mercure), elle-même alimentée par des résidus de distillation atmosphérique. Contrairement à ce qui se passait il y a une dizaine d'années, il est maintenant possible d'obtenir toutes les catégories de bitumes par ce procédé, y compris les grades durs.

- **Le désasphaltage au solvant** : il s'agit d'extraire d'un résidu sous vide ou d'un distillat lourd les fractions les plus lourdes, qui serviront à fabriquer les bitumes, la séparation est basée sur la précipitation des asphaltènes et la solubilisation de l'huile dans un solvant du type alcane, les solvants employés sont le butane ou le propane ou un mélange butane- propane, en choisissant la nature du produit de charge et en réglant les paramètres de désasphaltage, notamment la température et la pression, il est possible d'obtenir par ce procédé différents grades de bitumes.

- **Le soufflage** : consiste à faire circuler de l'air à contre-courant dans une charge bitumineuse afin de l'oxyder, il résulte de cette opération la formation de molécules à haut poids moléculaire et de structure différente de celle du produit initial, il est ainsi possible d'obtenir des grades durs à point de ramollissement très élevé.^[6]

II-4-Applications des bitumes

Il existe deux grandes catégories d'utilisation des bitumes :

- **Les applications routières** : on emploie à cet usage les bitumes purs, les bitumes fluidifiés et fluxés ainsi que les émulsions, chacun de ces produits faisant l'objet de techniques de mise en œuvre bien spécifiques, il convient d'ajouter à cette liste l'utilisation d'asphalte coulé, bien que ce produit convienne mieux aux petites surfaces : trottoirs, cours, etc., qu'aux chaussées, depuis le milieu des années 80, le bitume soufflé ne trouve plus de débouché en construction routière.

- **Les applications industrielles**, pour lesquelles les bitumes soufflés sont très utilisés, citons parmi les applications industrielles :
 - Les travaux d'étanchéité, qu'il s'agisse de protéger des ouvrages d'art ou des toitures et terrasses, on peut utiliser de l'asphalte coulé, souvent placé en couches avec du papier kraft, ou du bitumes oxydés ou de bitumes modifié, généralement avec des copolymères. Ces bitumes modifiés sont utilisés pour la fabrication de complexe d'étanchéité multicouche préfabriqué.
 - Les joints pour boucher des fissures, sur les routes en particulier, on utilise pour cela des mélanges de bitumes, d'huiles lourdes et de polymères ou de soufre L'insonorisation, dans le bâtiment, l'automobile, l'électroménager par exemple ;
L'isolation électrique, avec des bitumes oxydés : câbles électriques, condensateurs, piles électriques ou batteries d'accumulateurs.
 - Les peintures et vernis bitumineux, qui sont faits de mélanges d'un bitume dur, généralement oxydé et d'un solvant léger ou non léger.

II-5-Propriétés recherchées pour les bitumes

Les principales caractéristiques des bitumes sont leur point de ramollissement et leur pénétrabilité à l'aiguille. La ductilité et le point d'éclair qui est toujours à la base de la classification des bitumes et de la désignation des classes. Pourtant la première est plus représentative de leur capacité à la déformation lorsque la température de service s'élève. Les autres propriétés ont une importance plus ou moins grande selon les utilisations.

➤ Pénétrabilité à l'aiguille :

La pénétrabilité est la profondeur exprimée en 1/10 de millimètre, à laquelle pénètre dans un échantillon de bitume porté à 25°C une aiguille d'acier normalisée appliquée pendant 5 secondes sous une charge de 100 g. la méthode d'essai correspondante est relativement délicate de mise en œuvre et est définie en Algérie par la norme NA5192, et aux Etats-Unis par la méthode ASTM D583. ^[5]

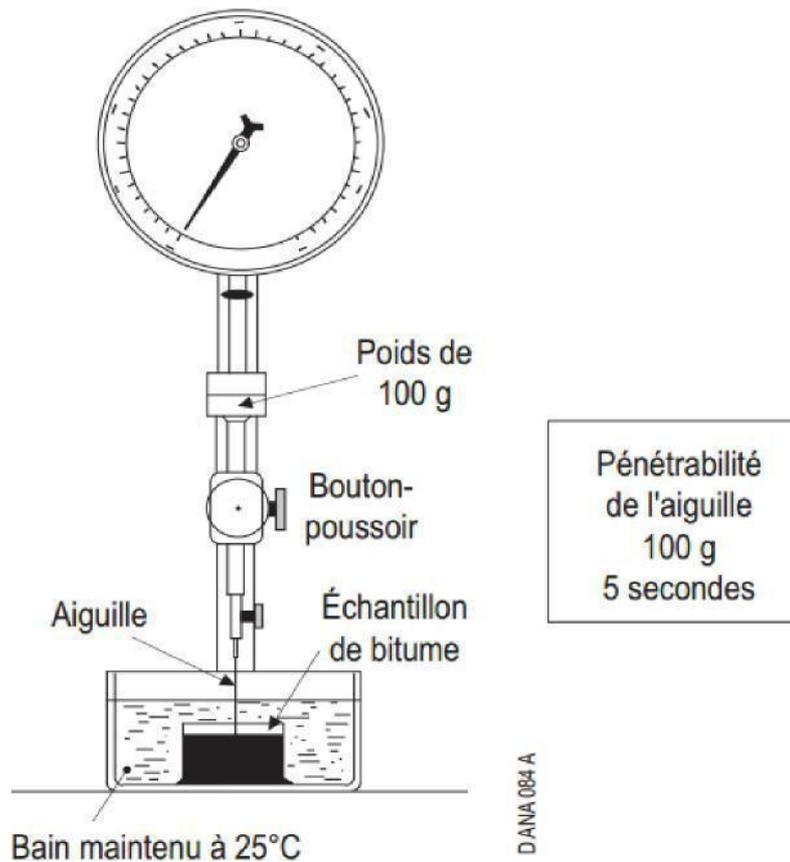


Figure II.2 : Essai de pénétrabilité à l'aiguille

➤ **Point de ramollissement :**

Le point de ramollissement est la température à laquelle un produit bitumineux devient mou dans des conditions normalisées. Il est mesuré par la méthode dite ‘bille et anneau’. Une bille d’acier de dimension et poids bien définis est placée sur une pastille de bitume qui est enchâssée dans un anneau de métal lui aussi bien défini. L’ensemble est chauffé progressivement. Lorsque la pastille de bitume est devenue assez molle pour que la bille la traverse et parcoure une hauteur de 2,5 cm, la température correspondante est appelée point de ramollissement, il est défini en Algérie par la norme NA2617. Et aux Etats-Unis par la méthode ASTM D 36-76. ^[5]

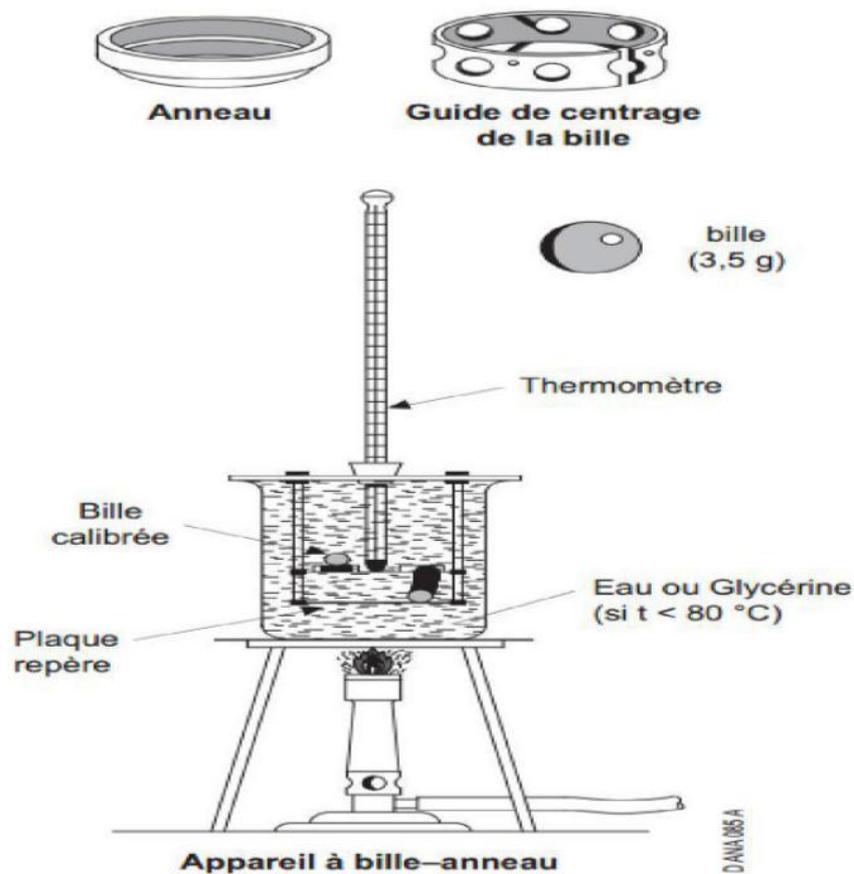


Figure II.3 : Essai du point de ramollissement

- **Masse volumique :**

Cette grandeur est mesurée au moyen de pycnomètre (NF T 66-007, ASTM D 70).

- **Ductilité :**

C'est l'allongement, au moment de la rupture, d'une éprouvette de bitume qui est étirée à une vitesse et une température déterminées. Référence de la méthode : ASTM D 113. [5]

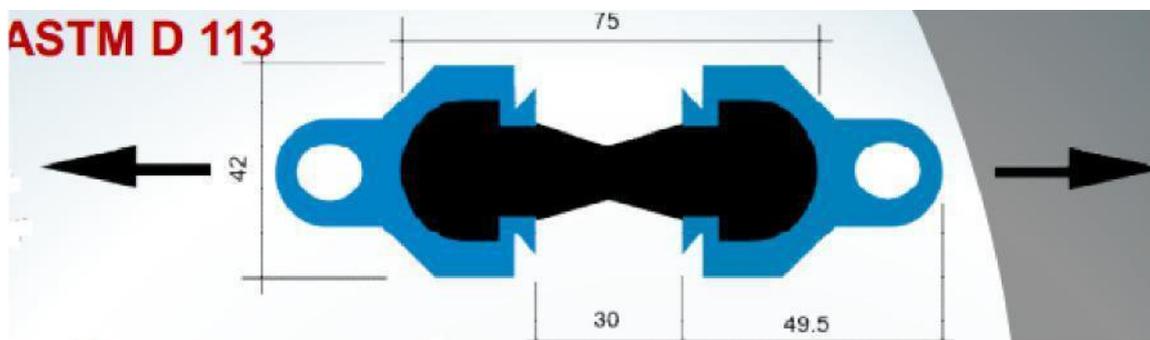


Figure II.4 : essais ductilité

➤ **Point d'éclair :**

C'est la température à laquelle il faut porter un produit pétrolier liquide pour qu'il émette dans des conditions normalisées, des vapeurs en quantité suffisante pour que celles-ci puissent s'enflammer en présence d'une flamme.

La méthode est définie sous la référence ASTM D 92. [5]

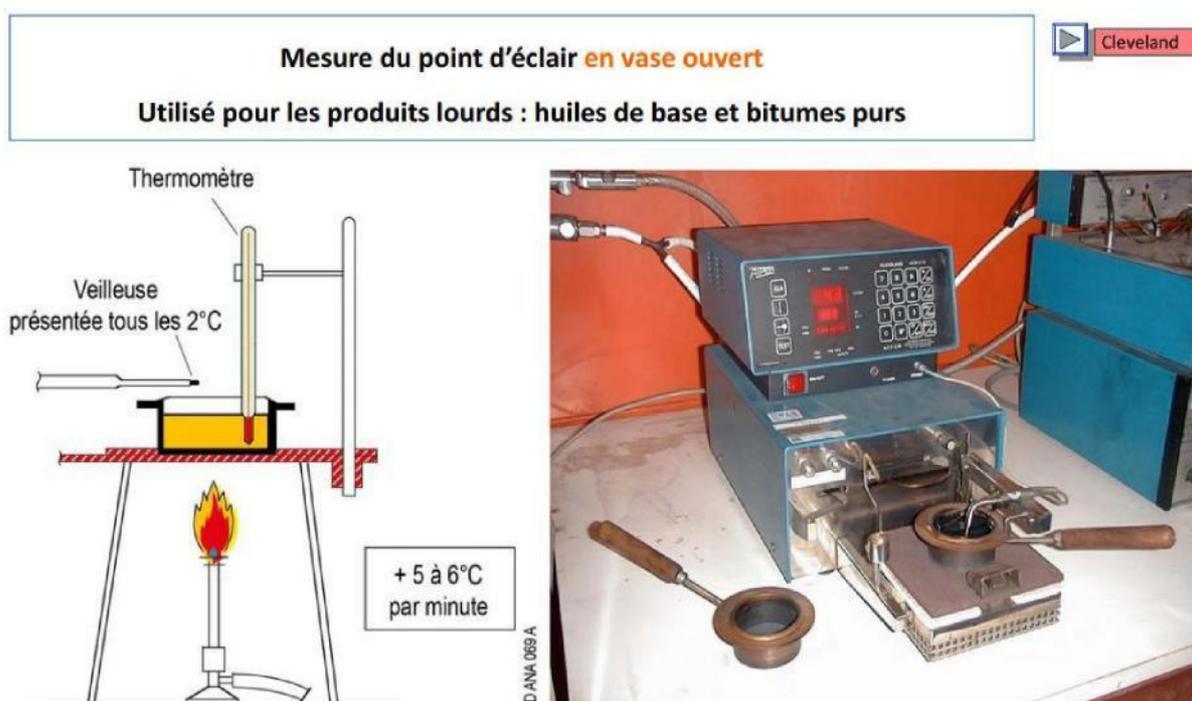


Figure II -5 : mesure de point d'éclair

Cette méthode de mesure du point d'éclair s'applique aux produits très lourds comme les huiles de base et les bitumes purs.

Dans cet essai l'échantillon est placé dans un creuset ouvert. Le produit est chauffé peu à peu et le point d'éclair est atteint quand les vapeurs qui s'échappent deviennent suffisamment riches en hydrocarbures pour s'enflammer en présence de la veilleuse positionnée au-dessus de celle-ci.

Le thermomètre plongé dans le produit permet de noter la température correspondante qui est le point recherché.

II-6-La rhéologie

La rhéologie est la science qui s'intéresse à l'écoulement et à la déformation de la matière, les caractéristiques rhéologiques du bitume à une température donnée sont déterminées par la constitution (composition chimique), et la structure des molécules. Un changement de la constitution ou de la structure conduit à un changement de la rhéologie. Ainsi, pour comprendre les changements de la rhéologie des bitumes, il est important de comprendre comment la structure et la constitution des bitumes sont liées pour influencer sur la rhéologie.

II-7-Constitution des bitumes

La configuration de la structure interne des bitumes est déterminée par la constitution chimique des espèces moléculaires présentes. Le bitume est un mélange chimique complexe de molécules, qui sont majoritairement les hydrocarbures, avec une petite quantité des espèces hétérocycliques structurellement analogues et des groupes fonctionnels contenant le soufre, l'azote, et l'oxygène. Le bitume contient aussi des traces de métaux tels que le vanadium, le nickel, le fer, le magnésium, et le calcium, qui apparaissent sous forme de sels inorganiques et d'oxydes. Les analyses élémentaires des bitumes issus d'une variété de pétrole brut montrent que la majorité des bitumes contiennent :

- le carbone : 82-88% ;
- l'hydrogène : 8-11% ;
- le soufre : 0-6% ;
- l'oxygène : 0-1.5% ;
- l'azote : 0-1%.

La composition précise varie selon la source du pétrole brut, et les modifications introduites par la semi oxydation et l'oxydation lors de la fabrication.

La composition chimique du bitume est trop complexe, donc une analyse complète de bitume (si c'est possible) serait extrêmement laborieuse, et produit une grande quantité de données de telle sorte que la corrélation avec les propriétés rhéologiques ne serait pas pratique, si ce n'est pas impossible. Cependant il est possible de séparer le bitume en deux larges

groupements chimiques appelés les asphaltènes et les maltènes. Les maltènes pourraient être encore subdivisés en hydrocarbures saturés, aromatiques, et résines. Les quatre groupes ne sont pas bien définis et il y a un certain chevauchement entre les qualités de chaque groupe.

Les méthodes de séparation de bitumes en fractions peuvent être classées comme suit :

- Extraction aux solvants ;
- Adsorption ;
- Chromatographie (SARA) ;
- Distillation moléculaire utilisé en conjonction avec l'une des techniques ci -Dessus.

L'extraction aux solvants est attractive comme elle est une technique relativement rapide, mais la séparation obtenue est généralement plus pauvre que celle de la chromatographie où l'effet du solvant est combiné avec une adsorption sélective. De même les méthodes d'adsorption simples ne sont pas efficaces comme la colonne de chromatographie dans laquelle la solution de dilution est constamment réexposée à l'adsorbant frais et aux différentes conditions d'équilibre au cours de son chemin vers le bas de colonne. (La solution de dilution est celle utilisé pour retirer la substance adsorbée par lavage). La distillation moléculaire est lente et présente des limitations en ce qui concerne la surface dans laquelle la séparation et la distillation des composants bitumineux a haut poids moléculaire peuvent être effectuées.

Les technique chromatographiques (SARA) sont donc les plus largement utilisées pour définir la constitution du bitume. La base de la méthode est initialement de précipiter les asphaltènes en utilisant le n-heptane suivi par une séparation chromatographique des matières restante. ^[4]

II-7-1-Les asphaltènes ; Ce sont des solides amorphes insolubles dans le n-heptane, de couleur noir ou marron. Ils contiennent en plus du carbone et d'hydrogène, un peu de soufre, azote, et oxygène. Les asphaltènes sont généralement considérés comme des composés aromatiques à haut poids moléculaire et de haute polarité.

Les différentes méthodes de détermination de la masse moléculaire ont conduit à des différentes valeurs allant de 600 à 300000 dépendant de la technique de séparation utilisée. Cependant la majorité des tests indique que le poids moléculaire des asphaltènes est compris entre 1000 et 100000, ils ont une taille de particule de 5 à 30 nm, et un rapport hydrogène/carbone d'environ 1,1.

La teneur en asphaltènes a un grand effet sur les caractéristiques rhéologiques des bitumes. L'augmentation de la teneur en asphaltènes produit un bitume dur, plus visqueux, avec une basse pénétrabilité, un point de ramollissement élevé. Les asphaltènes constituent 5 à 25% des bitumes.

II-7-2-Les résines ; Les résines sont solubles dans le n-heptane. Comme les asphaltènes, elles sont largement composées d'hydrogène et de carbone et de petites quantités d'oxygène, de soufre et d'azote. Elles sont de couleur marron foncée, solide ou semi solide et polaire. Elles sont fortement adhésives. Les résines sont des agents dispersants ou peptisants pour les asphaltènes. Les résines ont un poids moléculaire compris entre 500 et 50000, une taille de particule de 1 à 5 nm et un rapport atomique H/C de 1,3 à 1,4.

II-7-3-Les aromatiques ; Les aromatiques constituent 40 à 65% du bitume, présent sous forme d'un liquide visqueux de couleur marron foncé. Leur poids moléculaire est compris entre 300 et 2000. [

II-7-4-Les hydrocarbures saturés ; Ce sont des hydrocarbures aliphatique à chaîne linéaire ou ramifié avec des alkyl-naphténiques et quelque alkyl-aromatiques. Ce sont des huiles visqueuses non polaires de couleur beige ou blanche. Leur poids moléculaire est similaire à celui des aromatiques. Ils constituent 5 à 20% du bitume.

Quelques structures typiques des fractions SARA sont présentées ci-dessous :

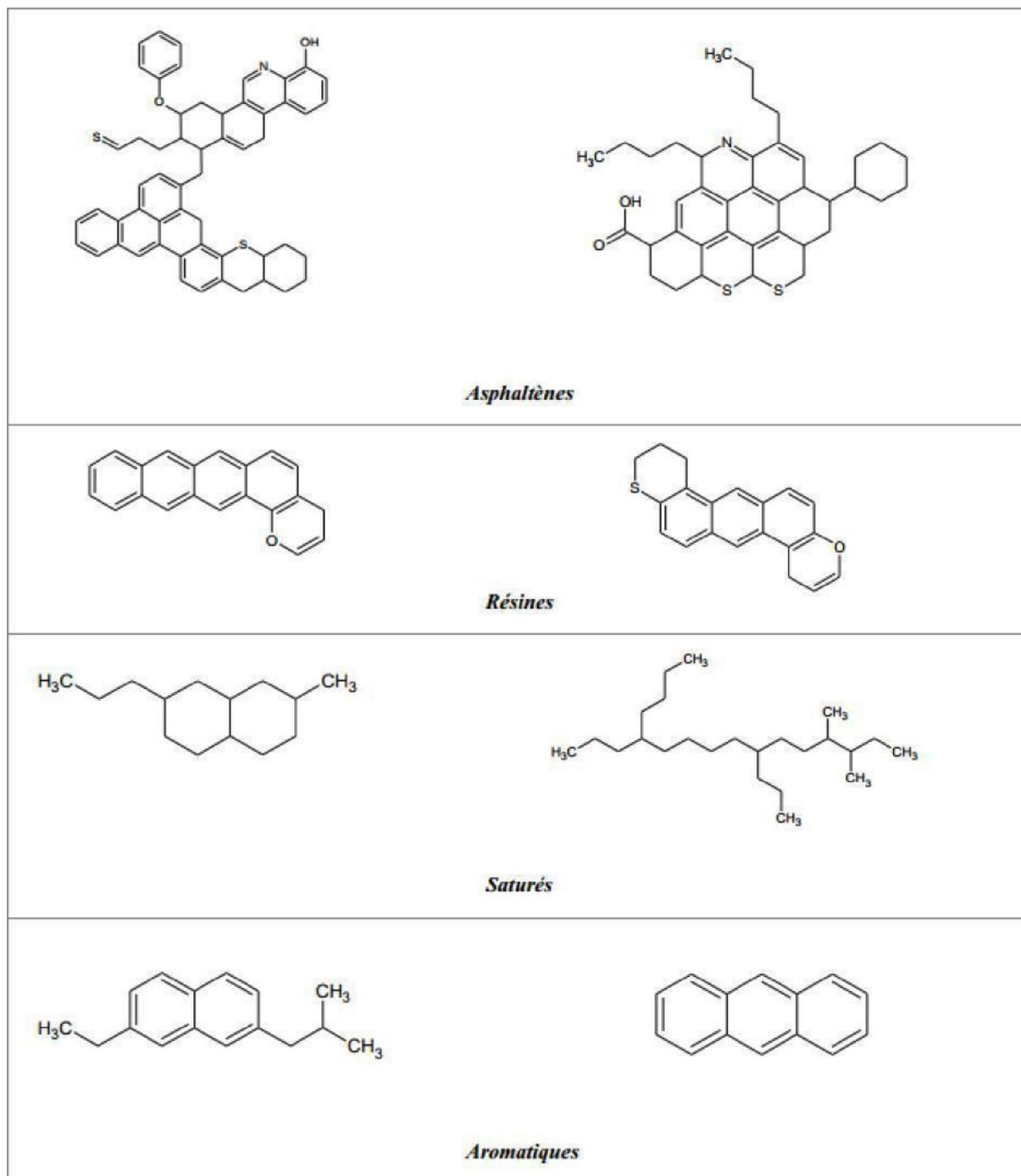


Figure II-6 : Structures typiques des fractions SARA

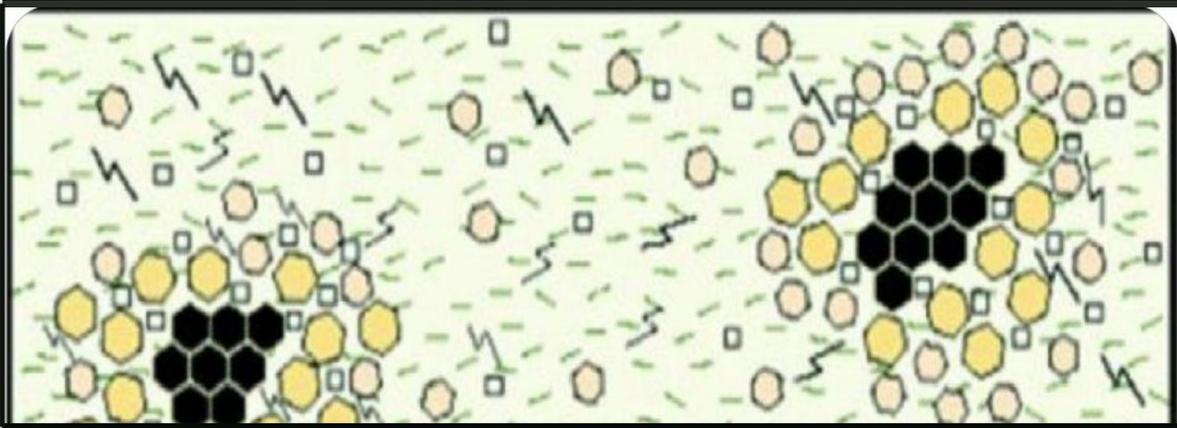


Figure II-7 : Structure de bitume

II-8- Bitume oxydé

II-8-1-Pratique de l'oxydation :

L'oxydation des bitumes s'effectue avec l'air et consiste essentiellement à éliminer un certain pourcentage d'hydrogène (transformé en eau par l'oxygène), des chaînes d'hydrocarbures ayant pour effet d'obtenir leur condensation en chaînes.

Les asphaltènes qui existent dans les bruts sont en état dispersé, sont tenus en cette condition par des résines. Elles ont deux caractéristiques qui les rendent problématiques à un système de raffinage.

1- elles constituent la plus grande fraction aromatique en pétrole aussi bien qu'être le composant le plus élevé de poids moléculaire,

2- qu'ils n'ont aucun point de fusion défini et restent donc en forme pleine contribuant de ce fait au résidu de carbone. Les variables déterminantes sont ; la température entrée de la colonne et le vide que l'on peut obtenir. Les bitumes obtenus directement par distillation sous vide constituent les bitumes routiers, utilisés comme élément de cohésion des agrégats minéraux dans la construction de l'asphalte routier.

On peut améliorer les caractéristiques de pénétration et de ramollissement du bitume en leur donnant de meilleures propriétés mécaniques pour les différentes applications industrielles grâce au procédé d'oxydation. ^[6]

II-8-2. Réaction mise en jeu :

L'oxygène de l'air réagit avec les composants du bitume pour donner naissance à des molécules du asphaltènes par :

- > Formation des esters R^2-COOR
- > Déshydrogénation et création des liaisons carbone-carbone par polymérisation des molécules entre elles.

L'importance relative de ses réactions dépend surtout de la Température.

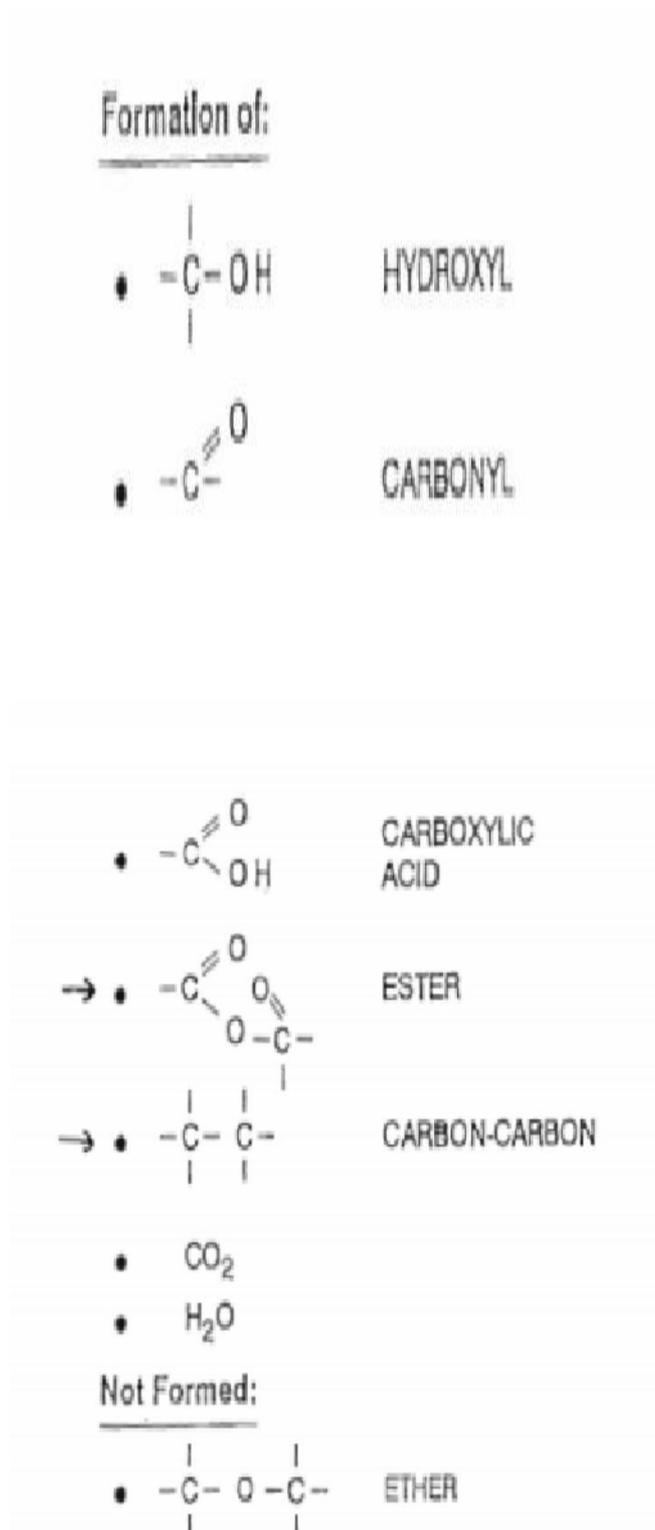


Figure II-8 : Produits chimiques de bitume oxydé

En variant la qualité de la charge et les conditions opératives de l'installation, il est possible d'obtenir les différents degrés de qualité des bitumes oxydés. Afin d'obtenir un bitume ayant un point de ramollissement supérieur à 80°C, même avec des valeurs de pénétration pas trop faibles, les réactions à préférer sont la formation d'esters et de liens Carbone-Carbone.

La réaction de l'Oxygène avec le bitume est favorisée par la température, mais avec l'augmentation de celle-ci, la quantité d'oxygène nécessaire aux réactions non désirées augmente aussi, faisant par conséquent diminuer l'Oxygène disponible pour la formation des liens C-C.

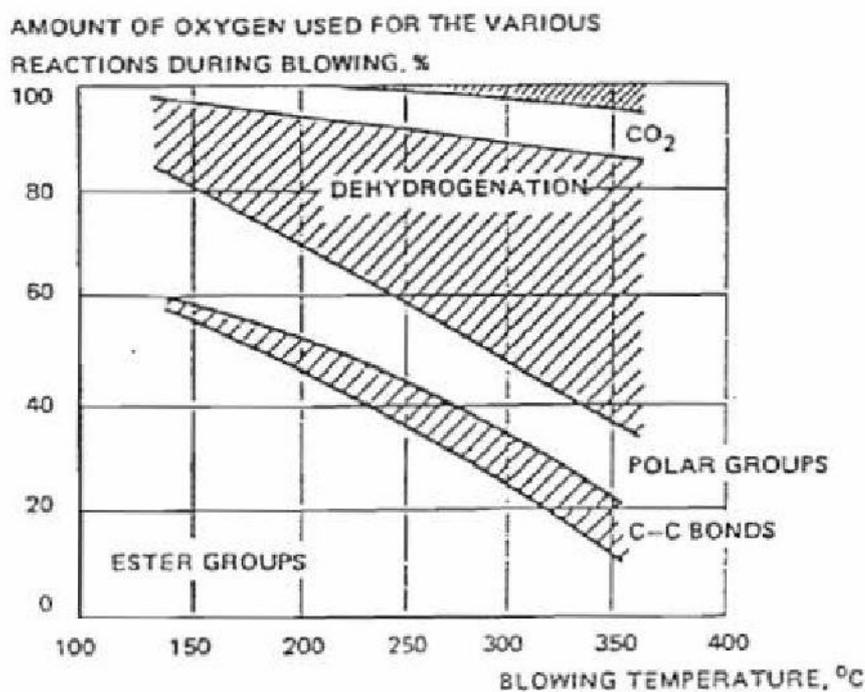


Figure II-9 : déroulement des réactions en fonction d'oxygène et de la température.

On dépasse cependant rarement 250 °C, car des réactions parasites interviennent, qui réduisent l'efficacité de l'air et nuisent à la qualité du bitume obtenu. Vers 300 °C les réactions exothermiques s'emballent et deviennent très difficiles à contrôler.

Il est possible d'accélérer considérablement les réactions de soufflage au moyen d'additifs tels que : P₂O₅, Fe, Cl₃.^[6]

CHAPITRE III

Description de l'unité U70

III.I Description du procédé de l'unité

L'unité se compose de deux sections :

- Section sous vide.
- Section oxydation.

a) Section sous vide :

Le brut réduit stocké aux bacs *S 106 / S 107* à une température $80-100^{\circ} C$, est aspiré par les pompes *MP 1 A/B* et refoulé à travers une batterie d'échangeurs à une pression de $10-15 \text{ kg/cm}^2$ contrôlée par la *PIC 1* et d'un débit de $36 \text{ m}^3/\text{h}$ contrôlé par *FRC 1*.

La charge se divise en deux parties :

La première partie dont le débit est indiqué par *FI 3* passe à travers l'échangeur *E 1* cote tube ou elle est chauffée par le bitume routier (résidu).

La deuxième partie dont le débit est indiqué par *FI 4* passe à travers l'échangeur *E 2* coté calandre ou elle est préchauffée par le gasoil du sixième plateau.

Les deux parties se rencontrent à l'entrée du *E 3* ou elles passent coté tube préchauffée par le résidu.

La charge passe alors à travers *E 4/E 5* ou elle est préchauffée respectivement par le gasoil coté calandre et le *résidu* coté tube.

Après le train de préchauffe (sortie *E 5*), la charge étant préchauffée à une température de $220^{\circ} C$ entre dans le four *70 F 1* dans la zone de convection à travers deux passes dont les débits sont contrôlés par *FRC 1 A/B*.

Dans le four la charge est chauffée à une température allant jusqu'à $390^{\circ} C$.

Afin d'éviter la formation de coke provoquée par le phénomène de craquage, on injecte de la vapeur *MS* ($29 \text{ kg/cm}^2 G$) dont les débits sont réglés par *FR 11* et *FR 18*.

Le contrôle et la régulation de la température de la charge sortie four s'effectue par la *TRC 1* en cascade avec la *PIC 3* du fuel gaz.

La charge à la sortie du four entre dans la colonne *C 1* (distillation sous vide) par la zone de flash. Le bitume routier récupéré par le fond, traverse une zone de stripping à la vapeur surchauffée dans la zone de convection du four dont le débit est réglé par *FR 22*.

La zone d'épuisement est constituée de cinq plateaux à clapets, le niveau du fond de la colonne est contrôlé par *LRC 3*.

Le bitume routier est aspiré par les pompes *MP 4 A/B* est envoyé au stockage à travers le train de préchauffe *E 5/E 3/E 1*, après lequel une partie est utilisée comme charge à la section oxydation, une partie comme reflux fond de colonne *C 1*, le reste est envoyée à stockage au bac *S 110/S 111* à travers *FR 2*.

De la zone de distillation constituée de deux zones de garnissage on soutire du slop wax de la zone inférieure (6^{ème} plateau) dont le niveau est contrôlé par *LIC 2*, transférer par la pompe *MP 3 A/B*. Une partie est recyclée avec la charge à l'entrée du four dont le débit est indiqué par *FI 9* l'autre partie est refroidie dans l'échangeur *E7*, cette coupe est envoyée vers la section oxydation, et le reste à stockage au bunker oil à travers *FI 5*.

On soutire le gasoil lourd (7^{ème} plateau) dont le niveau est contrôlé par *LIC 1*, le produit est aspiré par *MP 2 A/B*, une partie est utilisée comme reflux chaud en dessous du 7^{ème} plateau, dont le débit est contrôlé par *FRC 20*, l'autre partie passe à travers le train de préchauffe *E 4 /E 2*, puis refroidie par les aerorefrigerants *EA 1 A/B* et va à stockage à travers *FI 6*.

Une partie refroidie dans l'échangeur *E 6* est utilisée comme reflux de tête colonne *C 1*, le débit est contrôlé par *FRC 21* en cascade avec *TRC 3*.

Les vapeurs de tête de colonne constituées essentiellement : de la vapeur d'accompagnement, de stripping, et des hydrocarbures sont aspirés par un système de vide permettant d'atteindre un vide de *60 mmHg (0.08 kg/cm²G)* en tête de colonne réglée par *PRC 10*. Les vapeurs traversent un pré condenseur *JIC 1* à eau, le condensât est récupéré dans le ballon *V 1*, les vapeurs sont aspirées par le système d'éjecteurs à vapeur composé de trois stades (*JIC 2, JIC 3, JIC 4*), chaque stade ayant trois éjecteurs et un condenseur.

Les incondensables du système de vide sont récupérés dans le ballon *V 4*, passent à travers une trappe hydraulique et sont brûlés dans le four (brûleurs spéciaux) avec la possibilité d'envoi à l'atmosphère en cas d'urgence à travers la vanne à trois voies *XX 1 VB*.

Les condensats du ballon *V 1* dont le niveau est contrôlé par *LIC 4* transféré par la pompe *MP 5 A/B* vers le ballon de séparation *V 2*, le niveau est contrôlé par *DLRC 5*. Les eaux acides sont acheminées vers l'unité traitement des eaux, le gasoil léger au stockage à travers *FR 24* au bunker oil. ^[7]

b) Section oxydation :**➤ Marche en continu**

Le bitume routier provenant de l'échangeur *E 1*, à travers *FRC 25*, et le Slop provenant de l'échangeur *E 7* à travers *FRC 8* se mélangent et constituent la charge à l'oxydation dont le débit est indiqué par *FI 26*, une partie du Slop est envoyée en tête *R 1* à travers la ligne sortie gaz pour éviter le bouchage.

Cette charge est chauffée dans l'échangeur *E 8* par le produit (bitume oxydé) et éventuellement par le réchauffeur à la vapeur *E 9* jusqu'à atteindre la température de $204^{\circ} C$ et alimente le réacteur *R 1* ou elle entre en contact avec l'air injecté à travers le diffuseur d'air, par le compresseur d'air *MK 1*.

A défaut du compresseur d'air, l'air est prélevé du réseau air service.

Le bitume oxydé, du fond du réacteur recueilli par débordement à travers un siphon passe dans le ballon d'accumulation *V5* dont le niveau est contrôlé par *LIC 10*.

Du fond du ballon, le produit est transféré par *MP 7 A/B*, refroidi dans l'échangeur *E 8* puis envoyé à stockage à travers *FR 29* aux bacs *S 112 / S 113 / S 114*.

De la tête *V 5*, les gaz provenant de la réaction d'oxydation reviennent par la ligne d'équilibrage en tête *R 1*.

La réaction étant exothermique et afin de contrôler la température en tête réacteur, on a prévu un refroidissement à vapeur *LS* et un refroidissement avec condensât *MC*.

Les vapeurs et l'air pauvres en oxygène sont refroidis dans le mélangeur à gasoil *ME 2* (*gasoil* provenant du *E 6* à travers *FI 33*).

Les hydrocarbures condensés sont récupérés dans le ballon séparateur *V 6* ou les liquides sont envoyés au ballon de drainage fermé *V 7*, puis transférés au moyen la pompe immergée *MP10* vers stockage à bunker.

Les vapeurs résiduelles du ballon *V 6*, particulièrement malodorantes dues à la présence des mercaptans et des sulfures sont brûlées dans l'incinérateur *ME 1* à travers *XX 2 VB* avec possibilité de les envoyer à travers *XX 2 VA* à l'atmosphère en cas de nécessité.^[7]

➤ **Marche discontinue**

La charge mélange du bitume routier Slop est stockée dans des bacs *S 1/S 2* (équipés de serpentins de chauffage à la vapeur *MS*).

L'alimentation du réacteur *R 1* est assurée par les pompes *MP 9* à travers le préchauffeur *E 9*, dont le débit est contrôlé par *FRC 25 B*.

Le bitume oxydé est aspiré par la pompe *MP 7 A/B* du fond du réacteur, refroidie à travers l'aerorefrigerant *EA 2*, puis envoyée à stockage aux bacs *S 112/S 113/S 114*.^[7]



Colonne de distillation Sous vide



Section d'oxydation (réacteur)



Les échangeurs E1, E2, E3, E4

III.2 Généralités sur le four

Introduction :

Un four est un équipement destiné à fournir de la chaleur au fluide circulant dans un serpentin tubulaire, cette chaleur est produite par combustion d'un combustible au moyen des brûleurs placés dans le four.

Un four tubulaire est constitué d'une enveloppe de formes diverses, souvent parallélépipédique ou cylindrique. Le four comporte une zone de radiation où les tubes sont directement exposés à la flamme et reçoit la chaleur par radiation de combustible, cette zone constitue la chambre de combustion où se développe la flamme, et en général devant les parois de cette zone que sont placés les tubes.

La zone de convection est installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion, elle est constituée d'un faisceau de tubes placé perpendiculairement ou parallèlement à la direction des fumées, dans les deux cas on cherche à définir une vitesse assez grande pour les fumées de façon à augmenter le coefficient d'échange.

Les tubes placés en zone de convection ont quelque fois leurs surfaces extérieures dans la partie qui est en contact avec les fumées recouvertes d'ailettes ou aiguilles qui augmentent considérablement la surface d'échange.

L'enveloppe métallique du four est suffisamment renforcée pour résister aux actions du vent et supporter l'ensemble du faisceau tubulaire.

Les parois intérieures du four, particulièrement celles de la chambre de combustion sont protégées contre les effets de la température par un garnissage réfractaire et isolant pour réduire les pertes calorifiques à l'extérieur.

III.2.1 UTILISATION DES FOURS TUBULAIRES :

Dans la plupart des installations de raffinage ou de pétrochimie, l'apport des calories est nécessaire aux procédés et il se fait par l'intermédiaire du four à chauffage direct dans lequel les calories produites par la combustion sont transmises par le mécanisme de la radiation, de la conduction et de la convection au fluide à réchauffer, qui circule dans un serpentin tubulaire ou un faisceau de tubes. Les usages du four sont multiples mais chaque cas nécessite une étude particulière dans le but de concevoir un four économique. ^[8]

On peut citer les exemples suivants :

a. Réchauffage sans changement de phases :

Dans ces fours, la charge liquide ou gazeuse ne reçoit que la chaleur sensible. C'est le cas des fours de l'unité de reformage catalytique ou de traitement des coupes de tête de distillation du pétrole brut dans lesquels la charge est déjà vaporisée à l'entrée du four et portée à la température nécessaire d'initiation des réactions chimiques sur les lits des catalyseurs.

b. Réchauffage avec vaporisation partielle :

C'est le cas de la plupart des fours des installations de distillation "four de charge ou four rebouilleurs en fond de colonne", les fours de ce type sont les plus nombreux et sont en général ceux dans la capacité thermique et la plus élevée.

c. Réchauffage avec réaction :

Dans ce cas le faisceau tubulaire du four peut être assimilé à un réacteur chimique. On trouve ce type de four dans les unités de craquage thermique et dans certains cas lorsque la réaction se fait en présence de catalyseur, celui-ci est placé dans les tubes eux même du four.

d. Différents types des fours :

➤ Four a convection :

La capacité de ce four est faible, et les tubes des rangés inférieures sont soumis à des surchauffes préjudiciables.

➤ Four classique :

Les positions de ces fours sont multiples. Ils sont relativement chers car ils nécessitent une cheminée de grandes dimensions, la construction des voûtes est onéreuse, ces fours ont en général un faible taux de transfert.

➤ Four cabine :

Ces fours sont adaptés pour des capacités moyennes ou importantes, et peuvent fonctionner avec un taux de transfert élevé et régulier.

➤ Four cylindrique vertical :

Ce type de four peut être utilisé pour toutes les capacités, la zone de radiation est généralement parallélépipédique. Les brûleurs sont situés sur la sole, la surface d'échange couvre la partie verticale latérale, leurs constructions sont économiques.

➤ Four pétrochimique :

C'est un four cylindrique vertical qui peut être équipé dans le cas où le fluide à réchauffer impose une bonne répartition de taux de transfert d'une zone de rayonnement suspendu à la base de la cheminée ou la zone de convection. La cheminée est souvent réalisée par un manchon circulaire créant un espace annulaire où les fumées circulent à grande vitesse, les tubes sont munis d'ailettes qui permettent d'obtenir un coefficient de film important.

e. POUVOIR CALORIFIQUE :

On appelle pouvoir calorifique supérieur (P) la quantité de chaleur exprimée en kilo calorie dégagée par la combustion à pression constante de 760 mm de mercure d'un kg ou d'un (m) de combustion. Les éléments de la combustion ont complètement condensés.

III.2.2 RENDEMENT THERMIQUE DU 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.

Ces pertes sont plus importantes pour un petit four, car le rapport des surfaces des parois de l'enveloppe, par rapport au volume de la chambre de la radiation, diminue lorsque la taille du four augmente.

Les pertes de chaleur les plus importantes sont celles due au rejet à la cheminée de fumées chaudes. Celles-ci sont le résultat de deux facteurs : le débit des fumées et leurs températures.

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 imbrûlés.

Un fonctionnement à excès d'air trop bas peut conduire à des pertes par imbrûlés plus importantes que le gain réalisé par la réduction de l'excès d'air.

Indépendamment de la perte due à la chaleur latente des imbrûlés, 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 imbrûlés.

La température des fumées constitue le facteur principal des pertes de chaleur d'un four. D'ailleurs, pour des fumées froides, l'excès d'air n'a plus d'importance puisque toute la chaleur cédée à l'air a été récupérée sur les fumées. Pour refroidir les fumées, il est nécessaire de disposer d'un fluide froid à réchauffer.

Si le fluide à réchauffer est à une température élevée qui ne permet pas d'obtenir une température basse, c'est-à-dire un rendement thermique satisfaisant, on peut recourir aux solutions suivantes :

1. Rendement d'un four :

Le rendement des fours de l'industrie pétrolière tient une place capitale dans les paramètres de choix et conditionne la consommation de combustible.

2. Bilan thermique :

La notion du rendement d'un four apparaît par le fait que le débit de chaleur libérée aux brûleurs par la combustion n'est pas intégralement transmis au fluide procédé. On constate en effet des pertes thermiques qui ont essentiellement deux origines :

- les pertes par les parois du four (Q_{parois}) sont dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériaux réfractaires. Dans le cas de fours récents de grandes puissances, elles représentent 1 à 2 % de la chaleur libérée aux brûleurs ($Q_{\text{entrée}}$).
- Les pertes par fumées ($Q_{\text{fumées}}$) qui évacuent à l'atmosphère un débit relativement important représentant entre 4 et 20 % de celui qui libéré aux brûleurs.

Le bilan thermique du four s'exprime :

$$Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{absorbée}} + Q_{\text{fumées}} + Q_{\text{parois}} \quad [8]$$

Le diagramme ci-dessous montre les différents flux énergétiques d'un four et permet de mettre en évidence la définition du rendement : Voir Figure III.3

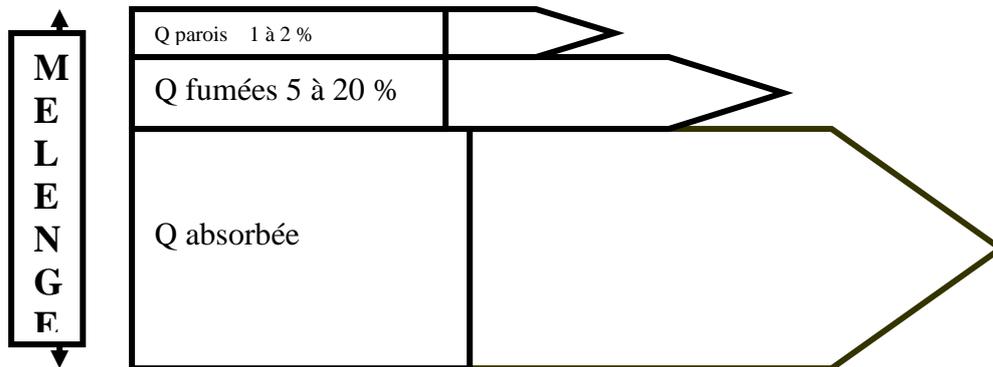


Figure III.3 : Représentation graphique du bilan thermique d'un four

3. Définition du rendement :

Le rendement d'un four (η) est défini comme étant le rapport du débit de chaleur absorbée ($Q_{\text{absorbée}}$) par le fluide procédé au débit de chaleur fourni ($Q_{\text{entrée}}$) au four par combustion :

$$\text{Rendement (\%)} = \eta = (Q_{\text{absorbée}} / Q_{\text{entrée}}) \times 100$$

Le calcul d'un rendement de four nécessite de connaître :

- Q entrée ce qui est possible en mesurant les débits et caractéristiques des combustibles ;
- Q absorbée ce qui est souvent très différent surtout quand il y a vaporisation ou réaction chimique dans le faisceau tubulaire.

En utilisant le bilan thermique du four, le débit de chaleur absorbée peut encore s'exprimer :

$$Q \text{ absorbée} = Q \text{ entrée} - Q \text{ fumées} - Q \text{ parois}$$

L'expression du rendement devient

$$\text{Rendement (\%)} = \eta = [Q \text{ entrée} - Q \text{ fumées} - Q \text{ parois}] / Q \text{ entrée} \times 100 \quad [8]$$

Il reste alors à : estimer Q pertes par les parois car cette valeur est très difficilement mesurable. En général, par expérience ou par le constructeur.

Déterminer Q fumées qui dépendent à la fois du débit de la combustion et surtout de la température des fumées.

La détermination du rendement de four est particulièrement importante car il conditionne la consommation de combustible. Il explique à lui seul une grande partie de l'évolution des fours dont la conception est largement influencée par le prix du combustible.

Cette évolution se caractérise principalement par :

L'installation de dispositifs permettant de mieux refroidir les fumées en convection, réchauffage d'autres fluides, chaudières de récupération, échangeur air-fumées.... etc.

L'amélioration des équipements de chauffe utilisés dans l'industrie pétrolière, brûleur performant, meilleur contrôle de chauffe.

Tout cela conduit à faire des fours pétroliers des équipements plus complexes mais avec le bénéfice d'une économie importante. Les fours modernes avec préchauffeur d'air, ventilateurs de soufflage d'air et extraction des fumées (rendement = 90 %) illustrent cette évolution.

4. Paramètres dont dépend le rendement d'un four :

Le pourcentage de pertes par fumées dépend de deux paramètres :

- L'excès d'air de combustion qui accroît le débit de fumées et diminue le rendement du four. En effet, le débit d'air excédentaire consomme de l'énergie libérée aux brûleurs pour s'échauffer de la température ambiante à celle de rejet des fumées.

La combustion en excès d'air se traduit par la présence d'oxygène dans les fumées en teneur d'autant plus élevée l'excès d'air est grande. Ainsi, le pourcentage de pertes aux fumées dû à l'excès peut être estimé par la relation approchée :

$$\% \text{ de perte aux fumées} = (\text{teneur en O}_2 \text{ des fumées } \%) / 2.$$

- La température de rejet des fumées qui tient d'autant plus élevée que la récupération d'énergie est moins bonne et donc le rendement du four est faible.

Le pourcentage des pertes aux fumées dû à leur température de rejet s'obtient approximativement par :

$$\% \text{ de pertes aux fumées} = (\text{température des fumées } ^\circ \text{C}) / 20 \text{ [8]}$$

Remarque :

Les pertes par les parois quant à elles peuvent être estimées à 2 %.

5. Amélioration du rendement d'un four :

C'est réalisable par :

1) Abaissement de la température des fumées

2) Control d'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 que l'on exprime en pour-cent de la quantité d'air théorique.

Cette notion d'excès d'air est extrêmement importante. En effet, l'air en excès qui 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 plus que ne le ferait un excès d'air légèrement plus élevé permettant une combustion complète. ^[8]

3) Tirage :

Les fours pétroliers, contrairement aux chaudières, sont en dépression dans la chambre de combustion, dépression de l'ordre de quelques millimètres de colonne d'eau.

On distingue de ce fait deux circuits indépendants et complémentaires pour assurer la libération de la chaleur et de l'évacuation des produits de la combustion, sont :

- Le circuit d'amenée de l'air de combustion.
- Le circuit d'évacuation des fumées.

La limite entre ces deux circuits se situe au sommet de la radiation avant les tubes de choc quand ils existent.

4) La réduction de pertes thermiques :

L'amélioration du rendement d'un four repose sur la réduction de pertes thermiques de deux natures ^[8]

- Pertes aux parois
- Pertes aux fumées

4-1) Réduction des pertes aux parois :

Ces pertes peuvent être réduites par l'accroissement de l'isolation thermique. Cependant, leur niveau actuel étant faible (1 à 3 %), l'intérêt économique de cette solution est relativement limité

Réduction des pertes aux fumées :

4-2) Réduction de l'excès d'air :

Cette réduction permet l'économie de combustible utilisé pour réchauffer l'air en excès de la température ambiante à la température des fumées.

- Elle rencontre cependant comme limite l'apparition d'imbrûlés dans les fumées auxquels correspondent :
- une perte de chaleur de combustion ;
- Un encrassement de la zone de convection des imbrûlés présentant un danger pour le personnel et le matériel.

La réduction de l'excès d'air peut toutefois être obtenue, en utilisant des brûleurs réalisant un bon mélange de l'air et du combustible, en particulier par la turbulence imposée à l'air, celui-ci étant nécessairement admis sous pression et aussi en utilise de l'air chaud préchauffé qui favorise la combustion.

Enfin, si la température de rejet des fumées est basse, la recherche de la combustion à bas excès d'air présente un intérêt limité.

- Abaissement de la température des fumées :

C'est le moyen le plus efficace d'amélioration du rendement du four : un abaissement de 20 °C de température aux fumées correspond à un gain de rendement de l'ordre de 1 %.

L'obtention de plus basses (températures aux fumées peut être réalisée par :

- l'extension de la surface de convection sur le fluide process.

Cette solution rencontre comme limite de température de rejet celle d'entrée de fluide à réchauffer. En outre, il convient de ne pas oublier que l'augmentation de quantité de chaleur récupérée n'est pas proportionnelle à l'accroissement de surface d'échange.

- La mise en place d'un service supplémentaire en zone de convection, par exemple une génération de vapeur.

Cette solution ne présente d'intérêt que si le débit de vapeur produite n'est pas trop faible (au moins 4 t/h) et que le besoin de vapeur existe dans l'unité.

5) Le préchauffage de l'air de combustion :

Cette solution présente l'avantage de disposer d'un fluide vraiment froid et utile au procédé de combustion mis en œuvre dans le four lui-même.

Dans le cas où le combustible contient du soufre, l'abaissement de la température de rejet des fumées rencontre comme limite le point de rosée acide à partir duquel apparaissent les problèmes de corrosion sulfurique des surfaces métalliques d'échange.

Cette limite peut être repoussée si la corrosion est consentie ou si l'on a recours à des surfaces résistantes à la corrosion (verre, tôle émaillée).

6. Le choix des fours dépend de des facteurs suivants :

- Nature des produits chauffés et condition de service :
- Drainage des faisceaux tubulaires...
- Présence ou non des catalyseurs dans des tubes
- Combustible
- Encombrement.
- Facilité de construction et transport
- Coût pour application donnée.

III.3 Four d'unité d'affectation:

III.3.1 Description du four 70-F-1 :

Le Four de la section sous vide est le four 70-F-1, il est de type cylindrique vertical avec tubes verticaux dans la zone radiante et horizontaux dans la zone de convection.

Dans la zone de convection se trouve également inséré la surchauffeur pour la vapeur de stripping, les serpentins du four sont au nombre de deux avec soupape de réglage sur chaque serpentins, il existe également la possibilité d'injecter la vapeur de procédé directement dans les serpentins de la zone radiante.

Le four est équipé de quatre brûleurs pour gaz combustible avec pilote correspondant, et des brûleurs spéciaux pour le gaz provenant du ballon 70-V-4, au sommet du four se trouve installée la cheminée avec volet commandé manuellement.

Le four 70-F-1 est muni de thermocouples pour le contrôle des températures dans les zones radiantes et de convection, ainsi que pour les pots de tube, ce four est muni également d'un analyseur permettant de déterminer la quantité d'oxygène contenu dans les fumées au cours de la combustion.

Le four 70-F-1 est équipé d'un système automatique de blocage :

* 1 FSA-1 faible débit de charge.

* 1PSA-5 basse pression de gaz combustible.

*BP-1 bouton poussoir sous le tableau en salle de contrôle, l'intervention indépendante des blocages 1FSA, PSA-5 et BP-1 provoqués.

La fermeture de la XX1VA gaz combustible du four.

L'ouverture de la soupape à trois voies XX-1VB en direction de l'atmosphère "gaz provenant du ballon 70-V-4.

Toutes les causes de blocages peuvent être exclues par commutateur à clefs H-S-1 situé sur le tableau de contrôle, cette opération est signalée par l'allumage d'une lampe d'alarme "rouge" qui se trouve devant le commutateur, et pour le surchauffeur de la vapeur stripping, il n'est prévu aucune protection automatique, et il faut par conséquent contrôler constamment la température de la vapeur de sortie ou n'y parvient en assurant un reflux continu de vapeur au serpentins du surchauffeur.^[9]

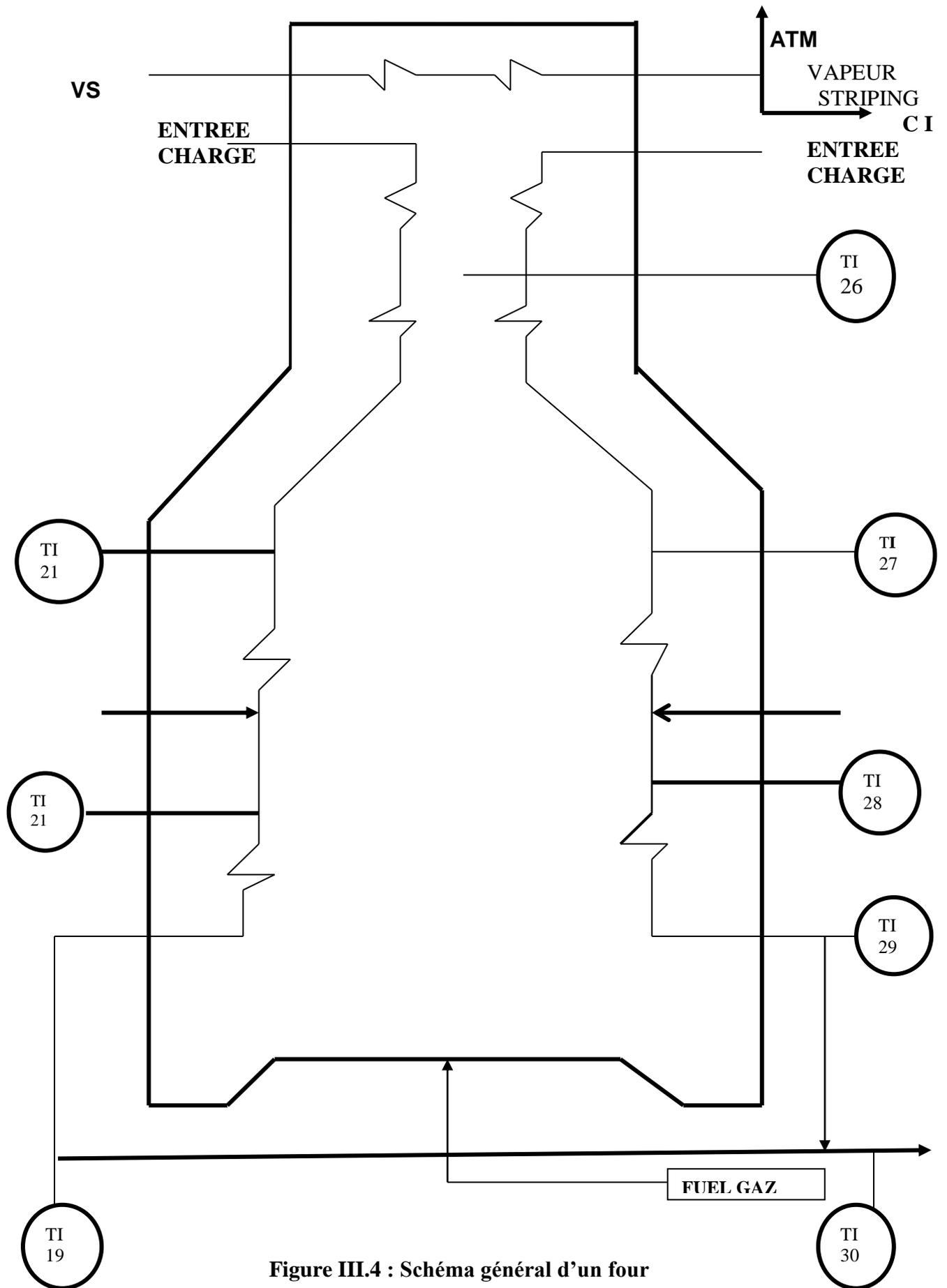


Figure III.4 : Schéma général d'un four

III.3.2 Contrôle de la marche du four 70F1 :

- vérifier rapidement le four 70. F.1 le nombre de brûleurs normaux et spéciaux allumés le comportement de la combustion en générale la situation des fours.
- vérifier que la chambre de combustion est bien sous vide.
- Vérifier le niveau dans le ballon de détente KO et les cas échéants drainer le liquide au Blow dow.
- Contrôler le niveau des accumulateurs du gaz combustible aux brûleurs spéciaux.
- Vérifier constamment la forme des flammes divers brûleurs de manière à ce que celle-ci n'empiètent pas sur les tuyaux des serpentins
- Vérifier constamment la hauteur des flammes de manière à ce qu'elles ne touchent pas la zone convection, pour cela il doit allumer le maximum de brûleurs.
- Diminuer la hauteur de la flamme en obtenant ainsi une meilleure utilisation de la zone radiante du four.
- Vérifier qu'il y a aucun instrument principal ou auxiliaire surchauffés et cela par des inspections.
- Il doit tenir la pression du gaz combustible sous contrôle et vérifier que le traçage par la vapeur soit efficace.
- Il doit par l'intermédiaire des regards, inspecter la chambre de combustion du four, s'il remarque une déformation des tubes des serpentins ou des dégâts en réfractaires du four.
- Vérifier régulièrement les pilotes de tous les brûleurs, un brûleur ne doit jamais être en marche si son pilote n'est pas convenablement allumé.
- Moyennement des analyseurs spéciaux ORSAT, il doit vérifier les fumées le comportement de la chambre de combustion et la quantité d'air en excès et régler celui-ci selon le cas.^[09]

IV.1 Calcul du rendement du four 70 F1

Le four 70F1 fait partie du procédé de fabrication des bitumes, utilisé pour le chauffage du pétrole brut qui provient des échangeurs de préchauffages avant de l'acheminer vers la colonne de distillation.

Le facteur principal susceptible d'influencer le bon fonctionnement d'un four en d'autres termes son rendement, est les pertes thermiques à travers les parois. Généralement les pertes par parois sont évaluées par le constructeur de 2% de la chaleur dégagées par le combustible, est tout ce qu'on peut faire pour minimiser les pertes par parois compte sur les opérations de maintenance et de nettoyages quotidiens (ex : le ramonage...).

Par contre, les pertes de chaleur par les fumées sont très élevées par rapport aux pertes par parois, Celles-ci sont le résultat de deux facteurs : le débit des fumées et leur température. Le débit des 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 imbrûlés plus important que le gain réalisé par la réaction de l'excès d'air.

IV.1.1 Caractéristiques de la charge entrée et sortie du four 70 F1

Le Tableau ci-dessus représente les principales caractéristiques de la charge à l'entrée et sortie du four ^[9]:

Caractéristique	Entrée	sortie
Température	190c°	310 c°
Débit	27000 kg/h	Liq : 18469 kg/h Gaz : 11589 kg /h
Pression	3.62 kg/cm2	0.73 kg /cm2
Pourcentage vaporisé	0	31.6%
Densité	0.91	0.86

Tableau IV.1 : Caractéristiques de la charge entrée et sortie du four

IV.1.2 Composition des fumés issus de la combustion du gaz

Le Tableau représente la composition en pourcentage molaire de fumées issues de la combustion du gaz. ^[8]

Composants	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	N ₂
% Molaire	39	35.70	7.31	10.93	3.87	0.73	0.22	2.24

Tableau IV.2 : Composition des fumés issus de la combustion du gaz

Débit de combustible : $C_{\text{combustibles}} = 472 \text{ m}^3/\text{h}$

Pression de combustible : $p_{\text{Combustibles}} = 0.75 \text{ kg} / \text{cm}^2$.

Poids moléculaire : $P_{\text{moléculaire}} = 17.08 \text{ g} / \text{mol}$

IV.1.3 Réactions de combustion

Suivant le **Tableau**, en prenant compte tous les constituants du gaz naturel y compris l'hydrogène, les réactions qui peuvent avoir lieu sont ^[8]:



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.

IV.1.4 Etude de la combustion :

Le tableau suivant nous donne la quantité de fumées issues de la combustion du gaz ^[9]

Composants	Fraction molaire Y_i	O ₂ pour la combustion neutre	Composition des fumées				Composants
			CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	
H ₂	39	19,5	0	39.00	**	**	H ₂
CH ₄	35,70	71,4	35,70	71.40	**	**	CH ₄
C ₂ H ₆	7,31	25,582	14,62	21.93	**	**	C ₂ H ₆
C ₃ H ₈	10,93	54,65	32,79	43.72	**	**	C ₃ H ₈
C ₄ H ₁₀	3,87	25,15	15,48	19.35	**	**	C ₄ H ₁₀
C ₅ H ₁₂	0,73	5,84	3,65	4.38	**	**	C ₅ H ₁₂
C ₆ H ₁₄	0,22	2,09	1,32	1.54	**	**	C ₆ H ₁₄
N ₂	2,24	**	**	**	**	2,24	N ₂
AIR			**	25.06	20.42	845.04	Air
Total	100	204.21					
			103.56	226.38	20.42	847.28	Total
O ₂ dans l'excès d'air a 20%		20.421					% volume ou pression partielle
O ₂ dans l'air de combustion		224.63	8.65	18.90	1.70	70.75	
N ₂ dans l'air de combustion		845.04					
Air de combustion		1069.67	1197.64				Volume des fumées

Tableau IV.3: la quantité de fumées issues de la combustion du gaz

Calcul de la quantité totale d'azote

L'excès d'air est égal à 20 %.

On admettant que la composition de l'air est de 79% d'azote et 21% d'oxygène

Nombre de mole de N₂ dans l'air de combustion :

$$n_{N_2} = \frac{79 \times 204,21}{21}$$

$$n_{N_2} = 768,22 \text{ mol}$$

Calcul d'excès d'oxygène et d'azote :

$$n_{O_2} \text{ dans l'excès d'air à } 10\% \text{ est : } n_{O_2} = 0,1 \times 204,21 = 20,42 \text{ moles}$$

$$n_{N_2} \text{ dans l'excès d'air à } 10\% \text{ est : } n_{N_2} = 0,1 \times 768,22 = 76,82 \text{ moles}$$

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 :

Masse moléculaire des fumées

$$M_f = \sum M_i y_i = (M_{CO_2} \times Y_{CO_2}) + (M_{H_2O} \times Y_{H_2O}) + (M_{O_2} \times Y_{O_2}) + (M_{N_2} \times Y_{N_2})$$

$$M_f = (44 \times 0,0865) + (18 \times 0,1890) + (32 \times 0,0170) + (28 \times 0,7075)$$

$$M_f = 27,56 \text{ g / mol}$$

Calcul de la masse volumique des fumées

$$\rho_f = M_f / V \text{ molaire}$$

$$\rho_f = 27,62 / 22,4 = 1,23 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_f = 1,22 \text{ kg / m}^3$$

Masse moléculaire de combustible

$$M_{\text{combustible}} = \sum M_i \times Y_i = (M_{H_2} \times Y_{H_2}) + (M_{CH_4} \times Y_{CH_4}) + (M_{C_2H_6} \times Y_{C_2H_6}) + (M_{N_2} \times Y_{N_2})$$

$$M_{\text{combustible}} = (2 \times 0,39) + (16 \times 0,357) + (30 \times 0,0731) + (44 \times 0,1093) \\ + (58 \times 0,0387) + (72 \times 0,0073) + (86 \times 0,0022) + (28 \times 0,0224)$$

$$M_{\text{Combustible}} = 17,08 \text{ g/mol}$$

Masse volumique du mélange combustible :

$$\rho_{\text{Combustible}} = M_{\text{Combustible}} / 22.44$$

$$\rho_{\text{Combustible}} = 17.08 / 22.44 = 0.762$$

$$\rho_f = 0.762 \text{ kg/m}^3$$

Volume des fumées par la combustion de 1 Kg de gaz combustible

100 Nm³ de fuel gaz dégagent un volume de fumées $V_f = 1197,64 \text{ Nm}^3$

Donc 1 Nm³ de gaz dégage un volume de fumées $V_f = 11,9764 \text{ Nm}^3$

Pour 1kg de fuel gaz la masse des fumées

$$m_f = \frac{\rho_f * V_f * m_{\text{com}}}{\rho_{\text{com}} * V_{\text{com}}} = \frac{1,22 * 11,9764 * 1}{0,762 * 1} = 19,17 \text{ Kg}$$

Débit de l'air sec pour la combustion de 1 kg de combustible :

100 Nm³ de fuel gaz nécessitent 1069.67 Nm³ d'air.

Donc 1Nm³ de gaz combustible nécessite 10.2167 Nm³ d'air.

La masse volumique de l'air = 1,294 kg/Nm³

$$m_{\text{air}} = \frac{\rho_{\text{air}} * V_{\text{air}} * m_{\text{com}}}{\rho_{\text{com}} * V_{\text{com}}} = \frac{1,294 * 10,2167 * 1}{0,762 * 1} = 18,16 \text{ Kg}$$

On peut conclure de ses calculs que 1kg de gaz combustible nécessite une quantité de 18,16 kg d'air et produit une quantité de 19,17 kg de fumées.

Calcul du bilan thermique

Quantité de chaleur absorbée par la charge Q_{abs}

$$Q_{\text{abs}} = GL \times [(h_{310} - h_{190}) + e (H_{310} - h_{310})].$$

h_{190}, h_{310} : Enthalpies de la charge respectivement à l'entrée et sortie du four

GL : débit de la charge

e : taux de vaporisations

$$e = 8531 / 27000 = 31.6 \%$$

$$e = 31.6\%$$

H_{310} : enthalpie de la phase gazeuse sortie du four.

Ces les enthalpies sont obtenues par la courbe :

$$\text{Enthalpie} = F (\text{de densité} + kuop) \quad h_T = f(d_T, T) \quad kuop = 11.8$$

Donc :

$$G_L = 27000 \text{ kg / h}$$

D'après le diagramme enthalpique des coupes pétrolières (Annexe 1) :

$$h_{190} = 102 \text{ kcal / h}, h_{310} = 185 \text{ kcal / kg}, H_{310} = 230 \text{ kcal / h}$$

$$Q_{\text{abs}} = 27000 [(185 - 102) + (0.136 \times (230 - 185))] = 2.24 \times 10^6 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_{\text{abs}} = 2.24 \times 10^6 \text{ kcal / h}$$

Quantité de chaleur réelle absorbée par la charge Q_{reel}

Dans le cas du design le rendement du four est : **80%**

$$Q_{\text{reel}} = Q_{\text{abs}} / \eta = 2.24 \times 10^6 / 0.8$$

$$Q_{\text{reel}} = 2.80 \times 10^6 \text{ kcal / mol}$$

Calcul du débit de combustible Q_{com}

$$Q_{\text{reel}} = \text{PCI} \times Q_{\text{com}}$$

$$\text{Donc : } Q_{\text{com}} = Q_{\text{reel}} / \text{PCI}$$

$$Q_{\text{com}} = 2.80 \times 10^6 / 12062.28 = 231.94 \text{ kg/h}$$

$$Q_{\text{com}} = 231.94 / 0.762 = 304.39 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$Q_{\text{com}} = 304.39 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Calcul du débit des fumées $Q_{\text{fumées}}$

$$Q_{\text{fumées}} = Q_{\text{com}} \times G_F = 231.94 \times 19.16 = 8170.4 \text{ kg/h}$$

$$Q_{\text{fumées}} = 8170.4 \text{ kg/h}$$

Calcul de la quantité de chaleur par brûleur $Q_{\text{brûleur}}$

$$Q_{\text{brûleur}} = Q_{\text{reel}} / 4 = 2.80 \times 10^6 / 4 = 0.7 \times 10^6 \text{ kcal / h}$$

$$Q_{\text{brûleur}} = 0.7 \times 10^6 \text{ kcal / h}$$

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

On a :

$$H_I = C_P \times t$$

La température des fumées est 400C°

$$C_{P \text{ O}_2, \text{N}_2} = 6.8 + 6 \times 10^{-4} \times t \quad \text{kcal / mol}$$

$$C_{P \text{ H}_2\text{O}} = 8.1 + 2.9 \times 10^{-4} \times t \quad \text{k cal/ mol}$$

$$C_{P \text{ CO}_2} = 8.5 + 3.7 \times 10^{-4} \times t \quad \text{kcal / mol}$$

Composition des fumes	C_P K cal/ K mol	H KCAL / K MOL	H_I Kcal / k g	H fumées $H_I \times Y_I$
O ₂	7.04	2816	88	1.49
N ₂	7.04	2861	102.17	72.28
H ₂ O	8.21	4372.50	249.91	47.23
CO ₂	8.64	4605.70	104.67	9.05

Tableau IV.4 : les enthalpies de composition des fumés

$$H_I \cdot Y_I = 130.05$$

Pour 1 KG de fumées

$$H_{\text{fumées}} = \sum H_I \times Y_I$$

$$H_{\text{fumées}} = 130.05 \text{ kcal / kg de fumées}$$

Alors pour la quantité totale des fumées

$$H_{\text{fumées}} = 130.05 \times 19.16 = 2491.17 \text{ kcal}$$

D'où :

$$H_{\text{fumées}} = 2491.17 \text{ kcal / kg de combustible}$$

IV.1.5 Calcul de pouvoir calorifique :

(a)

(b)

Composition	% VOLUMIQUE	PCI K cal / k mol	$a \times b / 97.76$ k cal / k mol
H ₂	39	58200	23218.08
CH ₄	35.7	192500	70297.15
C ₂ H ₆	7.31	342000	25573.03

C3H8	10.93	485100	54236.32
C4H10	3.87	625700	24769.42
C5H12	0.73	782000	5839.40
C6H14	0.22	928000	2088.37
TOTAL	97.76	*****	= 206023.77

Tableau IV.5: Calcul de pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique du mélange est la somme des pouvoirs calorifiques des constituants du combustible :

$$PCI_{com} = \sum PCI_i = 206023.77 \text{ kcal / k mol}$$

$$PCI = 206023.77 / 17.08 \text{ kcal/ kg combustible.}$$

Donc :

$$PCI = 12062.28 \text{ kcal / k mol}$$

IV.1.6 Calcul du rendement du four η :

Le rendement du four est calculé à partir de la relation

$$\eta = 100 - (h_{\text{fumées}} / PCI) \times 100$$

$$\eta = 100 - (2491.75 / 12062.28) \times 100$$

$$\eta = 79.98$$

Si on prend en considération les pertes par conduction des parois qui est évaluée à 3 % de la chaleur libère (donnée par le constructeur), le rendement devient :

$$\eta = 76.98\%$$

Interprétation des résultats

D'après nos résultats, on peut dire que le rendement est acceptable, néanmoins inférieurs au rendement du constructeur (80%). Cette diminution est due principalement à l'encrassement des tubes d'une part et d'autre part à la diminution du coefficient de transfert thermique qui provoque l'augmentation de température des fumées.

Les références

1. www.Wagne.net [01]
2. Archive et documentation administrative raffinerie RA1K Skikda [02]
3. Archive et documentation technique raffinerie RA1K Skikda [03]
4. Principales caractéristiques du bitume routier Auteur(s) : Bernard LOMBARDI, Technique de l'ingénieur, Réf : C904 v1. 2007 [04]
5. Mémoire master intitulé : ETUDE DE LA SPECIFICATION DU BITUME ROUTIER 40/50 ISSU DE LA RAFFINERIE D'ARZEW (RA1Z)», 2017, Bibliothèque de l'université des sciences et de la technologie d'Oran. Code : MM1073 [05]
6. Mémoire master intitulé " Suivi de la production du bitume oxydé 85/25 au sein du complexe RA1/Z», 2017. Bibliothèque de l'université des sciences et de la technologie d'Oran. Code: MM 927. [06]
7. Manuel opératoire / Raffinerie de Skikda / UNITE BUTUMES [07]
8. Whitier tom II, raffinage et génie chimique, partie V étude et calcul du matériel, édition technique. PARIS 1965 [08]
9. Manuel opératoire de four d'unité 70 [09]