



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



N° d'ordre : M2...../GC /2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADIMIQUE

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Thème

**Etude de la performance de four H101 de l'unité 100
au niveau de la Raffinerie d'Arzew**

Présenté par :

- Tlamsi Samah
- Sali Sara

Encadrée par :

Pr. Terkhi Sabria

Soutenu le : 12 /5/ 2025 devant le jury composé de :

Président : Boudjeltia Mohamed Amin MCB

Université de Mostaganem

Examineur : Soltane Khadidja MAA

Université de Mostaganem

Année universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Avant de débiter la présentation de ce projet de fin d'études, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à sa réalisation.

Nous remercions tout d'abord Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la patience et l'opportunité de poursuivre notre parcours universitaire et d'emprunter la voie du savoir.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre estimée encadrante, **Madame Terkhi Sabria**, pour sa confiance, son accompagnement, ses conseils judicieux et ses encouragements constants tout au long de ce travail.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à **Monsieur Khaldi Mohammed Amine**, pour sa disponibilité, son soutien et ses précieux conseils, qui nous ont grandement aidées tout au long de notre formation.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur le directeur de la raffinerie, ainsi qu'au chef de la zone 5, pour leur accueil, leur disponibilité et leurs remarques pertinentes tout au long de notre stage. Nous remercions également chaleureusement l'ensemble de l'équipe de la zone 5 de la raffinerie d'Arzew pour leur coopération et leur soutien.

Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **MCB Boudjeltia Mohamed Amine**, président du jury, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Nous remercions également **Madame Soltane Khadidja**, examinatrice, pour l'attention qu'elle a portée à mon mémoire et pour ses remarques constructives qui ont enrichi ce travail.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui nous ont soutenues, encouragées et accompagnées tout au long de ce parcours.

DEDICAS

Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu pour le succès que j'ai réussi à remplir ce mémoire,

L'homme de ma vie, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voire réussir que dieu te garde et te protège, à toi mon chère papa Noureddine.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie, mon bonheur, a maman que j'adore.

A mes frères Anes, Younes et Mohamed, et à mes sœurs Amina et Safaa, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A mes chers grands-mères et grands-pères, Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de longue vie.

A mes chers oncles, tantes, cousins, cousines, et à toute ma famille Tlamsi vous avez de près ou de loin contribué à ma formation.

A mon binôme Sara et à tous mes chers amis, Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées.

Samah

DEDICAS

Je remercie Dieu, le Tout-Puissant, pour sa grâce infinie, sa protection et la force qu'il m'a donnée pour mener à bien ce travail.

À mes parents bien-aimés,

Merci pour votre amour, vos sacrifices et votre soutien indéfectible. Ce mémoire vous est dédié, en témoignage de mon infinie gratitude.

À ma sœur Amani Salsabil, et à mes frères Hamou et Mohamed Islam,

Merci pour votre affection, votre soutien et votre présence constante à mes côtés.

À mes chères grands-mères,

Vos prières et votre tendresse ont été pour moi une source de force. Que Dieu vous accorde santé et longévité.

À mon fiancé,

Merci d'avoir cru en moi, de m'avoir soutenue avec patience et bienveillance tout au long de ce parcours.

À toute ma famille, Sali et Djenni,

Merci pour votre chaleur, vos encouragements et votre présence réconfortante.

À mon binôme et amie Samah, ainsi qu'à mon amie Ikram,

Merci pour votre amitié sincère, votre soutien et les beaux moments partagés.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Que chacun trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

SARA

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la collaboration entre le département de génie des procédés de l'université de Mostaganem et la raffinerie d'Arzew (RA1Z). L'objectif de ce travail est d'évaluer la performance thermique du four H101 de l'unité 100 dans trois situations : en condition de design, avant et après l'opération de retubage. Les résultats obtenus montrent une amélioration significative du rendement après le remplacement des serpentins, passant de 65,65 % avant le retubage à 72,80 % après, tandis que le rendement optimal en condition de design est estimé à 80,63 %. Cette amélioration est principalement due à la réduction des dépôts de coke et à une meilleure transmission de chaleur. Afin d'optimiser davantage la performance du four, des recommandations ont été formulées, notamment le contrôle régulier de la composition du fuel gaz, le renforcement de l'isolation réfractaire et le nettoyage périodique des brûleurs.

This thesis is part of the collaboration between the Process Engineering Department of the University of Mostaganem and the Arzew refinery (RA1Z). The objective of this work is to evaluate the thermal performance of furnace H101 in Unit 100 under three conditions: design specification, before, and after retubing. The results clearly show a significant improvement in efficiency after coil replacement, increasing from 65.65% before retubing to 72.80% after, while the optimal design efficiency is estimated at 80.63%. This improvement is mainly attributed to the reduction of coke deposits and enhanced heat transfer. To further optimize the furnace's performance, several recommendations have been made, including regular monitoring of fuel gas composition, reinforcement of refractory insulation, and periodic cleaning of burners.

يأتي هذا البحث في إطار التعاون بين قسم هندسة العمليات بجامعة مستغانم ومصفاة أرزيو (RA1Z) بهدف هذا العمل إلى تقييم الأداء الحراري للفرن H101 في الوحدة 100 في ثلاث حالات: في وضعية التصميم، قبل، وبعد عملية الاستبدال. أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في المردود بعد تغيير الأنابيب، حيث ارتفعت الكفاءة من 65.65% قبل إلى 72.80% بعده، بينما يُقدَّر المردود الأمثل في ظروف التصميم بـ 80.63%. ويرجع هذا التحسن أساساً إلى تقليل تراكم الكوك وتحسين انتقال الحرارة. ومن أجل تحسين أداء الفرن بشكل أكبر، تم اقتراح عدة توصيات، منها المراقبة الدورية لتركيبية غاز الوقود، وتعزيز العزل الحراري (الحراريات)، وتنظيف المحارق بشكل منتظم.

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau I-1. Les capacités annuelles de production des différentes unités..... | 5 |
| Tableau I-2. Les produits de l'unité 100 zone 5..... | 12 |
| Tableau III-1. Conditions de marche du four H101..... | 28 |
| Tableau III-2. Les résultats de calcul de la combustion cas design..... | 30 |
| Tableau III-3. La composition des fumées cas design..... | 31 |
| Tableau III-4. La composition de gaz combustible cas design..... | 32 |
| Tableau III-5. Paramètres de fuel gaz cas design..... | 33 |
| Tableau III-6. Calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz cas design..... | 35 |
| Tableau III-7. Enthalpie des fumées cas design..... | 36 |
| Tableau III-8. Les résultats de calcul de la combustion avant le retubage..... | 38 |
| Tableau III-9. La composition des fumées avant le retubage..... | 39 |
| Tableau III-10. La composition de gaz combustible avant le retubage..... | 40 |
| Tableau III-11. Paramètres fuel gaz avant le retubage..... | 41 |
| Tableau III-12. Calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz avant le retubage..... | 43 |
| Tableau III-13. Enthalpie des fumées avant le retubage..... | 44 |
| Tableau III-14. Les résultats de calcul de la combustion après le retubage..... | 45 |
| Tableau III-15. La composition des fumées après le retubage..... | 46 |
| Tableau III-16. La composition de gaz combustible après le retubage..... | 47 |
| Tableau III-17. Paramètres fuel gaz après le retubage..... | 48 |
| Tableau III-18. Calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz après le retubage..... | 49 |
| Tableau III-19. Enthalpie des fumées après le retubage..... | 51 |
| Tableau III-20. Tableau récapitulatif de bilan thermique et le rendement de four H101 pour les trois cas : cas design ; avant le retubage et après le retubage..... | 52 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure I-1. Situation géographique de Raffinerie d'Arzew..... | 4 |
| Figure I-2. Plan de la Raffinerie d'Arzew..... | 6 |
| Figure I-3. Image réelle de l'unité de distillation sous vide (U100)..... | 10 |
| Figure I-4. Circulation du BRA dans la zone 5..... | 10 |
| Figure I-5. Circuit de préchauffe et chauffe de charge BRA..... | 16 |
| Figure I-6. Colonne de distillation et système de vide..... | 17 |
| Figure I-7. Soutirage de distillats..... | 17 |
| Figure II -1. Four cylindrique vertical..... | 20 |
| Figure II -2. Fours cabines à brûleurs sur les parois..... | 21 |
| Figure II -3. Four cabine à brûleurs sur le sol..... | 21 |
| Figure II.4.a.b- Les tubes de fours H101 avant le changement..... | 23 |
| Figure III-1. Représentation graphique du bilan thermique..... | 25 |
| Figure III-2. Diagramme récapitulatif représentant le calcul de rendement de four..... | 29 |

ABBREVIATIONS

RA1Z : Raffinerie d'Arzew.

CIS : Centre Industriel Sud.

TVR : Teneur en Vapeurs Résiduelles.

HB3 : Huile de Base 3.

HB4 : Huile de Base 4.

BRA : Brut Réduit Atmosphérique.

DAO : De-Asphalted Oil.

SAE: Society of Automotive Engineers.

SAE10: Society of Automotive Engineers 10W oil viscosity rating.

SAE30: Society of Automotive Engineers 30W oil viscosity rating.

SPO : Spindle Oil.

RATM : Résidu Atmosphérique.

RSV : Résidu Sous Vide.

VGO : Vacuum Gas Oil.

SOMMAIRE

| | |
|--|---|
| Remerciement..... | |
| Dédicas..... | |
| Dédicas..... | |
| Liste des tableaux..... | |
| Liste des figures..... | |
| Abréviations..... | |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Présentation de la Raffinerie d'Arzew | |
| I-1. Introduction | 4 |
| I-2. Historique de la raffinerie..... | 4 |
| I-3. Situation géographique..... | 4 |
| I-4. Objectifs de complexe..... | 5 |
| I-5. Capacité de production..... | 5 |
| I-6. Présentation des principales installations de RA1Z..... | 6 |
| I-6-1. Département de production P1 | 6 |
| I-6-1-1. Zone 3 (les utilités) | 6 |
| I-6-1-2. Zone 4 (les carburants) | 7 |
| I-6-1-2. Zone 7 (Les lubrifiants 1) | 7 |
| I-6-1-3. Zone 10..... | 7 |
| I-6-2. Département de production P2..... | 7 |
| I-6-2-1. Zone 19..... | 7 |
| I-6-2- 2. Zone 5 (Les lubrifiants 2) | 8 |
| I-6-3. Département de production P3..... | 8 |
| I-5-3-1. Zone 6..... | 8 |
| I-6-4. Département de production P4..... | 8 |

| | |
|--|----|
| I-6-4-1. Zone 28 | 8 |
| I-6-4-1. Zone 28 / U1800..... | 9 |
| I-6-5. Département de sécurité industrielle..... | 9 |
| I-6-6. Laboratoire de contrôle..... | 9 |
| I-7. Présentation de l'unité 100 | 9 |
| I-7-1.Généralité sur l'unité 100..... | 9 |
| I-7-2. But de l'unité | 11 |
| I-7-3. Capacité de l'unité | 11 |
| I-7-4. Produits de l'unité..... | 12 |
| I-7-5. Principaux circuits de l'unité 100 | 12 |
| I-7-4-1. Préchauffe de la charge | 12 |
| I-7-4-2. Chauffe de la charge | 12 |
| I-7-4-3. Colonne de distillation | 13 |
| I-7-4-4. Système de vide | 14 |
| I-7-4-5. Circuit Gasoil | 14 |
| I-7-4-6. Soutirage et refroidissement des produits | 14 |
| I-7-4-7. Circuit génération de vapeur | 15 |
| I-7-4-8. Circuit d'eau tempérée | 15 |
| I-7-4-9. Autres équipements | 15 |
| I-7-5. Variables opératoires du procédé | 16 |

Chapitre II : Description du four H101

| | |
|-----------------------------------|----|
| II-1. Introduction..... | 20 |
| II-3. Description des fours | 20 |
| II-2.Rôle des fours | 20 |

| | |
|--|----|
| II-3. Principaux types de fours | 20 |
| II-3-1. Fours cylindriques verticaux | 21 |
| II-3-2. Fours cabines à brûleurs sur les parois..... | 21 |
| II-3-3. Fours cabines à brûleurs sur le sol | 22 |
| II-4. Les modes de transfert de chaleur dans un four industriel..... | 23 |
| II-4-1. Le rayonnement (mode dominant)..... | 23 |
| II-4-2. La convection (transfert secondaire important..... | 23 |
| II-4-3. La conduction (transfert à l'intérieur des tubes)..... | 23 |
| II-5. Four H101 de limite de distillation dans la zone 5..... | 23 |
| II-5.1. Le changement de serpentin de four H101..... | 23 |

Chapitre III : Calcul le rendement de four H101 de limite de distillation

| | |
|--|----|
| III-1. Introduction..... | 26 |
| III-2. La méthode de calcul du rendement de four générale | 26 |
| III-2-1. Calcul de la chaleur dégagée par l'air Q1 | 27 |
| III-2-2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée par le combustible | 27 |
| III-2-3. Calcul de débit des fumées $G_{\text{fumées}}$ | 28 |
| III-3. Etude du four H101 | 28 |
| III-4. Etude de la combustion | 29 |
| III-4-1. Réactions des combustions | 29 |
| III-5. Calcul du rendement pour le cas design | 31 |
| III-5-1. Calcul de la quantité total d'oxygène..... | 32 |
| III-5-2. Calcul la quantité totale du gaz inerte..... | 32 |
| III-5-3. Calcul de volume total des fumées | 32 |
| III-5-4-1. Masse moléculaire des fumées | 32 |
| III-5-4-2. Masse volumique des fumées aux conditions normales de T et de P | 33 |

| | |
|---|----|
| III-5-4-3. Masse moléculaire du gaz combustible | 33 |
| III-5-4-4. Masse volumique du gaz combustible aux conditions normales de température et de pression... | 33 |
| III-5-4-5. La quantité de l'air nécessaire pour la combustion de 1 kg de gaz | 34 |
| III-5-5. Calcul les quantités de chaleur et le rendement du four H101 pour le design..... | 34 |
| III-5-5-1. Calcul de la chaleur dégagée par l'air Q_1 | 35 |
| III-5-5-2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée | 35 |
| III-5-5-2-1. Calcul du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz combustible (fuel gaz) | 35 |
| III-5-5-3. Calcul les pertes de chaleur par parois | 36 |
| III-5-5-4. Calcul des pertes de chaleur par fumées | 37 |
| III-5-5-5. Calcul de l'enthalpie des fumées $H_{\text{fumées}}$ | 37 |
| III-5-5-6. Calcul de débit des fumées $G_{\text{fumées}}$ | 37 |
| III-5-5-7. Calcul des pertes totale..... | 38 |
| III-6. Calcul de rendement de four H101 avant le changement de serpentin (retubage) | 39 |
| III-6-1. Calcul de la quantité total d'oxygène..... | 39 |
| III-6-2. Calcul la quantité totale du gaz inerte..... | 40 |
| III-6-3. Calcul de volume total des fumées | 40 |
| III-6-4-1. Masse moléculaire des fumées | 40 |
| III-6-4-2. Masse volumique des fumées aux conditions normales de T et de P | 40 |
| III-6-4-3. Masse moléculaire du gaz combustible | 41 |
| III-6-4-4. Masse volumique du gaz combustible aux conditions normales de température et de pression.... | 41 |
| III-6-4-5. La quantité de l'air nécessaire pour la combustion de 1 kg de gaz | 42 |
| III-6-5. Calcul les quantités de chaleur et rendement du four H101 pour le cas avant le retubage | 42 |
| III-6-5-1. Calcul de la chaleur dégagée par l'air Q_p | 42 |
| III-6-5-2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée..... | 43 |
| III-6-5-2-1. Calcul du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz combustible (fuel gaz) | 43 |
| III-6-5-3. Calcul les pertes de chaleur par parois | 44 |
| III-6-5-4. Calcul des pertes de chaleur par fumées | 44 |
| III-6-5-5. Calcul de l'enthalpie des fumées $H_{\text{fumées}}$ | 45 |

| | |
|--|----|
| III-6-5-6. Calcul de débit des fumées G fumées | 45 |
| III-6-5-7. Calcul des pertes totales..... | 46 |
| III-7. Calcul du rendement du four H101 après le changement de serpentín (retubage) | 46 |
| III-7-1. Calcul de la quantité total d'oxygène..... | 46 |
| III-7-2. Calcul la quantité totale du gaz inerte..... | 47 |
| III-7-3. Calcul de volume total des fumées | 47 |
| III-7-4-1. Masse moléculaire des fumées | 47 |
| III-7-4-2. Masse volumique des fumées aux conditions normales de T et de P | 47 |
| III-7-4-3. Masse moléculaire du gaz combustible | 47 |
| III-7-4-4. Masse volumique du gaz combustible aux conditions normales de température et de pression | 48 |
| III-7-5. Calcul les quantités de chaleur et le rendement du four H101 après le retubage | 48 |
| III-7-5-1. Calcul de la chaleur dégagée par l'air Q_1 | 49 |
| III-7-5-2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée | 49 |
| III-7-5-2-1. Calcul du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz combustible (fuel gaz) | 49 |
| III-7-5-3. Calcul les pertes de chaleur par parois | 51 |
| III-7-5-4. Calcul des pertes de chaleur par fumées | 51 |
| III-7-5-5. Calcul de l'enthalpie des fumées $H_{\text{fumées}}$ | 51 |
| III-7-5-6. Calcul de débit des fumées G fumées | 51 |
| III-7-5-7. Calcul des pertes totales..... | 52 |
| III-8.Récapitulations Les résultats de rendement..... | 53 |
| III-9.Interprétations..... | 53 |
| Conclusion..... | 55 |
| Référence..... | 56 |
| Annexes..... | 57 |

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le pétrole est une ressource énergétique essentielle qui joue un rôle majeur dans l'économie mondiale. En plus de son rôle clé dans la production d'énergie, il permet la fabrication de divers produits tels que les lubrifiants, les bitumes et une large gamme de produits pétrochimiques, incluant les plastiques, les fibres synthétiques, les solvants et les détergents. L'importance du pétrole ne cesse de croître, à la fois en tant que source d'énergie et matière première pour l'industrie chimique.

Les échanges internationaux de pétrole brut et de produits raffinés sont soumis à des réglementations strictes garantissant la qualité, le transport et l'exploitation des produits finis. En ce sens, des spécifications précises sont établies afin d'assurer la conformité des produits aux exigences des consommateurs et des industriels.

L'Algérie, riche en ressources pétrolières, se distingue sur la scène internationale grâce à ses nombreux gisements situés dans le bassin saharien, le plus important étant celui de Hassi-Messaoud. Malgré des réserves considérables, le pétrole brut extrait nécessite un traitement rigoureux pour répondre aux normes du marché. Cependant, le brut expédié depuis le Centre Industriel Sud (CIS) de Hassi-Messaoud ne satisfait pas entièrement les spécifications commerciales, notamment en matière de Teneur en Vapeurs Résiduelles (TVR), malgré la présence d'une colonne de stabilisation.

Le raffinage du pétrole est une étape essentielle pour rendre le pétrole exploitable. Ce processus débute par la distillation, permettant la séparation du pétrole brut en différentes fractions, avant leur transformation en produits plus adaptés aux besoins du marché. En Algérie, le secteur du raffinage est géré par NAFTEC et repose sur quatre principales raffineries :

- **Raffinerie d'Alger** : capacité de traitement de 2,7 millions de tonnes de pétrole brut par an.
- **Raffinerie de Skikda** : la plus grande du pays, avec une capacité de 15 millions de tonnes de pétrole brut par an et 277 000 tonnes de brut réduit importé.
- **Raffinerie de Hassi-Messaoud** : capacité de 1,2 million de tonnes de pétrole brut par an, sous la gestion de la direction de production de Hassi-Messaoud.
- **Raffinerie d'Arzew** : capacité de 2,5 millions de tonnes de pétrole brut par an, ainsi que 279 000 tonnes de brut réduit importé.

La Raffinerie RA1Z contient plusieurs fours à savoir les fours H101, H102, H103. Ces fours industriels ayant pour but l'apport de l'énergie thermique à chauffage direct aux procédés dans lesquels l'énergie produite par la combustion est transmise directement au fluide à réchauffer qui circule dans un serpentin tubulaire ou un faisceau de tubes. Dans la zone 05 de fabrication des huiles de base dont laquelle on

trouve l'unité 100, ce trouve le four H101 qui fait l'objet de notre étude. Ce four est installé après la colonne de distillation atmosphérique a fin de chauffer le résidu BRA de la colonne de distillation, le BRA est envoyé vers la colonne C101, ensuite vers la colonne de sous vide.

Le but de notre étude est de faire le calcul de rendement de four H101 pour le cas design, le cas avant le retubage (avant le changement de serpentin) et le cas après le retubage, afin de connaitre leur état actuel, et tirer des conclusions de son état de fonctionnement, pour lui assurer une durée de vie plus importante et démunie l'utilisation de l'énergie.

Pour mener à bien cette étude, on a procédé de la façon suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de la raffinerie d'Arzew (RA1Z).
- Le deuxième chapitre on présente des généralités sur les fours.
- Le troisième chapitre est dédié à la méthode de calcul détaillé du rendement de four H101 dans les trois cas précédents, suivi par une exposition et une interprétation des résultats. Enfin, ce travail est achevé par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I :
PRÉSENTATION DE LA RAFFINERIE D'ARZEW

I-1 PRÉSENTATION DE LA RAFFINERIE D'ARZEW

I-1. Introduction

La Raffinerie d'Arzew, inaugurée dans les années 70 dans le cadre du premier plan quinquennal, est un site industriel stratégique pour l'Algérie. Elle joue un rôle crucial dans la production de produits pétroliers raffinés et contribue significativement à l'économie nationale, en renforçant l'indépendance énergétique du pays.

Ce chapitre est divisé en deux parties :

- La première partie est consacrée à la présentation du complexe RA1Z.
- La deuxième partie nous décrit l'unité 100 qui est située dans la zone 5 du complexe.

I-2. Historique de la raffinerie

La raffinerie d'Arzew a été construite dans le cadre du premier plan quinquennal [1970- 1973]. La construction du complexe a été réalisée par la société japonaise « JAPAN GAZOLINE COMPANY (JGC) » en collaboration avec l'entreprise Sonatrach. Le démarrage des unités a été à partir du mois d'août 1972 par l'utilité. L'ensemble des unités était en service dès mars 1973.

I-3. Situation géographique

La raffinerie d'Arzew RA1/Z est située dans la zone industrielle d'Arzew sur le plateau d'EL MOHGOUN à deux kilomètres de la ville d'Arzew, à environ 35 km à l'est d'Oran, en Algérie, sur la côte méditerranéenne. Elle se trouve dans la wilaya d'Oran, plus précisément à proximité du port pétrolier d'Arzew, facilitant ainsi l'exportation des hydrocarbures. Ses coordonnées géographiques sont 35.8051° N de latitude et -0.3192° W de longitude. Comme la montre la figure ci-après :



Figure I-1. Situation géographique de Raffinerie d'Arzew.

I-4. Objectifs de complexe

La Raffinerie d'Arzew est le troisième important complexe pétrochimique, elle a été conçue pour répondre aux impératifs suivants :

- Traiter le brut de Hassi Massoud et le brut réduit importé.
- Satisfaire la consommation croissante en carburant du marché national.
- Fabriquer les produits stratégiques à savoir les lubrifiants et les bitumes.
- Créer des industries en aval.
- Exporter les produits excédentaires, pour répondre aux besoins importants de lubrifiant.

I-5. Capacité de production

La raffinerie d'Arzew traite en moyenne :

- 2,5 millions de tonnes par an de pétrole brut Saharien (Hassi Messaoud).
- 280000 tonnes par an de brut réduit importé (BRI) pour la production de bitume.

Les capacités annuelles de production des différentes unités sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I-1. Les capacités annuelles de production des différentes unités.

| | Quantité (tonnes) | Unité |
|-----------------|-------------------|----------------------|
| Propane | 30 000 | Zone 4/Unité13 |
| Butane | 92 000 | Zone 4/Unité13 |
| Kérosène | 400 000 | Zone 4/Unité11 |
| Gas-oil | 530 000 | Zone 4/Unité11 |
| Fuel | 590 000 | Divers unité |
| Essence Normale | 390 000 | Zone 28 |
| Essence Super | 103 000 | Zone 28 |
| Huiles de base | 170 000 | Zone 7/ Zone 5 |
| Huiles finies | 150 000 | Zone 6 et Unité 3000 |
| Graisses | 1950 | Zone 6 et Unité 3000 |
| Bitumes routier | 120 000 | Zone 10/ Unité 14 |
| Bitumes oxyde | 20 000 | Zone 10/Unité 15 |

I-6. Présentation des principales installations de RA1Z

La raffinerie d'Arzew est divisée en plusieurs zones présentées dans la figure I-2

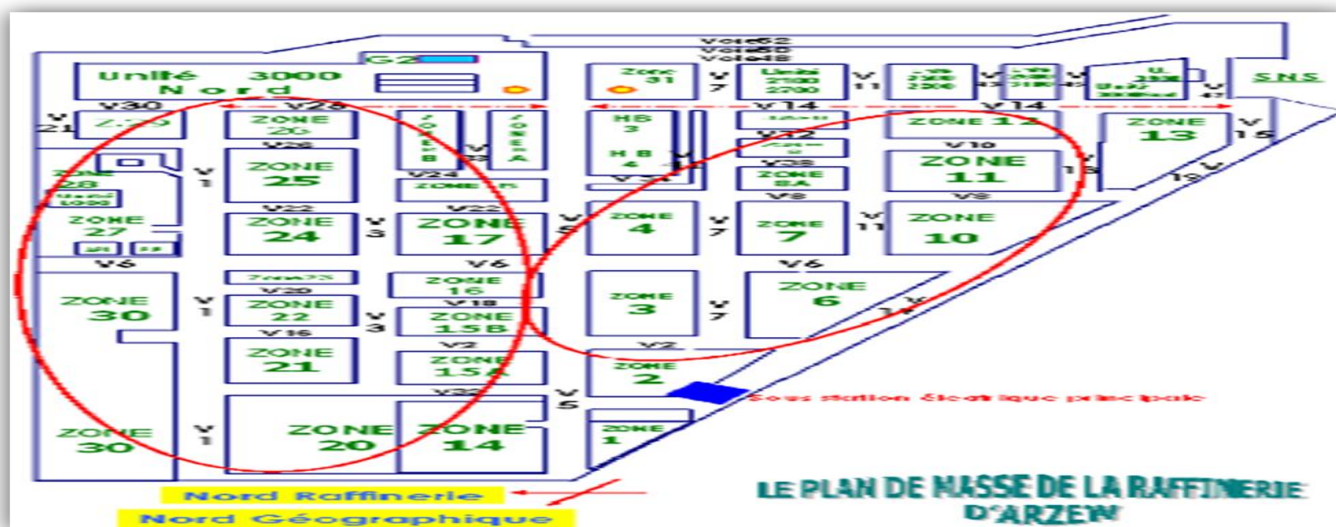


Figure I-2 : plan de la Raffinerie d'Arzew.

La Raffinerie d'Arzew comprend : quatre départements de production, un département de sécurité et le laboratoire de contrôle.

I-6-1. Département de production P1

Ce département concerne la production des carburants, des lubrifiants et les bitumes en traitant le pétrole brut de Hassi-Messaoud comme charge et le BRI (brut réduit importé) pour la production des bitumes. Elle est constituée des zones suivantes :

I-6-1-1. Zone 3 (les utilités) :

Cette zone est construite pour l'alimentation des autres zones en : air, vapeur, eau, électricité, et gaz qui sont très importants pour les unités de traitement. Elle se divise en plusieurs unités :

- **Unité 31** : Production de vapeur d'eau à haute pression, et comme énergie motrice des turbos générateurs.
- **Unité 32** : Production de l'eau distillée qui est utilisée comme eau d'alimentation pour les chaudières
- **Unité 33** : Distributions d'eau de refroidissement, utilisée pour les opérations de refroidissement des produits.
- **Unité 34** : Production d'électricité qui sert à alimenter les unités de traitement.
- **Unité 35** : Gaz de combustion au niveau des chaudières et des fours.

- **Unité 36** : Productions d'air service et d'air instrument.
- **Unité 67** : systèmes du réseau d'eau anti-incendie.
- **Unité 37** : Production gaz inerte.

I-6-1-2. Zone 4 (les carburants)

C'est le point de départ du procédé de raffinage du pétrole brut. Elle comprend six unités. Cette zone comprend les unités suivantes :

- **Unité 11** : distillation atmosphérique
- **Unité 12** : reformage catalytique
- **Unité 13** : traitement du gaz
- **Unité 17** : Hydrotraitement et isomérisation du naphta léger
- **Unité 18** : l'unité du système de l'huile chaude.

I-6-1-2. Zone 7 (Les lubrifiants 1)

C'est la zone de fabrication des huiles de base à partir de brut réduit atmosphérique (BRA) venant du l'unité 11, sa capacité de production est de 50 000 T/an. Elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 20** : stockage des huiles semi fin.
- **Unité 21** : unité de distillation sous vide.
- **Unité 22** : unité de désalphaltage au propane.
- **Unité 23** : unité de l'extraction au furfurool des aromatique.
- **Unité 24** : unité de déparaffinage des huiles au MEC/ /Toluène
- **Unité 25** : Hydrofinishing.

I-6-1-3. Zone 10

Cette zone est composée de deux ensembles :

- **Unité 14** : Bitumes routiers.
- **Unité 15** : Bitumes oxydés.

I-6-2. Département de production P2

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 lancée par NAFTAC. Le démarrage a eu lieu en 1983, cet ensemble comprend les zones suivantes :

I-6-2-1. Zone 19

- **Unité 1100** : Production de la vapeur.

- **Unité 1200** : Production de l'électricité.
- **Unité 1300** : Tour de refroidissement.
- **Unité 1400** : Fuel gaz.
- **Unité 1500** : Unité d'air comprimé.
- **Unité 1600** : Production de l'eau distillée.
- **Unité 1700** : La troche.
- **Unité 1800** : Traitement des eaux usées de P2.
- **Unité 280** : Production de gaz inerte (azote)

I-6-2- 2. Zone 5 (Les lubrifiants 2)

Elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 100** : Distillation sous vide.
- **Unité 200** : Désalphatages au propane.
- **Unité 300** : Extraction des aromatiques.
- **Unité 150** : HOT OIL.
- **Unité 160** : Traitement des eaux acide.
- **Unité 400** : Déparaffinage au MEC-Toluène.
- **Unité 500** : Hydrofinishing.
- **Unité 600** : Hydrotraitement de la paraffine.

I-6-3. Département de production P3

I-5-3-1. Zone 6

Fabrication des huiles finies et graisses.

I-6-3-2. Unité 300 :

- **Unité 3100** : Blending des huiles
- **Unité 3200** : Graisses.
- **Unité 3300** : conditionnement de la paraffine.
- **Unité 3600** : remplissage des huiles en vrac.
- **Unité 3900** : conditionnement des huiles et de graisse.

I-6-4. Département de production P4

I-6-4-1. Zone 28 : Stockage et expédition

Stockage des produits finis comme les carburants, les GPL, ainsi que les additifs chimiques, le brut de Hassi Massoud, puis le mélange du reformat, LSRN, butane pour l'obtention des essences.

I-6-4-1. Zone 28 / U1800 : traitement des effluents

Traitement des rejets de la raffinerie et récupération de sloop.

I-6-5. Département de sécurité industrielle

Ainsi, il existe des mesures d'ordre technique et psychologique pour réduire le nombre des accidents. Il existe aussi une section médicale d'intervention et de prévention. Le département de la sécurité comporte trois services :

- **Service surveillance** : Il est responsable de garantir une surveillance efficace de la raffinerie en contrôlant le matériel entrant et sortant de l'entreprise, ainsi que les déplacements de l'ensemble du personnel.
- **Service prévention** : Il prend en charge la maintenance, l'animation (photos et conseils de sensibilisation sur les lieux de travail), l'hygiène de l'unité, ainsi que l'analyse des statistiques des accidents de travail à l'aide de l'arbre des causes.
- **Service intervention** : Il assure l'entretien des équipements anti-incendie, la formation du GIR, la gestion des produits extincteurs, la maintenance en l'absence de l'inspecteur et l'exécution des plans de sauvetage et d'exercices contre les incendies.

I-6-6. 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 à qualité rigoureuse au niveau du laboratoire.

I-7. Présentation de l'unité 100

I-7-1. Généralité sur l'unité 100

La raffinerie d'Arzew contient deux zones de fabrication des huiles de base ; la zone 07 (Lubrifiants 1), et la zone 05 (lubrifiants 2).

La zone de lubrifiants 2 a une capacité de production de 120 000 T/an, et elle englobe deux

Compartiments :

- **HB3** : composé des unités suivantes :

- Unité 100 : distillation sous vide.
- Unité 200 : désasphaltage au propane.
- Unité 300 : extraction au Furfural.
- Unité 150 : système d'huile chaude.
- Unité 160 : traitement des eaux acides.
 - HB4 : comprend les unités suivantes :
- Unité 400 : déparaffinage au MEC-Toluène.
- Unité 500 : hydro finishing.

Nous détaillons dans ce chapitre les deux unités : 100 de distillation sous vide (figure I-3) et 150 du système huile chaude.



Figure I-3. Image réelle de l'unité de distillation sous vide (U100).

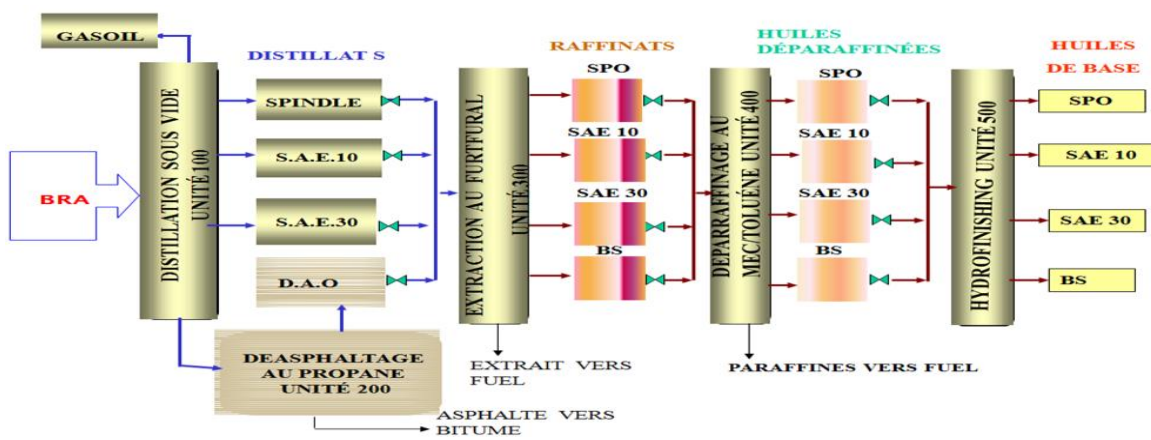


Figure I -4. Circulation du BRA dans la zone 5.

La matière première de l'unité 100 de distillation sous vide est le résidu du pétrole brut après la distillation atmosphérique de l'unité de distillation de brut.

La distillation sous vide a pour but d'extraire de cette matière première des coupes à températures d'ébullition élevées. Ces différentes coupes servent de base à la fabrication d'huile et doivent répondre aux principales caractéristiques suivantes :

- Densité, viscosité : Cette viscosité varie en fonction de la température. On repère cette variation par un chiffre qui est l'indice de viscosité de l'huile
- L'huile doit rester liquide aux plus basses températures d'utilisation.
- L'huile doit rester stable aux températures d'emploi et sa couleur répond à une spécification.

La distillation sous vide constitue la première partie de raffinage des huiles, elle est nécessaire pour éviter la destruction des molécules (cracking) aux hautes températures.

I-7-2. But de l'unité

L'unité de distillation sous vide est destinée à préparer les distillats qui seront transformés en huile de base.

La charge de l'unité est du BRA (Brut Réduit Atmosphérique) venant de la zone 04.

Les coupes recherchées sont :

- Spindle (SPO) ;
- SAE10 ;
- SAE30 ;
- Résidu sous vide (RSV)

En outre, elle produit du gasoil sous vide (VGO)

I-7-3. Capacité de l'unité

La raffinerie d'Arzew traite en moyenne 3,75 millions de tonnes par an de pétrole brut et 280000 de tonnes de brut réduit importé.

I-7-4. Produits de l'unité**Tableau I-2.** Les produits de l'unité 100 zone 5.

| | SPO | SAE10 | SAE30 | RSV | VGO |
|--------------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|
| Débit [T/J] | 108 | 298 | 380 | 447 | 108 |

Cette unité comprend :

- Une colonne de distillation sous vide C101
- Trois strippers permettant de produire simultanément SPO (C102),

SAE10 (C103) et SAE30 (C104).

- Un four (H101).
- Un système de vide (Condenseur, éjecteur), etc.
- Les facilités nécessaires à la préchauffe de la charge et au refroidissement des produits.
- Un système de génération de vapeur BP (D105).
- Une boucle de circulation d'eau tempérée (D108).

I-7-5. Principaux circuits de l'unité 100**I-7-5-1. Préchauffe de la charge**

Le brut réduit provenant du stockage est préchauffé grâce à des échanges de chaleur successifs avec le reflux principal, le résidu sous vide, les distillats, puis de nouveau avec le résidu sous vide.

I-7-5-2. Chauffe des échangeurs de chaleur

La température requise pour la distillation est obtenue dans le four H101 où la charge est partiellement vaporisée.

Le débit est reparti en deux passes à l'entrée du four. De la vapeur est injecté dans les tubes avec la charge dans la zone de radiation de façon à limiter le cokage.

La chaleur de la cheminée du four sert également à surchauffer la vapeur à base pression (BP) utilisée dans l'unité comme vapeur de stripping, se dirigé vers le fond de la colonne.

Le four H101 est équipé d'une régulation automatique qui mesure la température du fluide chauffé à la sortie du four. Cette lecture de température agit directement en cascade sur un régulateur de pression (ou débit) du gaz combustible en amont des brûleurs.

La charge alimentant l'unité de distillation sous vide est surchauffée par le four qui est de type cabine, il comporte :

- **Une zone de radiation** : c'est une zone à l'intérieur dans laquelle les tubes sont directement exposés à la flamme et reçoivent la chaleur des produits de combustion principalement par radiation. Cette zone est la chambre de combustion et elle est consacrée pour le réchauffage de la charge.

- **Une zone de convection** : elle est localisée à la sortie des fumées de la chambre de combustion ; elle est constituée d'un faisceau de tubes placés en quinconce perpendiculairement à la direction des fumées.

I-7-5-3. Colonne de distillation

La colonne de distillation sous vide C101 contient 32 plateaux de fractionnement.

À la sortie du four H101, la charge se présente directement dans la zone de détente (la charge contient environ 10.8T/h de vapeur d'eau).

- ❖ La partie vaporisée de la charge monte dans la colonne depuis la zone de détente et est séparée en gasoil (VGO) et les trois distillats (SPO, SAE10, SAE30).
 - Le gasoil est condensé en tête par le reflux circulant supérieur (plateau 30-32).
 - La condensation des produits de la distillation est assurée par l'injection de la quantité de reflux nécessaire. Le liquide soutiré au plateau 26 par la pompe P 103AB est refroidi par échange avec la charge dans E 101AB puis si besoin dans E 116AR, ainsi le liquide refroidi est retourné vers la colonne où il condense les vapeurs.
- ❖ La phase liquide de la charge se dirige vers le fond dans la colonne, la section d'épuisement fonctionne par stripping à la vapeur surchauffée. le RSV strippé descend vers la partie basse de la colonne. Le but de cette vapeur de stripping est de faire

remonter les fractions légères entraînées vers le fond. La colonne fonctionne sous une pression absolue de 65mmHg en tête de la colonne (PRC 8) le vide étant obtenu par une batterie d'éjecteurs.

I-7-5-4. Système de vide

Le vide est maintenu dans la colonne au moyen du pré-condenseur E114 A/B, de deux groupes d'éjecteurs J101 ABC et J102 ABC et leur condenseur E123 et E124. Les incondensables sont brûlés dans un brûleur spécial du four H101.

L'eau et les condensats s'écoulent vers D101 où aura lieu la séparation par décantation entre l'eau et les hydrocarbures.

I-7-5-5. Circuit Gasoil

Le VGO est condensé par reflux circulant supérieur dans la zone des plateaux 30 et 32.

Le liquide soutiré du plateau 32 coule dans le ballon tampon D113 ou il est repris par la P102A/B avant d'être refroidi dans l'aéroréfrigérant E115 AR.

Une partie du VGO est renvoyé vers la colonne C101 comme reflux circulant supérieur, le reste est renvoyé au stockage sous contrôle de niveau LIC 18 du D113

I-7-5-6. Soutirage et refroidissement des produits

Les trois distillats SPO, SAE10 et SAE30 sont envoyés directement dans les strippers C102, C103 et C104, respectivement ces distillats strippés à la vapeur BP surchauffées (FI 34, 35,36) sont repris par les pompes P104, P106 et P108.

Le refroidissement a lieu en deux ou trois étapes suivant le distillat :

Les distillats SAE10 et SAE30 échange avec la charge dans E102 et E104, puis ils sont utilisés dans E109 et E111 pour générer la vapeur d'eau. Le refroidissement final se fait par l'eau tempérée dans E119 et E121 et atteignent une température de 80°C pour être stockés dans les bacs, la FRC 7 en sortie du SAE30 sous régulation en cascade par LIC13 maintient un niveau constant dans C104.

Le distillat Spindle n'échange pas avec la charge, il est refroidi directement par la génération de la vapeur d'eau dans E107 puis par l'eau tempérée dans E117, la FRC2 à la sortie impose une certaine ouverture à LIC15, l'excès assure le reflux interne.

Le résidu sous vide (RSV) échange de la chaleur avec la charge dans E105A/B et E106A/B. Il est ensuite utilisé pour générer la vapeur dans E112A/B et finalement il passe dans E113AB pour préchauffer l'eau de chaudière du ballon D105.

Le niveau du fond de la tour de distillation est indiqué par un LI11 qui comprend la totalité de la cuvette, et le contrôle se fait par une LIC12 relié à une vanne automatique.

I-7-5-7. Circuit génération de vapeur :

L'eau de chaudière qui alimente le D105 vient des utilités à une température de 105°C, passe à travers l'E113A/B pour être chauffée par le RSV à une température de 150°C.

Le niveau du ballon D105 est régulé par une vanne automatique LIC01, l'eau de chaudière entrant dans le ballon est répartie en six passes. Chaque passe sort du fond D105 vers un échangeur.

La vapeur produite dans chaque échangeur E107, E109, E111 et E112 est récupérée dans le D105. La pression est réglée par la PIC01.

Une ligne située avant la PIC 1 alimente en continu le H101 en vapeur de villosité (FRC86 et FRC87).

I-7-5-8. Circuit d'eau tempérée

L'eau tempérée sert à refroidir les échangeurs des unités de lubrifiants en circulation fermée.

L'eau circule par la pompe P116 est refroidie dans E125 AR, elle alimente en parallèle les échangeurs E117 à E122 où elle se réchauffe par refroidissement des produits distillats.

I-7-5-9. Autres équipements

Les analyseurs :

Un analyseur industriel est un ensemble d'instruments constituant une chaîne de mesure capable de fournir des informations sur les caractéristiques physiques de produits distillés et traités (courbe de distillation, tension de vapeur, densité, point d'éclair...)

Les analyseurs de l'unité 100 sont des enregistreurs de viscosité des produits finis de l'unité, ces analyseurs sont alimentés en permanence. (Ces derniers sont en panne).

I-7-6. Variables opératoires du procédé

La qualité et la quantité des produits (point de flash et la viscosité) sont affectées directement par les variations des paramètres suivants :

- Température de sortie du four ;
- Pression dans la colonne ;
- Débit de soutirage des distillats ;
- Température et débit du reflux (dont dépend beaucoup la sélectivité des différents produits) ;
- Température de tête de colonne ;
- Débit et Température de la vapeur de stripping ;

La circulation à travers l'unité est présentée sur les figures qui montrent la circulation de la totalité des fluides ainsi que le système de contrôle et régulation.

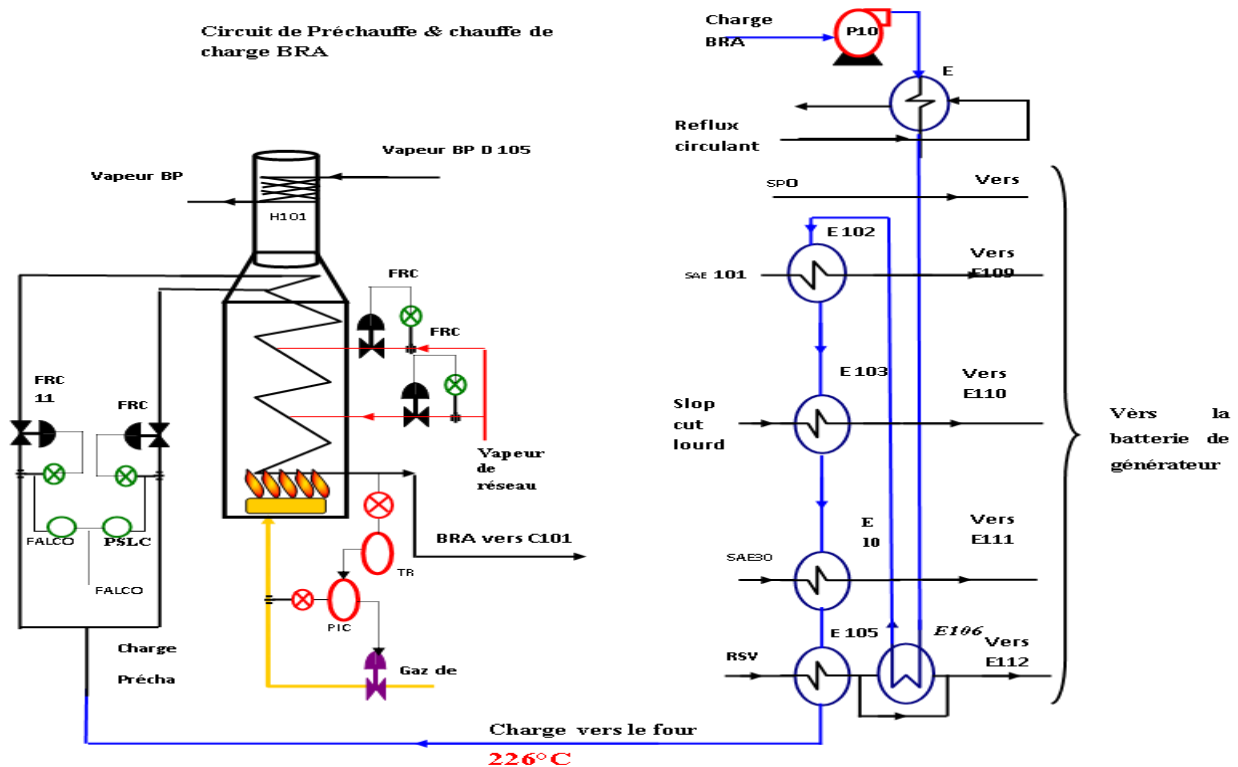


Figure I-5. Circuit de préchauffe et chauffe de charge BRA.

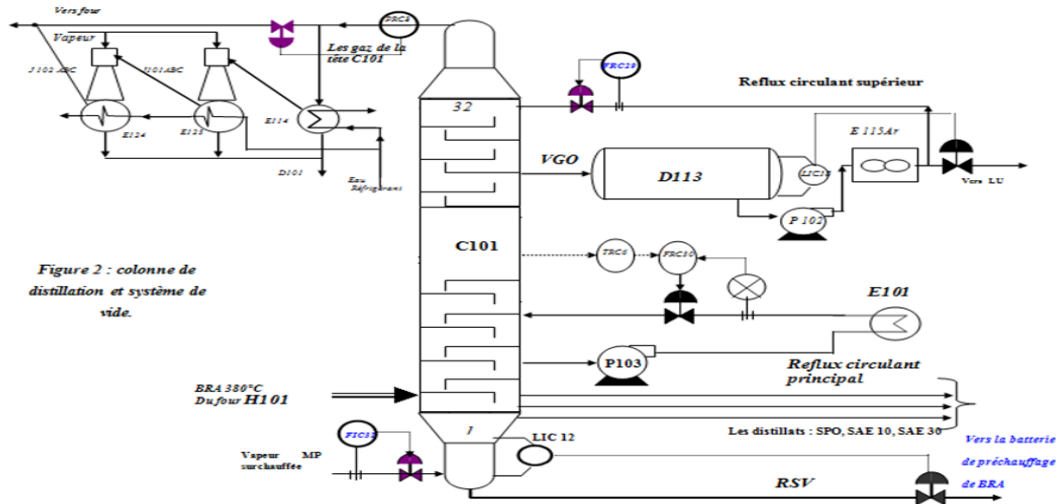


Figure 2 : colonne de distillation et système de vide.

Figure I-6. Colonne de distillation et système de vide.

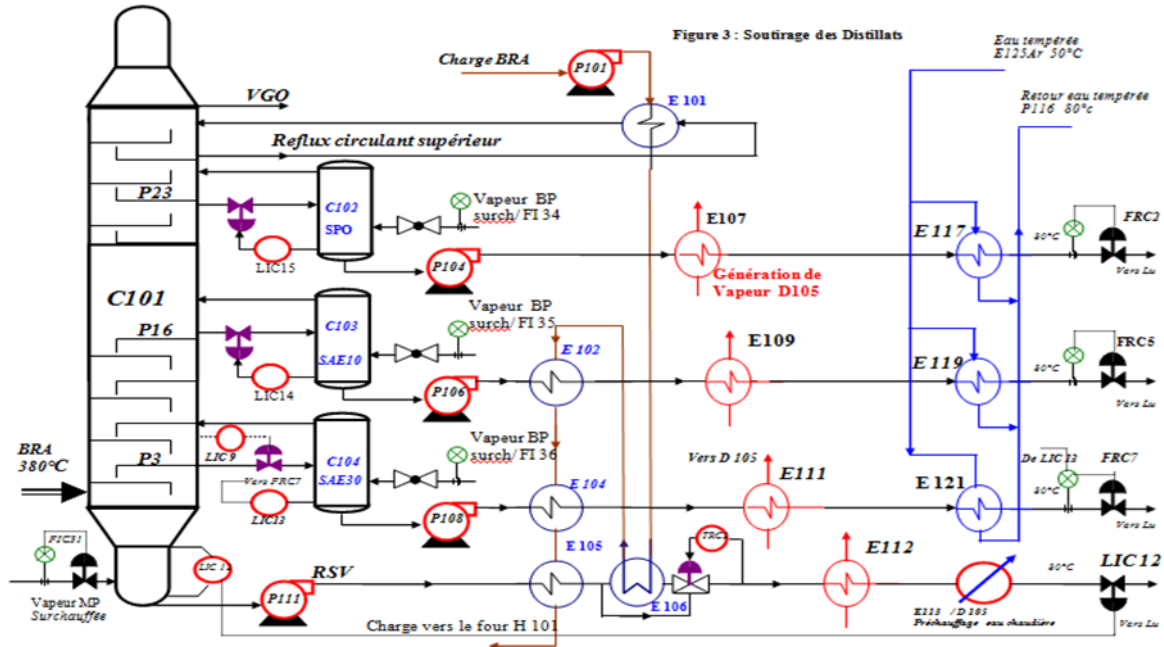


Figure I -7. Soutirage de distillats.

Après avoir présenté une vue d'ensemble de la raffinerie d'Arzew dans le premier chapitre, le deuxième chapitre sera consacré à l'un de ses principaux composants, à savoir le four, en abordant ses caractéristiques générales, ses types et son rôle et le raison de changement de serpentin du four H101.

CHAPITRE II

GENERALITES SUR LE FOUR

II-GENERALITES SUR LE FOUR

II-1.Introduction

Dans l'industrie, les fours sont des équipements thermiques essentiels utilisés pour chauffer des fluides, des gaz ou des solides afin de provoquer des transformations physiques ou chimiques. Ils sont largement employés dans des domaines tels que la pétrochimie, la sidérurgie, le traitement thermique des matériaux et la production d'énergie. Leur rôle principal est d'assurer un transfert de chaleur efficace pour garantir le bon déroulement des procédés industriels.

Les fours industriels fonctionnent généralement par combustion d'un combustible (gaz naturel, fioul, charbon, etc.) ou par apport d'énergie électrique. Le transfert de chaleur s'effectue principalement par conduction, convection et rayonnement, et leur conception varie en fonction des besoins spécifiques du procédé dans lequel ils sont intégrés.

Dans ce chapitre, nous abordons les différents types de fours industriels, leur rôle et leurs spécificités, ainsi que les raisons ayant motivé le changement du serpentin du four.

II-2.Rôle des fours

Dans les unités de raffinage et de pétrochimie, l'énergie thermique nécessaire au procédé est généralement apportée par des fours à chauffage direct. Dans ces appareils, l'énergie générée par la combustion est directement transmise au fluide à réchauffer, qui circule dans un serpentin tubulaire ou un faisceau de tubes. Ce type d'équipement est couramment désigné sous le nom de four tubulaire. Selon l'effet de l'apport thermique sur le fluide, on distingue plusieurs types de fours :

- Les fours de réchauffage sans changement d'état physique : Ces fours, utilisés par exemple dans les unités de reformage catalytique ou d'hydrotraitement de coupes de tête de distillation du pétrole brut, transmettent uniquement de la chaleur sensible, sans provoquer de changement d'état du fluide (liquide ou vapeur).
- Les fours de réchauffage avec vaporisation partielle : On retrouve ce type de four dans les unités de distillation (atmosphérique ou sous vide), où une partie de la charge liquide est vaporisée grâce à l'ajout de chaleur latente.
- Les fours avec réaction chimique : Dans ces fours, le faisceau tubulaire agit également comme un réacteur chimique, en plus de transmettre de la chaleur. Ce type de four est utilisé dans les unités de craquage thermique, où des réactions chimiques se produisent sous l'effet de la chaleur.

II-3. Principaux types de fours

Il existe une grande variété de fours tubulaires qui diffèrent notamment par leur géométrie.

II-3-1. Fours cylindriques verticaux

Les flammes se forment dans la zone de radiation, où les tubes sont chauffés principalement par rayonnement. À l'extrémité supérieure de cette zone, la température des gaz de combustion atteint environ 700 à 800 °C, entraînant une diminution du rayonnement thermique. La chaleur résiduelle des fumées est ensuite récupérée dans la zone de convection, qui fonctionne comme un échangeur tubulaire. Enfin, les fumées refroidies sont évacuées vers l'atmosphère par la cheminée.

La figure II-1 présente une vue écorchée d'un four cylindrique vertical :

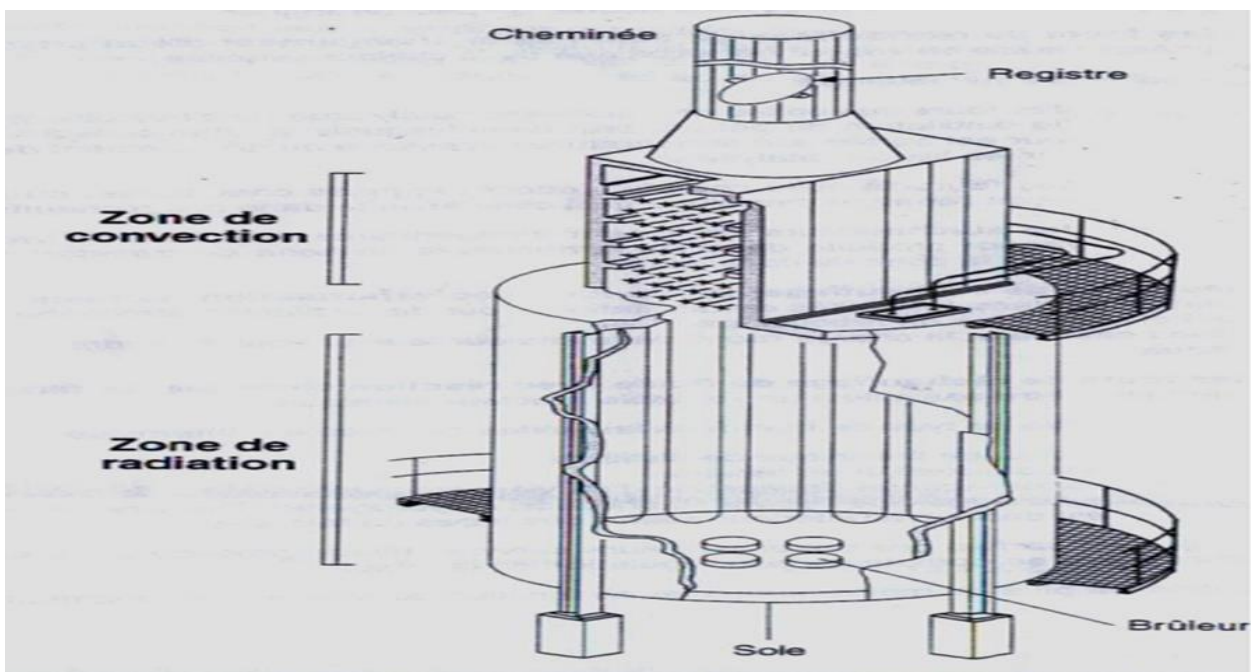


Figure II -1. Four cylindrique vertical.

II-3-2. Fours cabines à brûleurs sur les parois

Certains procédés, comme le vapocraquage, nécessitent un apport de chaleur intense au faisceau tubulaire, à des températures élevées. Pour y parvenir, la chaleur doit être répartie uniformément sur toute la surface de la paroi. Ainsi, le faisceau tubulaire est placé dans le plan médian du four. La zone de convection permet de préchauffer la charge et la vapeur de dilution, et peut également être utilisée pour surchauffer la vapeur produite dans les chaudières de température.

La figure II -2 illustre un four cabine à brûleurs sur les parois :

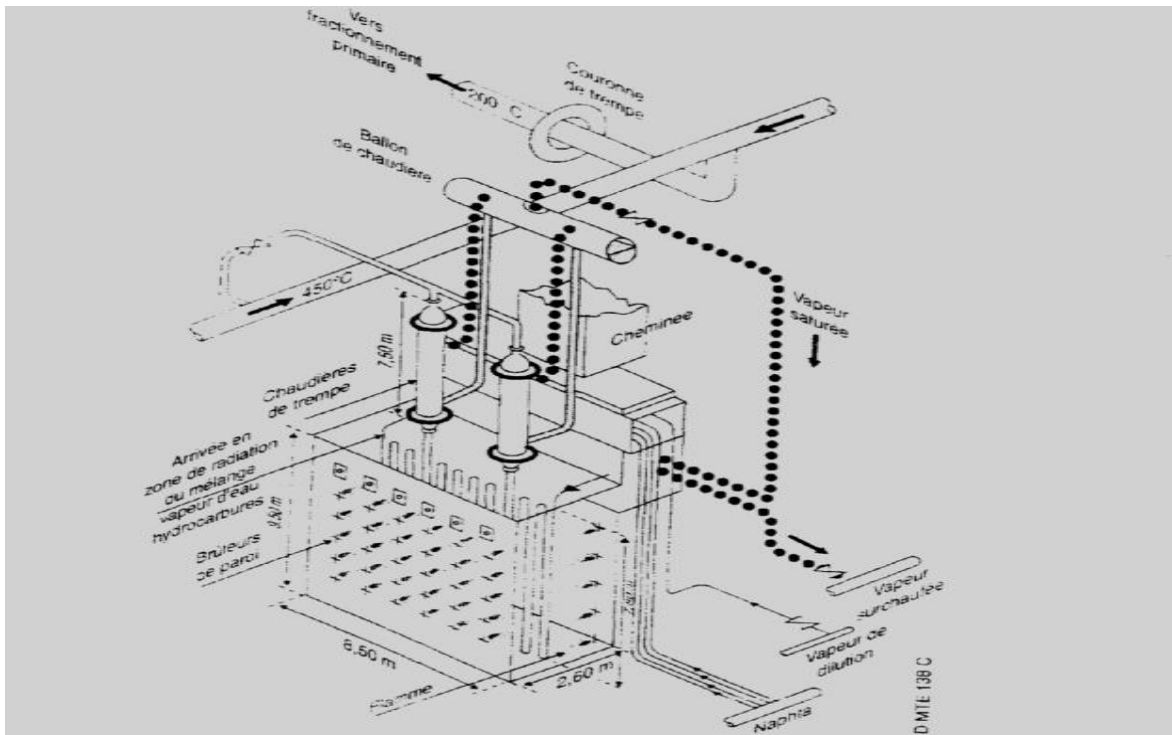


Figure II-2. Four cabine à brûleurs sur les parois

II-3-3. Four cabine à brûleurs sur le sol

Il se différencie principalement du four cylindrique par la présence d'un plan de symétrie, permettant l'installation de nombreux brûleurs sur le sol. Cette disposition crée un rideau de flammes dans le plan médian de la zone de radiation. La figure II-3 ci-dessous illustre un exemple de four cabine équipé de brûleurs sur le sol.

La vue suivante présente un exemple de four cabine à tubes horizontaux.

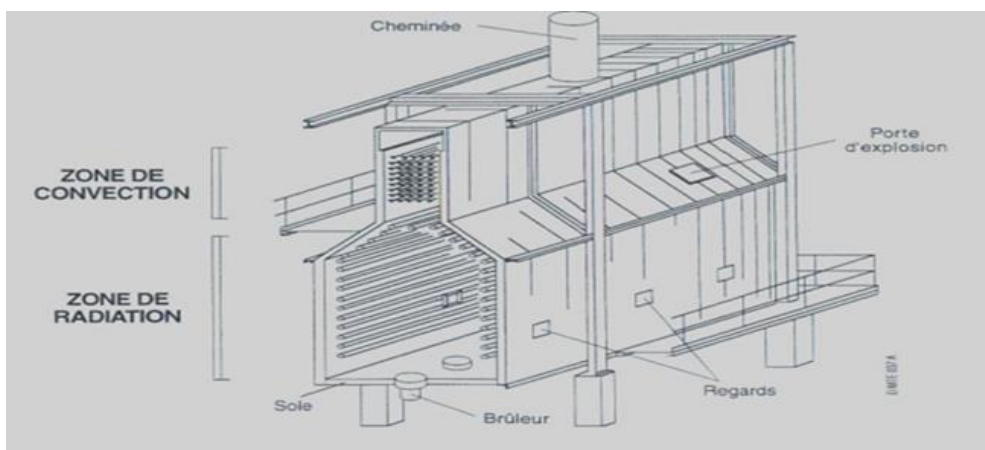


Figure II-3. Four cabine à brûleurs sur le sol.

Dans le domaine industriel, le choix du type de four dépend des exigences du procédé et des performances recherchées. Notre four H101 est un four cabine à brûleurs sur le sol, un modèle couramment utilisé dans les raffineries pour assurer un chauffage uniforme des hydrocarbures. Grâce à sa conception, ce type de four permet une meilleure répartition de la chaleur, une combustion plus efficace et une optimisation de la consommation énergétique. Son fonctionnement repose sur la disposition des brûleurs au niveau du sol, ce qui garantit un meilleur contrôle des flammes et des températures au sein de la chambre de combustion.

II.4-Les modes de transfert de chaleur dans un four industriel

Dans un four industriel, le transfert de chaleur se fait principalement par trois mécanismes : le rayonnement, la convection et la conduction. Ces trois modes interagissent pour assurer un chauffage efficace des hydrocarbures à l'intérieur du serpent.

II.4-1.Le rayonnement (mode dominant)

Le rayonnement thermique est le principal mode de transfert de chaleur dans un four. Les flammes générées par les brûleurs et les parois réfractaires chauffées émettent des ondes infrarouges qui transfèrent l'énergie thermique directement aux tubes du serpent.

II.4-2. La convection (transfert secondaire important)

La convection intervient lorsque les gaz chauds en mouvement transfèrent de la chaleur aux surfaces des tubes du serpent. Elle peut être naturelle (due aux différences de densité des gaz de combustion) ou forcée (si un ventilateur accélère la circulation des gaz).

II.4-3. La conduction (transfert à l'intérieur des tubes)

La conduction thermique intervient principalement dans les parois des tubes du serpent. Elle permet à la chaleur absorbée par rayonnement et convection d'être transmise vers le fluide circulant à l'intérieur.

II-5.Four H101 de limite de distillation dans la zone 5

II.5.1- Le changement de serpent du four H101

Le changement du serpent du four H101 dans la zone 5 de l'unité de distillation du complexe de la raffinerie en mois de septembre 2024 a été nécessaire en raison de la présence de coque à l'intérieur du serpent. L'accumulation de cette couche de dépôt carboné, résultant d'une cokéfaction excessive des hydrocarbures, a entraîné une diminution du transfert thermique et une augmentation de la température de la paroi, risquant d'endommager le matériel et de compromettre la performance du four. Pour remédier à cette situation, l'intervention a consisté à arrêter le four, purger les résidus d'hydrocarbures, puis démonter et remplacer le serpent obstrué par un nouveau.

Les figures II.4.a et b présentées le serpent du four avant le changement :

a-



b-



Figure II.4.a.b- Les tubes de fours H101 avant le changement.

L'efficacité d'un four industriel est principalement évaluée à travers son rendement thermique, qui permet de quantifier la proportion de l'énergie fournie qui est effectivement utilisée pour chauffer le fluide de procédé. Afin d'analyser la performance du four H101, nous avons donc réalisé une étude approfondie de son rendement. Le chapitre suivant sera consacré au calcul de ce rendement.

CHAPITRE III

**CALCUL DU RENDEMENT DE FOUR H 101 DE L'UNITE DE
DISTILLATION SOUS VIDE 100**

III- CALCUL DU RENDEMENT DE FOUR H 101 DE L'UNITE DE DISTILLATION SOUS VIDE 100

III-1. Introduction

Les fours industriels sont caractérisés par un paramètre essentiel appelé rendement, qui détermine leur efficacité.

Dans ce chapitre, on présente d'une façon détaillée une méthode générale de calcul de rendement de four. Après on applique cette méthode pour le calcul de rendement de four H101 de l'unité 100 pour trois cas :

- Design ;
- Avant le changement de serpentin (le retubage) ;
- Après le changement de serpentin (le retubage) ;

Les résultats obtenus sont présentés et interprétés.

III-2. La méthode de calcul du rendement de four générale

Le rendement d'un four 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 la combustion.

$$\eta\% = \frac{\text{Quantité de chaleur absorbé par le fluide}}{\text{Quantité de chaleur fourni par la combustion}} * 100 \quad (1)$$

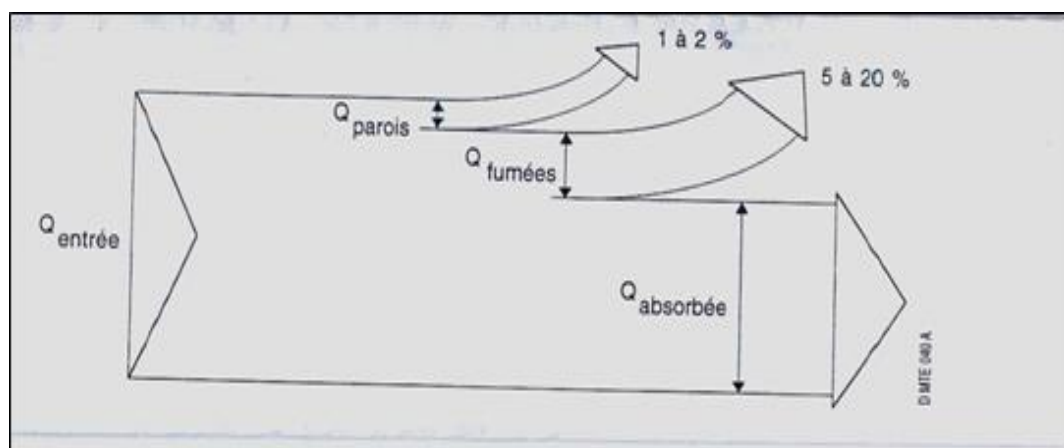


Figure III-1. Représentation graphique du bilan thermique.

A partir de la figure III-1, le bilan thermique du four s'exprime par l'équation (2) :

$$Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{absorbée}} + Q_p + Q_f \quad (2)$$

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

$$Q_{absorbée} = Q_{entrée} - (+Q_{parois} + Q_{fumées}) \quad (3)$$

La formule de calcul de rendement est exprimée donc comme suit :

$$\eta = \left[\frac{Q_e - (Q_p + Q_f)}{Q_e} \right] * 100 \quad (4)$$

➤ **Calcul $Q_{entrée}$:**

$Q_{entrées}$: la quantité de chaleur dégagée.

$$Q_{entrée} = Q_1 + Q_2 \quad (5)$$

III-2-1. Calcul de la chaleur dégagée par l'air Q_1

$$Q_1 = Q_{sen} * G_{com} * \rho_{com} \quad (6)$$

Avec :

Q_{sen} : la chaleur sensible de l'air

G_{com} : débit du fuel gaz.

ρ_{com} : masse volumique de combustible.

➤ **Calcul de la chaleur sensible de l'air :**

$$Q_{sen} = m_{air} * C_{p\ air} * (T_1 - T_0) \quad (7)$$

III-2-2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée par le combustible

$$Q_2 = PCI_{com} * G_{com} \quad (8)$$

Avec PCI_{com} : pouvoir calorifique de fuel gaz.

La composition du gaz combustible est donnée par l'analyse chromatographique.

➤ **Calcul des pertes de chaleur par 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%

$$Q_p = Q_{\text{entrée}} * 0.015 \quad (9)$$

➤ **Calcul des pertes de chaleur par fumées**

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

$$Q_f = G_{\text{fumées}} * H_{\text{fumées}} \quad (10)$$

Avec :

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

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

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

$$H_{\text{fumées}} = C_{p_i} * T \quad (11)$$

Avec :

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

T : température des fumées (°C).

III-2-3. Calcul de débit des fumées $G_{\text{fumées}}$

$$G_{\text{fumées}} = G_{\text{com}} * \rho_{\text{com}} * m_f \quad (12)$$

m_f : masse des fumées.

III-3. Etude du four H101

Le four H101 qui réchauffe le brut réduit atmosphérique (BRA) est de type cabine. Il comprend une zone de radiation et une zone de convection. Il est équipé de neuf (09) brûleurs à air induit. Les conditions de service du four H101 de l'unité de distillation sous vide sont données dans le tableau (III.1).

Tableau III-1. Conditions de marche du four H101.

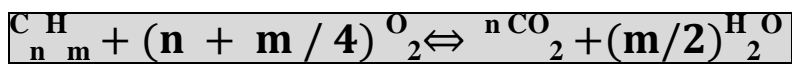
| Caractéristiques | Design | | Avant retubage | | Après retubage | |
|--|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | Zone de radiation | Zone de convection | Zone de radiation | Zone de convection | Zone de radiation | Zone de convection |
| Nombre de passes | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Nombre de tubes | 52 | 24 | 52 | 24 | 52 | 24 |
| Température entrée (°C) | 280 | | 248 | | 250 | |
| Température sortie (°C) | 380 | | 376 | | 376 | |
| Débit de la charge (m ³ /h) | 55 | | 45 | | 55 | |
| Débit de fuel gaz | 884 | | 1000 | | 1000 | |

III-4. Etude de la combustion

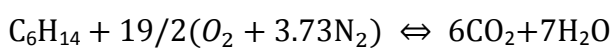
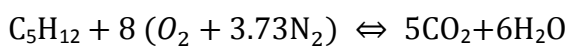
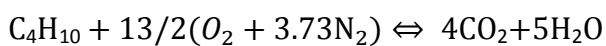
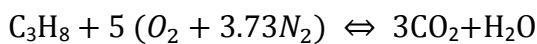
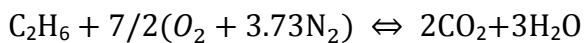
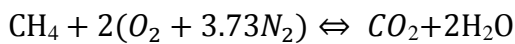
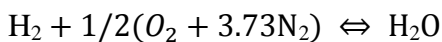
Dans nos calculs, nous avons considéré que la combustion était complète. Pour l'assurer les brûleurs provoquent un mélange intime de l'air et du combustible.

III-4-1. Réactions de combustions

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



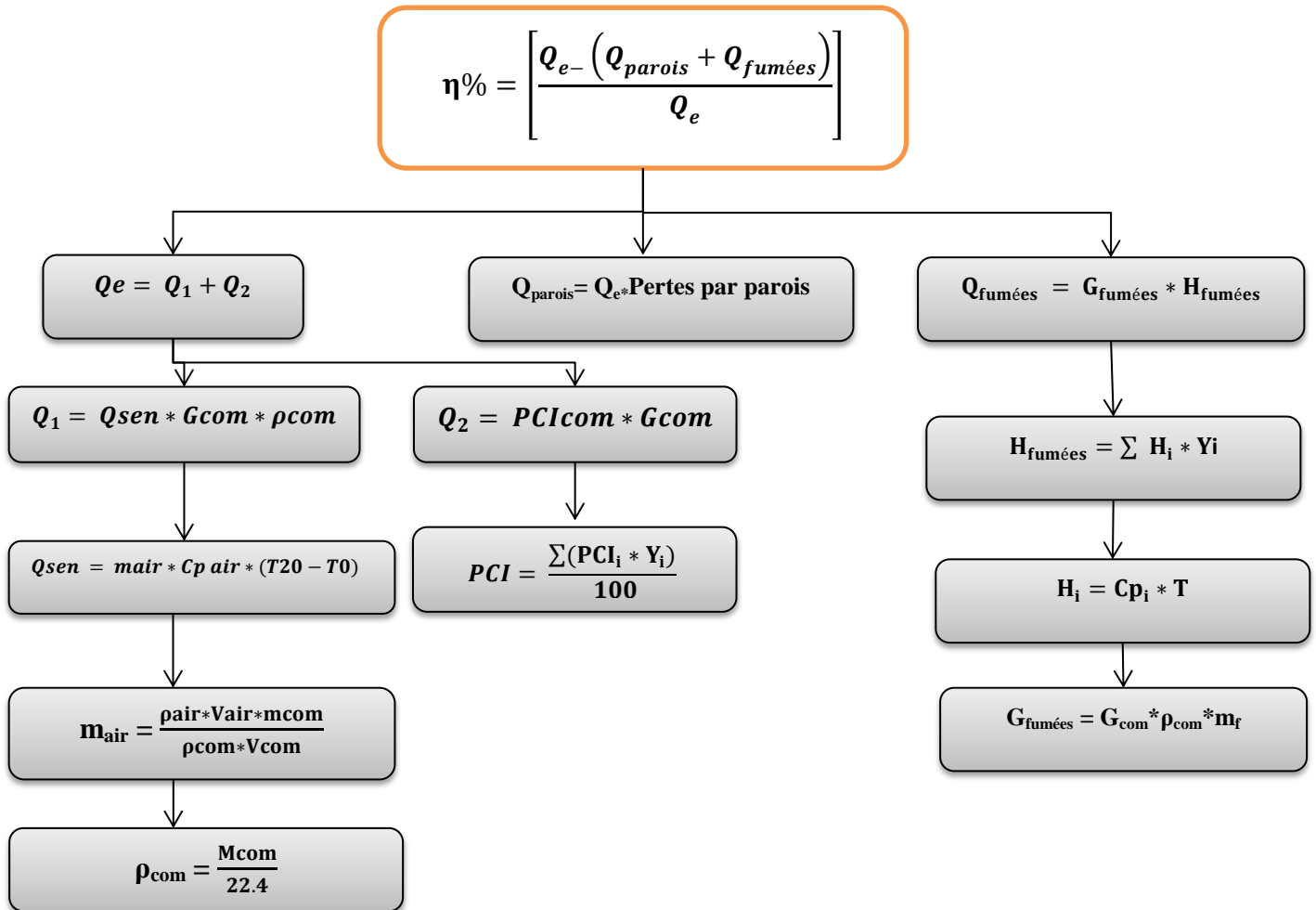
Les réactions de combustions sont écrites comme suit :



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

La figure III-2 représente le diagramme récapitulatif représentant le calcul de rendement de four.

Figure III-2. Diagramme récapitulatif représentant le calcul de rendement de four.



III-5. Calcul du rendement pour design

Les résultats de calcul de la combustion sont portés dans le tableau III-2.

Tableau III-2. Les résultats de calcul de la combustion cas design.

| Constituants du combustible | Pourcentage molaires Y_i | O_2 de la combustion Nm^3 | Composition des fumées | | | | Constituants du combustible |
|--|----------------------------|-------------------------------|------------------------|---------|--------|--------|--|
| | | | CO_2 | N_2 | O_2 | H_2O | |
| H_2 | 1.25 | 0.625 | - | 2.33 | - | 1.25 | H_2 |
| C_1 | 84.29 | 168.58 | 84.29 | 629 | - | 168.58 | C_1 |
| C_2 | 7.6 | 26.6 | 15.2 | 99 | - | 22.8 | C_2 |
| C_3 | 5.97 | 29.85 | 17.91 | 111.4 | - | 23.88 | C_3 |
| iC_4 | 0.29 | 1.885 | 1.16 | 7.03 | - | 1.45 | iC_4 |
| nC_4 | 0.44 | 2.86 | 1.76 | 10.7 | - | 2.20 | nC_4 |
| iC_5 | 0.1 | 0.8 | 0.5 | 3.0 | - | 0.6 | iC_5 |
| nC_5 | 0.06 | 0.48 | 0.3 | 1.8 | - | 0.36 | nC_5 |
| TOTAL | 100 | 231.68 | - | 864.26 | - | - | Air de |
| O_2 dans l'excès d'air | | 57.92 | 121.12 | 1080.21 | 57.92 | 221.12 | TOTAL |
| O_2 dans l'air de combustion | | 274.56 | 08.08% | 72.97% | 03.91% | 14.94% | Pourcentage molaire |
| N_2 dans l'air de combustion | | 1024.11 | | | | | |
| Nombres de Nm^3 d'air de combustion pour 100 Nm^3 de gaz combustible. | | 1369.8 | 1480.36 | | | | Nombre de Nm^3 de fumées pour 100 Nm^3 de gaz combustible |

III-5-1. Calcul de la quantité total d'oxygène

L'excès d'air est égal à 25 % le rapport $N_2/O_2 = 3.73$

$$V(O_2 \text{ total}) = V(O_2 \text{ consommée}) + V(O_2 \text{ dans l'excès d'air}) = 231.68 + 57.92 = 289.6 \text{ Nm}^3$$

III-5-2. Calcul la quantité totale du gaz inerte

Le débit du gaz inerte (N_2) est : $3.73 \times 289.6 = 1080.21 \text{ Nm}^3$

III-5-3. Calcul de volume total des fumées

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

$$V(\text{total des fumées}) = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{(O_2 \text{ en excès})} + V_{(N_2 \text{ total})}$$

$$V(\text{total des fumées}) = 121.12 + 57.92 + 221.12 + 1080.21$$

$$V(\text{total des fumées}) = 1480.36 \text{ Nm}^3$$

III-5-4. Calcul de la quantité des fumées formées par la combustion de 1 kg de gaz

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

III-5-4-1. Masse moléculaire des fumées

$$M_F = \Sigma (M_i * Y_i) = M_{CO_2} * Y_{CO_2} + M_{O_2} * Y_{O_2} + M_{H_2O} * Y_{H_2O} + M_{N_2} * Y_{N_2}$$

Tableau III-3. Tableau de composition des fumées cas design.

| Constituant des fumées | CO2 | N2 | O2 | H2O |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Pourcentage molaire | 08.18 | 72.97 | 03.91 | 14.94 |
| Masse moléculaire | 44 | 28 | 32 | 18 |

$$M_F = 44 * 0.0818 + 32 * 0.0391 + 18 * 0.1494 + 28 * 0.7297$$

$$M_F = 27.97 \text{ kg/kmole.}$$

III-5-4-2. Masse volumique des fumées aux conditions normales de T et de P

$$\rho_f = M_F / (22.4)$$

$$\rho_f = (27.97) / (22.4)$$

$$\rho_f = 1.248 \text{ kg/ Nm}^3.$$

III-5-4-3. Masse moléculaire du gaz combustible

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

$$M_{com} =$$

$$MH_2 * Y_{H_2} + MC_1 * Y_{C_1} + MC_2 * Y_{C_2} + MC_3 * Y_{C_3} + MiC_4 * Y_{iC_4} + MnC_4 * Y_{nC_4} + MiC_5 * Y_{iC_5} + MnC_5 * Y_{nC_5}.$$

Tableau III-4. La composition de gaz combustible.

| Constituant | H ₂ | C ₁ | C ₂ | C ₃ | iC ₄ | nC ₄ | iC ₅ | nC ₅ |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| % Molaire | 1.25 | 84.29 | 7.6 | 5.97 | 0.29 | 0.44 | 0.1 | 0.06 |
| Masse moléculaire (kg/kmol) | 2 | 16 | 30 | 44 | 58 | 58 | 72 | 72 |

$$M_{com} = 2 * 0.0125 + 16 * 0.8429 + 30 * 0.076 + 44 * 0.0597 + 58 * 0.0029 + 58 * 0.0044 + 72 * 0.001 + 72 * 0.0006$$

$$M_{com} = 18.956 \text{ kg/kmol.}$$

III-5-4-4. Masse volumique du gaz combustible aux conditions normales de température et de pression

$$\rho_{com} = M_{com} / (22.4)$$

$$\rho_{com} = (18.956) / 22.4$$

$$\rho_{com} = 0.8462 \text{ kg/Nm}^3.$$

➤ Le volume de fumées

100 Nm³ de fuel gaz dégagent un volume de fumées **V_f = 1480.36 Nm³**

Donc 1 Nm³ de gaz dégage un volume de fumées **V_f = 14.8036 Nm³**

-Pour 1kg de fuel gaz la masse des fumées :

$$m_f = (\rho_f * V_f * m_{com}) / (\rho_{com} * V_{com})$$

$$m_f = (1.248 * 14.8036 * 1) / (0.8462 * 1)$$

$$m_f = 21.83 \text{ kg.}$$

III-5-4-5. La quantité de l'air nécessaire pour la combustion de 1 kg de gaz

100 Nm³ de fuel gaz nécessitent 1369.8Nm³ d'air.

Donc 1Nm³ de gaz combustible nécessite 13.698Nm³ d'air.

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

$$m_{air} = (\rho_{air} * V_{air} * m_{com}) / (\rho_{com} * V_{com})$$

$$m_{air} = (1.294 * 13.698 * 1) / (0.8462 * 1)$$

$$m_{air} = 20.95 \text{ kg.}$$

III-5-5. Calcul les quantités de chaleur et le rendement du four H101 pour le design

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 ($Q_{entrée}$).

$$\eta (\%) = [(Q_e - Q_{fumées} - Q_{parois}) / (Q_e)] * 100$$

- Calcul de la quantité de chaleur dégagée $Q_{entrée}$:

$$Q_e = Q_1 + Q_2$$

Tableau III-5. Paramètres de fuel gaz.

| Fuel gaz | DESIGN |
|----------------------------|--------|
| Température (°C) | 20 |
| Pression (bar) | 3.5 |
| Débits (m ³ /h) | 884 |

III-5-5-1. Calcul de la chaleur dégagée par l'air Q_1

$$Q_1 = Q_{\text{sen}} * G_{\text{com}} * \rho_{\text{com}}$$

Avec :

ρ_{com} : masse volumique de combustible.

➤ **Chaleur sensible de l'air**

$$Q_{\text{sen}} = m_{\text{air}} * C_{p \text{ air}} * (T_{20} - T_0)$$

$$Q_{\text{sen}} = 20.95 * 0.24 * 20$$

$$Q_{\text{sen}} = 100.56 \text{ Kcal/Kg.}$$

Avec $C_{p \text{ air}}$: chaleur spécifique de l'air prise à partir de l'annexe.

$$C_{p \text{ air}} = 0.24 \text{ kcal/kg. } ^\circ\text{c.}$$

➤ **Chaleur dégagée par l'air**

$$Q_1 = 100.56 * 884 * 0.8462$$

$$Q_1 = 75222.98 \text{ kcal/h.}$$

III-5-5-2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée par le combustible

$$Q_2 = PCI_{\text{com}} * G_{\text{com}}$$

III-5-5-2-1. Calcul du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz combustible (fuel gaz)

Puisque les fumées se dégagent à une température supérieure au point de condensation de la vapeur d'eau, les calculs, en particulier celui du rendement du four, se basent uniquement sur le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

$$PCI = \frac{\sum(PCI_i * Y_i)}{100}$$

Avec : PCI_i : Pouvoir calorifique inférieur des différents constituants du gaz combustible.

Y_i : Pourcentage molaire des différents constituants du gaz combustible.

Le Tableau III-6 résume les résultats de calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz.

En utilisant l'annexe A pour compléter la colonne des PCI à 20°C dans le tableau:

Tableau III-6. Calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz.

| Constituant | Yi (%) | ρ_{com} (Kg/m ³) | PCI (kcal/Nm ³) à 20°C | PCI*Yi |
|-----------------|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------|
| H ₂ | 1.25 | 0.089 | 2573.174 | 32.16 |
| C ₁ | 84.29 | 0.714 | 8533.835 | 7193.17 |
| C ₂ | 7.6 | 1.339 | 15295.083 | 1162.43 |
| C ₃ | 5.97 | 1.964 | 21759.970 | 1299.06 |
| iC ₄ | 0.29 | 2.589 | 28224.002 | 81.85 |
| nC ₄ | 0.44 | 2.589 | 28310.001 | 124.56 |
| iC ₅ | 0.1 | 3.214 | 34751.693 | 34.75 |
| nC ₅ | 0.06 | 3.214 | 34840.798 | 20.90 |
| TOTAL | 100 | | | 9948.88 |

Donc le pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz est égal à : 9948.88kcal/Nm³

$$Q_2 = 9948.88 * 884.$$

$$Q_2 = 8794809.92 \text{ Kcal/h.}$$

➤ **La quantité de chaleur totale dégagée**

$$Q_e = Q_1 + Q_2$$

$$Q_e = 75222.98 + 8794809.92$$

$$Q_e = 8870032.9 \text{ kcal/h.}$$

III-5-5-3. Calcul les pertes de chaleur par 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%

$$Q_{parois} = 8870032.9 * 0.015$$

$$Q_{\text{parois}} = 133050.49 \text{ kcal/h.}$$

III-5-5-4. Calcul des pertes de chaleur par fumées

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

$$Q_{\text{fumées}} = G_{\text{fumées}} * H_{\text{fumées}}$$

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

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

III-5-5-5. Calcul de l'enthalpie des fumées $H_{\text{fumées}}$

$$H_i = C_{p_i} * T$$

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

T : température des fumées (°C).

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

La température des fumées dans le cas actuel est égale 335°C.

Tableau III-7. Enthalpie des fumées.

| Composition des fumées | C_p (Kcal/Kg.°C) | Y (%) | H_i (Kcal / k g) | $H_{\text{fumées}} = H_i \times Y_i$ (kcal/kg) |
|------------------------|--------------------|--------|--------------------|--|
| O ₂ | 0.240 | 0.0391 | 80.40 | 2.144 |
| N ₂ | 0.257 | 0.7297 | 86.09 | 62.820 |
| H ₂ O | 0.480 | 0.1494 | 160.80 | 24.023 |
| CO ₂ | 0.2575 | 0.0818 | 86.26 | 7.056 |
| | | | | 97.043 |

III-5-5-6. Calcul de débit des fumées $G_{\text{fumées}}$

$$G_{\text{fumées}} = G_{\text{com}} * \rho_{\text{com}} * m_f$$

$$G_{\text{fumées}} = 884 * 0.8462 * 21.83$$

$$G_{\text{fumées}} = 16329.73 \text{ kg/h.}$$

Donc : $Q_{\text{fumées}} = 16329.73 * 97.043$

: $Q_{\text{fumées}} = 1395819.06 \text{ kcal/h.}$

III-5-5-7. Calcul des pertes totales

$$Q_{\text{pertés totales}} = Q_{\text{parois}} + Q_{\text{fumées}}$$

$$Q_{\text{pertés totales}} = 133050.49 + 1584685.99$$

$$Q_{\text{pertés totales}} = 1717736.48 \text{ kcal/h.}$$

Alors le rendement du four H101 de design

$$\eta_{\text{design}} = (8870032.9 - 1717736.48) / (8870032.9) * 100$$

$$\eta_{\text{design}} = 80.63\%$$

III-6. Calcul du rendement de four H101 avant le changement de serpent (retubage)

Les résultats de calcul de la combustion sont portés dans le tableau.

Tableau III-8. Les résultats de calcul de la combustion avant le retubage.

| Constituants du combustible | Pourcentage molaires Y_i | O_2 de la combustion Nm^3 | Composition des fumées | | | | Constituants du combustible |
|---|----------------------------|-------------------------------|------------------------|---------|--------|--------|--|
| | | | CO_2 | N_2 | O_2 | H_2O | |
| H_2 | 2.97 | 1.487 | - | 5.54 | - | 2.97 | H_2 |
| C_1 | 85.01 | 170.02 | 85.01 | 634.17 | - | 170.02 | C_1 |
| C_2 | 9.08 | 31.78 | 18.16 | 118.54 | - | 27.24 | C_2 |
| C_3 | 2.05 | 10.25 | 6.15 | 38.23 | - | 8.20 | C_3 |
| iC_4 | 0.28 | 1.82 | 1.12 | 2.26 | - | 1.40 | iC_4 |
| nC_4 | 0.44 | 2.86 | 1.76 | 3.56 | - | 2.20 | nC_4 |
| iC_5 | 0.06 | 0.48 | 0.3 | 1.79 | - | 0.36 | iC_5 |
| nC_5 | 0.06 | 0.48 | 0.3 | 1.79 | - | 0.36 | nC_5 |
| iC_6 | 0.05 | 0.47 | 0.3 | 1.77 | | 0.35 | iC_6 |
| TOTAL | 100 | 219.645 | - | 807.65 | - | - | Air de combustion |
| O_2 dans l'excès d'air | | 54.91 | 113.10 | 1024.11 | 54.91 | 213.1 | TOTAL |
| O_2 dans l'air de combustion | | 274.56 | 08.04% | 72.87% | 03.91% | 15.16% | Pourcentage molaire |
| N_2 dans l'air de combustion | | 1024.11 | | | | | |
| Nombres de Nm^3 d'air de combustion pour 100 Nm^3 de gaz combustible | | 1298.67 | 1405.22 | | | | Nombre de Nm^3 de fumées pour 100 Nm^3 de gaz combustible |

III-6-1. Calcul de la quantité total d'oxygène

L'excès d'air est égal à 25 % le rapport $N_2/O_2 = 3.73$

$$V_{(O_2 \text{ total})} = V_{(O_2 \text{ consommée})} + V_{(O_2 \text{ dans l'excès d'air})}$$

$$V_{(O_2 \text{ total})} = 219.645 + 54.91$$

$$V_{(O_2 \text{ total})} = 274.56 \text{ Nm}^3$$

III-6-2. Calcul la quantité totale du gaz inerte

Le débit du gaz inerte (N_2) est : $3.73 \times 274.56 = 1024.11 \text{ Nm}^3$

III-6-3. Calcul de volume total des fumées

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

$$V_{(\text{total des fumées})} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{(O_2 \text{ en excès})} + V_{(N_2 \text{ total})}$$

$$V_{(\text{total des fumées})} = 113.10 + 54.91 + 213.1 + 1024.11$$

$$V_{(\text{total des fumées})} = 1405.22 \text{ Nm}^3$$

III-6-4. Calcul de la quantité des fumées formées par la combustion de 1 kg de gaz

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

III-6-4-1. Masse moléculaire des fumées :

$$M_F = \sum (M_i * Y_i) = M_{CO_2} * Y_{CO_2} + M_{O_2} * Y_{O_2} + M_{H_2O} * Y_{H_2O} + M_{N_2} * Y_{N_2}$$

Tableau III-9. Tableau de composition des fumées avant le retubage.

| Constituant des fumées | CO ₂ | N ₂ | O ₂ | H ₂ O |
|------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
| Pourcentage molaire | 08.04 | 72.87 | 03.91 | 15.16 |
| Masse moléculaire | 44 | 28 | 32 | 18 |

$$M_F = 44 * 0.0804 + 32 * 0.0391 + 18 * 0.1516 + 28 * 0.7287$$

$$M_F = 27.92 \text{ kg/kmole.}$$

III-6-4-2. Masse volumique des fumées aux conditions normales de T et de P

$$\rho_f = M_F / (22.4)$$

$$\rho_f = (27.92) / (22.4)$$

$$\rho_f = 1.246 \text{ kg Nm}^3.$$

III-6-4-3. Masse moléculaire du gaz combustible

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

$$M_{\text{com}} = M_{H_2} * Y_{H_2} + M_{C_1} * Y_{C_1} + M_{C_2} * Y_{C_2} + M_{C_3} * Y_{C_3} + M_{iC_4} * Y_{iC_4} + M_{nC_4} * Y_{nC_4} + M_{iC_5} * Y_{iC_5} + M_{nC_5} * Y_{nC_5} + M_{iC_6} * Y_{iC_6}.$$

Tableau III-10. La composition de gaz combustible.

| Constituant | H2 | C1 | C2 | C3 | iC4 | nC4 | iC5 | nC5 | iC6 |
|-----------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| %Molaire | 2.97 | 85.01 | 9.08 | 2.05 | 0.28 | 0.44 | 0.06 | 0.06 | 0.05 |
| Masse moléculaire (kg/kmol) | 2 | 16 | 30 | 44 | 58 | 58 | 72 | 72 | 86.18 |

$$M_{\text{com}} =$$

$$2 * 0.0297 + 16 * 0.8501 + 30 * 0.0908 + 44 * 0.0205 + 58 * 0.0028 + 58 * 0.0044 + 72 * 0.0006 + 72 * 0.0006 + 86.18 * 0.0005$$

$$M_{\text{com}} = 17.82 \text{ kg/kmol}.$$

III-6-4-4. Masse volumique du gaz combustible aux conditions normales de température et de pression

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

$$\rho_{\text{com}} = (17.82) / 22.4$$

$$\rho_{\text{com}} = 0.795 \text{ kg/Nm}^3$$

➤ Le volume de fumées :

$$100 \text{ Nm}^3 \text{ de fuel gaz dégagent un volume de fumées } V_f = 1405.22 \text{ Nm}^3$$

$$\text{Donc } 1 \text{ Nm}^3 \text{ de gaz dégage un volume de fumées } V_f = 14.0522 \text{ Nm}^3$$

-Pour 1kg de fuel gaz la masse des fumées :

$$m_f = (\rho_f * V_f * m_{\text{com}}) / (\rho_{\text{com}} * V_{\text{com}})$$

$$m_f = (1.246 * 14.0522 * 1) / (0.795 * 1)$$

$$m_f = 22.02 \text{ kg}.$$

III-6-4-5. La quantité de l'air nécessaire pour la combustion de 1 kg de gaz

100 Nm³ de fuel gaz nécessitent 1298.67Nm³ d'air.

Donc 1Nm³ de gaz combustible nécessite 12.9867Nm³ d'air.

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

$$m_{\text{air}} = (\rho_{\text{air}} * V_{\text{air}} * m_{\text{com}}) / (\rho_{\text{com}} * V_{\text{com}})$$

$$m_{\text{air}} = (1.294 * 12.9867 * 1) / (0.795 * 1)$$

$$m_{\text{air}} = \mathbf{21.138 \text{ kg.}}$$

III-6-5. Calcul des quantités de chaleur et le rendement du four H101 pour le cas avant le retubage

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).

$$\eta (\%) = [(Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}) / (Q_{\text{entrée}})] * 100$$

- Calcul de la quantité de chaleur dégagée Q entrée :

$$Q_{\text{entrée}} = Q_1 + Q_2$$

Tableau III-11. Paramètres de fuel gaz.

| Fuel gaz | Avant le changement |
|----------------------------|---------------------|
| Température (°C) | 35 |
| Pression (bar) | 0.860 |
| Débits (m ³ /h) | 847 |

III-6-5-1. Calcul de la chaleur dégagée par l'air Q_1

$$Q_1 = Q_{\text{sen}} * G_{\text{com}} * \rho_{\text{com}}$$

Avec : ρ_{com} : masse volumique de combustible.

- Chaleur sensible de l'air :

$$Q_{\text{sen}} = m_{\text{air}} * C_{p \text{ air}} * (T_{35} - T_0)$$

$$Q_{\text{sen}} = 21.138 * 0.24 * 35$$

$$Q_{\text{sen}} = \mathbf{177.56 \text{ Kcal/Kg.}}$$

Avec $C_{p \text{ air}}$: chaleur spécifique de l'air prise à partir de l'annexe.

$$C_{p \text{ air}} = 0.24 \text{ kcal/kg } ^\circ \text{ c.}$$

➤ Chaleur dégagée par l'air :

$$Q_1 = 177.56 * 847 * 0.795$$

$$Q_1 = 119562.69 \text{ kcal/h.}$$

III-6-5-2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée par le combustible

$$Q_2 = PCI_{\text{com}} * G_{\text{com}}$$

III-6-5-2-1. Calcul du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz combustible (fuel gaz)

Puisque les fumées se dégagent à une température supérieure au point de condensation de la vapeur d'eau, les calculs, en particulier celui du rendement du four, se basent uniquement sur le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

$$PCI = \left[\frac{\sum (PCI_i * Y_i)}{100} \right]$$

Avec :

PCI_i : Pouvoir calorifique inférieur des différents constituants du gaz combustible.

Y_i : Pourcentage molaire des différents constituants du gaz combustible.

Le Tableau III-6 résume les résultats de calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz.

En utilisant l'**annexe A** pour compléter la colonne des PCI à 20°C dans le tableau, puis le convertir à 35°C comme suit :

Tableau III-12. Calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz.

| Constituant | Yi (%) | PCI (kcal/Nm ³) à 20°C | PCI (kcal/Nm ³) à 35°C | PCI*Yi |
|-----------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------|
| H ₂ | 2.97 | 2573.174 | 1470.38 | 43.67 |
| C ₁ | 85.01 | 8533.835 | 4876.476 | 4145.49 |
| C ₂ | 9.08 | 15295.083 | 8740.047 | 793.59 |
| C ₃ | 2.05 | 21759.970 | 12434.27 | 254.90 |
| iC ₄ | 0.28 | 28224.002 | 16128.001 | 451.58 |
| nC ₄ | 0.44 | 28310.001 | 16177.143 | 71.18 |
| iC ₅ | 0.06 | 34751.693 | 19858.11 | 11.91 |
| nC ₅ | 0.06 | 34840.798 | 19909.03 | 11.94 |
| iC ₆ | 0.05 | 41059.182 | 23462.39 | 11.73 |
| TOTAL | 100 | | | 5795.99 |

Donc le pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz est égal à : **5795.99 kcal/Nm³**

$$Q_2 = 5795.99 * 847.$$

$$Q_2 = \mathbf{4909203.53 \text{ Kcal/h.}}$$

➤ **La quantité de chaleur totale dégagée**

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{\text{total}} = 119516.9006 + 4909203.53$$

$$Q_{\text{total}} = \mathbf{5028766.22 \text{ kcal/h.}}$$

III-6-5-3. Calcul les pertes de chaleur par 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%**

$$Q_{\text{parois}} = 5028766.22 * 0.015$$

$$Q_{\text{parois}} = \mathbf{75431.49 \text{ kcal/h.}}$$

III-6-5-4. Calcul des pertes de chaleur par fumées

Les pertes les plus important sont les pertes à la cheminée, dissipé à l'atmosphère par les fumées qui sortant du four à une température assez élevé.

$$Q_{\text{fumées}} = G_{\text{fumées}} * H_{\text{fumées}}$$

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

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

III-6-5-5. Calcul de l'enthalpie des fumées $H_{\text{fumées}}$

$$H_{\text{fumées}} = H_i \times Y_i$$

$$H_i = C_{p_i} * T$$

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 B.

La température des fumées dans le cas avant retubage est égale **380°C**.

Tableau III-13. Enthalpie des fumées.

| Composition des fumes | C_p Kcal/ Kg.°C | Y_i | H_i Kcal / k g | $H_{\text{fumées}}$ $H_i \times Y_i$ (kcal/kg) |
|-----------------------|----------------------|--------|---------------------|---|
| O ₂ | 0.242 | 0.0391 | 91.96 | 3.59 |
| N ₂ | 0.260 | 0.7287 | 98.8 | 71.99 |
| H ₂ O | 0.482 | 0.1516 | 183.16 | 27.77 |
| CO ₂ | 0.264 | 0.0804 | 100.32 | 8.06 |
| | | | | 111.41 |

III-6-5-6. Calcul de débit des fumées $G_{\text{fumées}}$

$$G_{\text{fumées}} = G_{\text{com}} * p_{\text{com}} * m_f$$

$$G_{\text{fumées}} = 847 * 0.795 * 22.02$$

$$G_{\text{fumées}} = 14827.497 \text{ kg/h.}$$

$$\text{Donc : } Q_{\text{fumées}} = 14827.497 * 111.41$$

$$Q_{\text{fumées}} = 1651931.441 \text{ kcal/h.}$$

III-6-5-7. Calcul des pertes totales

$$Q_{\text{pertes total}} = Q_{\text{parois}} + Q_{\text{fumées}} = 75431.49 + 1651931.441$$

$$Q_{\text{pertes total}} = 1727362.931 \text{ kcal/h.}$$

Alors le rendement du four H101 avant le changement du serpentin (avant le retubage)

$$\eta_{\text{avant le retubage}} = (5028766.22 - 1727362.931) / (5028766.22) * 100$$

$$\eta_{\text{avant le retubage}} = 65.65\%$$

III-7. Calcul du rendement de four H101 après le changement de serpentin (retubage)

Tableau III-14. Les résultats de calcul de la combustion après le retubage.

| Constituants du combustible | Pourcentage molaire Y_i | O_2 de la combustion Nm^3 | Composition des fumées | | | | Constituants du combustible |
|---|---------------------------|-------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--|
| | | | CO_2 | N_2 | O_2 | H_2O | |
| H_2 | 7.45 | 3.725 | - | 13.89 | - | 7.45 | H_2 |
| C_1 | 81.31 | 162.62 | 81.31 | 606.57 | - | 162.62 | C_1 |
| C_2 | 8.6 | 30.1 | 17.2 | 112.27 | - | 25.8 | C_2 |
| C_3 | 1.92 | 9.6 | 5.76 | 35.81 | - | 7.68 | C_3 |
| iC_4 | 0.24 | 1.56 | 0.96 | 1.94 | - | 1.2 | iC_4 |
| nC_4 | 0.35 | 2.27 | 1.4 | 2.83 | - | 1.75 | nC_4 |
| iC_5 | 0.04 | 0.32 | 0.2 | 1.19 | - | 0.24 | iC_5 |
| nC_5 | 0.03 | 0.24 | 0.15 | 0.89 | - | 0.18 | nC_5 |
| iC_6 | 0.06 | 0.57 | 0.36 | 2.13 | - | 0.42 | iC_6 |
| TOTAL | 100 | 211.005 | - | 777.52 | - | - | Air de combustion |
| O_2 dans l'excès d'air | | 23.21 | 107.34 | 873.62 | 23.21 | 207.34 | TOTAL |
| O_2 dans l'air de combustion | | 234.215 | 08.86% | 72.1% | 01.92% | 17.11% | Pourcentage molaire |
| N_2 dans l'air de combustion | | 873.62 | | | | | |
| Nombres de Nm^3 d'air de combustion pour 100 Nm^3 de gaz combustible | | 1107.835 | 1211.51 | | | | Nombre de Nm^3 de fumées pour 100 Nm^3 de gaz combustible |

III-7-1. Calcul de la quantité total d'oxygène

L'excès d'air est égal à 11%, le rapport $N_2/O_2 = 3.73$

$$V(\text{O}_2 \text{ total}) = V(\text{O}_2 \text{ consommée}) + V(\text{O}_2 \text{ dans l'excès d'air})$$

$$V(\text{O}_2 \text{ total}) = 211.005 + 23.21$$

$$V(\text{O}_2 \text{ total}) = 234.215 \text{ Nm}^3$$

III-7-2. Calcul la quantité totale du gaz inerte

$$\text{Le débit du gaz inerte (N}_2\text{) est : } 3.73 \times 234.215 = 873.62 \text{ Nm}^3$$

III-7-3. Calcul de volume total des fumées

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

$$V(\text{total des fumées}) = V \text{ CO}_2 + V \text{ H}_2\text{O} + V(\text{O}_2 \text{ en excès}) + V(\text{N}_2 \text{ total})$$

$$V(\text{total des fumées}) = 1211.51 \text{ Nm}^3$$

III-7-4. 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 :

III-7-4-1. Masse moléculaire des fumées

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

Tableau III-15. La composition des fumées après le retubage.

| Constituant des fumées | CO ₂ | N ₂ | O ₂ | H ₂ O |
|------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
| Pourcentage molaire | 08.86 % | 72.1 % | 1.92 % | 17.11 % |
| Masse moléculaire | 44 | 28 | 32 | 18 |

$$M_F = 44 * 0.0886 + 32 * 0.0192 + 18 * 0.1711 + 28 * 0.721$$

$$M_F = 30.591 \text{ kg/kmole.}$$

III-7-4-2. Masse volumique des fumées aux conditions normales de T et de P

$$\rho_f = M_F / (22.4)$$

$$\rho_f = (30.591) / (22.4)$$

$$\rho_f = 1.365 \text{ kg Nm}^3.$$

III-7-4-3. Masse moléculaire du gaz combustible

$$M_{com} = \sum (M_i \cdot Y_i)$$

$$M_{com} =$$

$$M_{H_2} \cdot Y_{H_2} + M_{C_1} \cdot Y_{C_1} + M_{C_2} \cdot Y_{C_2} + M_{C_3} \cdot Y_{C_3} + M_{iC_4} \cdot Y_{iC_4} + M_{nC_4} \cdot Y_{nC_4} + M_{iC_5} \cdot Y_{iC_5} + M_{nC_5} \cdot Y_{nC_5} + M_{iC_6} \cdot Y_{iC_6}$$

Tableau III-16. La composition de gaz combustible après le retubage.

| Constituant | H2 | C1 | C2 | C3 | iC4 | nC4 | iC5 | nC5 | iC6 |
|-------------------------|------|-------|-----|------|------|------|------|------|-------|
| % Molaire | 7.45 | 81.31 | 8.6 | 1.92 | 0.24 | 0.35 | 0.04 | 0.03 | 0.06 |
| M moléculaire (kg/kmol) | 2 | 16 | 30 | 44 | 58 | 58 | 72 | 72 | 86.18 |

$$M_{com} = 2 \cdot 0.0745 + 16 \cdot 0.8131 + 30 \cdot 0.086 + 44 \cdot 0.0192 + 58 \cdot 0.0024 + 58 \cdot 0.0035 + 72 \cdot 0.0004 + 72 \cdot 0.0003 + 86.18 \cdot 0.0006$$

$$M_{com} = 17.0276 \text{ kg/kmol.}$$

III-7-4-4. Masse volumique du gaz combustible aux conditions normales de température et de pression

$$\rho_{com} = M_{com} / (22.4)$$

$$\rho_{com} = (17.0276) / 22.4$$

$$\rho_{com} = 0.76 \text{ kg/Nm}^3.$$

➤ Le volume de fumées :

$$100 \text{ Nm}^3 \text{ de fuel gaz dégagent un volume de fumées } V_f = 12.1151 \text{ Nm}^3$$

$$\text{Donc } 1 \text{ Nm}^3 \text{ de gaz dégage un volume de fumées } V_f = 12.1151 \text{ Nm}^3$$

Pour 1kg de fuel gaz la masse des fumées :

$$m_f = (\rho_f \cdot V_f \cdot m_{com}) / (\rho_{com} \cdot V_{com})$$

$$m_f = (1.365 \cdot 12.1151 \cdot 1) / (0.76 \cdot 1)$$

$$m_f = 21.76 \text{ kg.}$$

III-7-5. Calcul les quantités de chaleur et le rendement du four H101 après le retubage

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 ($Q_{\text{entrée}}$).

$$\eta (\%) = [(Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}) / (Q_{\text{entrée}})] * 100$$

- Calcul de la quantité de chaleur dégagée $Q_{\text{entrée}}$:

$$Q_{\text{entrée}} = Q_1 + Q_2$$

Tableau III-17. Paramètres fuel gaz.

| Fuel gaz | Après le retubage |
|----------------------------|-------------------|
| Température (°C) | 33 |
| Pression (bar) | 0.763 |
| Débits (m ³ /h) | 958 |

III-7-5-1. Calcul de la chaleur dégagée par l'air Q_1

$$Q_1 = Q_{\text{sen}} * G_{\text{com}} * \rho_{\text{com}}$$

ρ_{com} : masse volumique de combustible.

- Chaleur sensible de l'air

$$Q_{\text{sen}} = m_{\text{air}} * c_{p \text{ air}} * (T_{33} - T_0)$$

$$Q_{\text{sen}} = 18.86 * 0.24 * 33$$

$$Q_{\text{sen}} = 149.3712 \text{ Kcal/Kg.}$$

Avec $C_{p \text{ air}}$: chaleur spécifique de l'air prise à partir de l'annexe.

$$C_{p \text{ air}} = 0.24 \text{ kcal/kg. } ^\circ\text{c.}$$

- Chaleur dégagée par l'air

$$Q_1 = 149.3712 * 958 * 0.76$$

$$Q_1 = 108754.1833 \text{ kcal/h.}$$

III-7-5-2. Calcul de la quantité de chaleur dégagée par le combustible

$$Q_2 = PCI_{\text{com}} * G_{\text{com}}$$

III-7-5-2-1. Calcul du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz combustible (fuel gaz)

Puisque les fumées se dégagent à une température supérieure au point de condensation de la vapeur d'eau, les calculs, en particulier celui du rendement du four, se basent uniquement sur le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

$$PCI = \left[\frac{\sum (PCI_i * Y_i)}{100} \right]$$

Avec :

PCI_i : Pouvoir calorifique inférieur des différents constituants du gaz combustible.

Y_i : Pourcentage molaire des différents constituants du gaz combustible.

Le tableau III-18 résume les résultats de calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz.

En utilisant l'**annexe A** pour compléter la colonne des PCI à 20°C dans le tableau, puis le convertir à 33°C comme suit :

Tableau III-18. Calcul du pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz.

| Constituant | Y _i (%) | PCI (kcal/Nm ³) à 20°C | PCI (kcal/Nm ³) à 33°C | PCI*Y _i |
|-----------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| H ₂ | 7.45 | 2573.174 | 1559.49 | 116.18 |
| C ₁ | 81.31 | 8533.835 | 5172.02 | 4205.37 |
| C ₂ | 8.6 | 15295.083 | 9269.75 | 797.20 |
| C ₃ | 1.92 | 21759.970 | 13187.86 | 253.21 |
| iC ₄ | 0.24 | 28224.002 | 17105.46 | 41.05 |
| nC ₄ | 0.35 | 28310.001 | 17157.58 | 60.05 |
| iC ₅ | 0.04 | 34751.693 | 21061.63 | 8.42 |
| nC ₅ | 0.03 | 34840.798 | 21115.64 | 6.33 |
| iC ₆ | 0.06 | 41059.182 | 24882.35 | 14.93 |
| TOTAL | 100 | | | 5502.74kcal/Nm³ |

Donc le pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz est égal à : **5502.74kcal/Nm³**

$$Q_2 = 5502.74 * 958$$

$$Q_2 = 5271624.92 \text{Kcal/h.}$$

➤ **La quantité de chaleur totale dégagée**

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{\text{total}} = 108754.1833 + 5271624.92$$

$$Q_{\text{total}} = 5380379.103 \text{ kcal/h.}$$

III-7-5-3. Calcul les pertes de chaleur par 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%

$$Q_{\text{parois}} = 5380379.103 * 0.015$$

$$Q_{\text{parois}} = 80705.69 \text{kcal/h.}$$

III-7-5-4. Calcul des pertes de chaleur par fumées

Les pertes les plus important sont les pertes à la cheminée, dissipé à l'atmosphère par les fumées qui sortant du four à une température assez élevé.

$$Q_{\text{fumées}} = G_{\text{fumées}} * H_{\text{fumées}}$$

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

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

III-7-5-5. Calcul de l'enthalpie des fumées $H_{\text{fumées}}$

$$H_i = Cp_i * T$$

Avec Cp_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 B.

La température des fumées dans le cas actuel est égale **310 °C**.

Tableau III-19. Enthalpie des fumées.

| Composition des fumées | C _p Kcal/ Kg. °C | Y _i % | H _i Kcal / kg | H _{fumées} H _i ×Y _i (kcal/kg) |
|------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|---|
| O ₂ | 0.238 | 0.7215 | 73.78 | 53.23 |
| N ₂ | 0.257 | 0.0192 | 79.67 | 1.53 |
| H ₂ O | 0.480 | 0.1711 | 148.8 | 25.46 |
| CO ₂ | 0.257 | 0.0886 | 79.67 | 7.06 |
| | | | | 87.28 |

III-7-5-6. Calcul de débit des fumées G_{fumées}

$$G_{\text{fumées}} = G_{\text{com}} * \rho_{\text{com}} * m_f$$

$$G_{\text{fumées}} = 958 * 0.76 * 21.76$$

$$G_{\text{fumées}} = 15843.02 \text{ kg/h.}$$

$$\text{Donc : } Q_{\text{fumées}} = 15843.02 * 87.28$$

$$Q_{\text{fumées}} = 1382778.786 \text{ kcal/ h.}$$

III-7-5-7. Calcul des pertes totales

$$Q_{\text{pertes total}} = Q_{\text{parois}} + Q_{\text{fumées}} = 80705.69 + 1382778.786$$

$$Q_{\text{pertes total}} = 1463484.476 \text{ kcal/h.}$$

Alors le rendement du four H101 après le changement du serpentín (retubage)

$$\eta_{\text{après le retubage}} = (5380379.103 - 1463484.476) / (5380379.103) * 100$$

$$\eta_{\text{après retubage}} = 72.80\%$$

III-8. Récapitulation les résultats de rendement

Le tableau III-20 représente la récapitulatif de bilan thermique et le rendement de four H101 pour les trois cas.

Tableau III-20. Tableau récapitulatif de bilan thermique et le rendement de four H101 pour le les trois cas : cas design ; avant le retubage et après le retubage).

| | Cas design | Avant le retubage | Après le retubage |
|------------------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| $Q_{\text{entrée}}$ (kcal/h) | 8870032.9 | 4431311.121 | 4828224.619 |
| Q_{parois} (kcal/h) | 133050.49 | 66469.67 | 72423.37 |
| $Q_{\text{fumées}}$ (kcal/h) | 1584685.99 | 1672838.67 | 1439929.07 |
| η (%) | 80.63 | 65.65 | 72.80 |

III-9. Interprétation des résultats

Les résultats présentés dans le tableau 20 mettent en évidence l'impact significatif du retubage sur les performances thermiques du four H101. Le rendement en conditions de design est estimé à 80,63 %, ce qui représente la référence optimale attendue pour ce type d'équipement. Cependant, avant l'opération de retubage, une dégradation de la performance a été constatée, avec un rendement tombé à 65,65 %. Cette baisse est généralement attribuée à l'accumulation de coke à l'intérieur des tubes

Après le changement des serpentins, le rendement a connu une nette amélioration, atteignant 72,80 %. Cette progression traduit une récupération importante de l'efficacité thermique du four grâce à la réduction des pertes et à une meilleure transmission de chaleur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la collaboration entre le département de génie des procédés de l'université de Mostaganem et la raffinerie d'Arzew (RA1Z). Nous avons étudié et calculé le rendement thermique du four H101 de l'unité 100 pour trois situations : en design, avant et après le retubage.

Les résultats obtenus montrent clairement une amélioration significative du rendement après le changement des serpentins. Avant le retubage, le rendement était de 65,65 %, en raison notamment de la formation de coke à l'intérieur des tubes, entraînant une diminution du transfert de chaleur et une perte thermique au niveau de la batterie de chauffe. Après l'opération de retubage, le rendement a été relevé à 72,80 %, traduisant une nette récupération de l'efficacité thermique. Le rendement optimal en condition de design est estimé à 80,63 %.

D'après ces calculs, nous remarquons que le rendement du four avant le retubage est bas par rapport à celui après le retubage ;

- Un transfert de chaleur faible par rapport au cas après le changement du serpentins à l'intérieur des tubes, ce qui est expliqué par la présence d'une couche de coke sur la paroi interne des tubes du four ce qui affaiblit le transfert de chaleur vers le fluide

- Une température plus basse de la charge BRA par rapport au cas après le changement du serpentins à l'entrée du four (248°C au lieu de 250 °C), causé par une perte de chauffe au niveau de la batterie de chauffe.

Afin d'améliorer le rendement thermique du four nous proposons les travaux suivants :

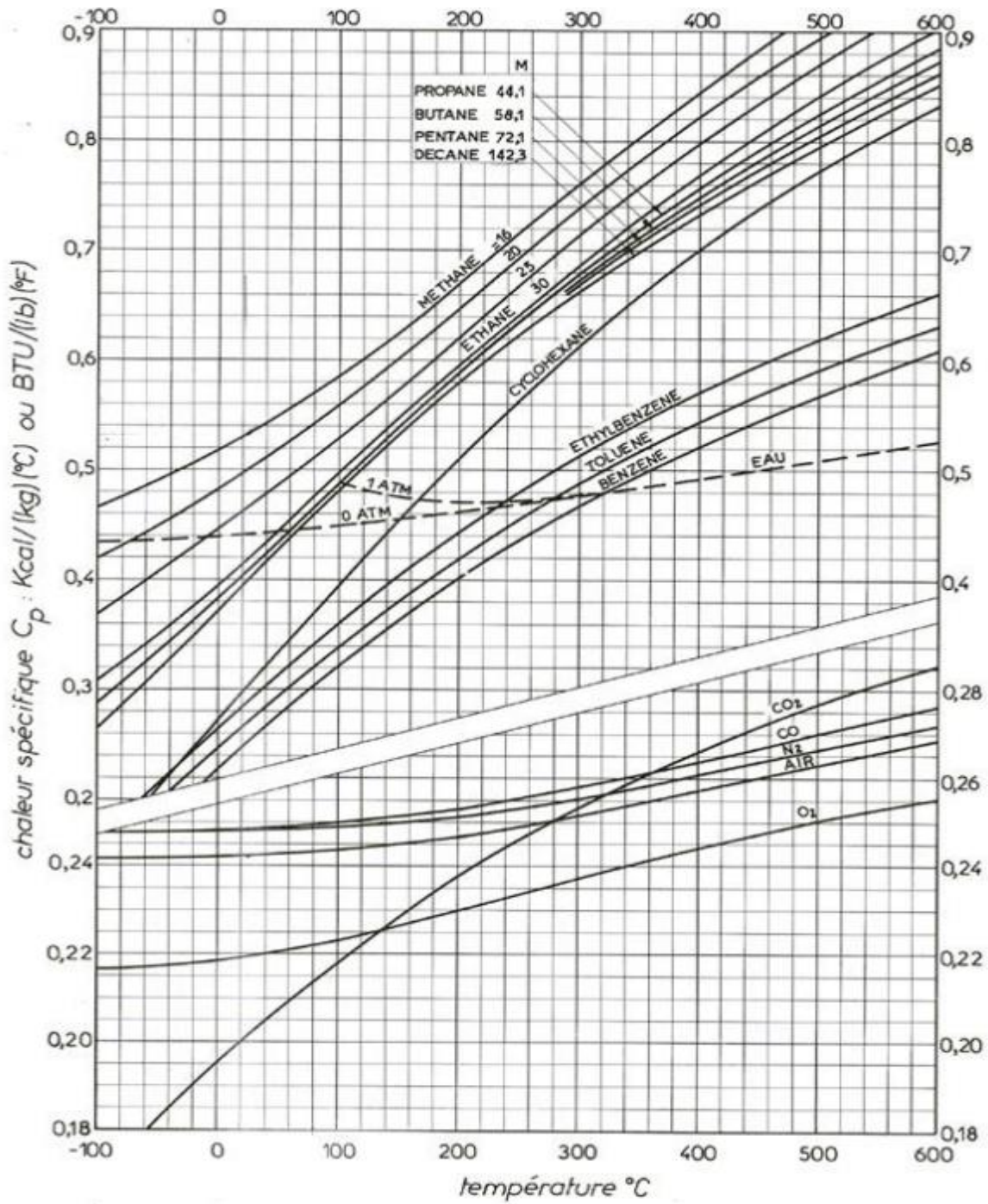
- Le contrôle régulier de la composition du fuel gaz dans le ballon est primordial, dans la mesure où les propriétés du combustible influencent directement la performance énergétique du four.

- Vérifier l'état de l'isolation (réfractaire) et la renforcer si nécessaire pour limiter les pertes de chaleur.

- Nettoyer et calibrer les brûleurs pour assurer une flamme stable et efficace, avec une bonne répartition thermique.

REFERENCES

- [1] Situation du complexe, direction technique, complexe RA1Z, activité aval, Sonatrach, 2001.
- [2] Manuel opératoire de HB3.
- [3] Manuel opératoire de HB4.
- [4] Technique de l'ingénieur « Caractéristiques des produits pétroliers».
- [5] Document interne de la raffinerie d'Arzew.
- [6] Perry, R. H., Green, D. W., Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7^e édition, McGraw-Hill, 1997.
- [7] Analyse chromatographique du fuel gaz au mois de juillet 2024 prévenant département technique, service laboratoire (bulletin d'analyse).
- [8] Étude des fours pétroliers et pétrochimiques - J. Le Nogues - Google Livres.
- [9] P. Wuithier, Le pétrole: raffinage et génie chimique, 2nd ed. Paris: Technip, 1972.
- [10] J.-P. Wauquier, Raffinage du pétrole (Le). Tome 1. Pétrole brut. Produits pétroliers.Schémas de fabrication. Editions TECHNIP, 1998.



Annexe A. Chaleur spécifique des hydrocarbures et fractions pétrolières liquides.

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

