

Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref : .../U.M/F.S. T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم : / ج.م.ك.ع.ت/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie chimique

THÈME

ÉVALUATION COMPARATIVE DU RENDEMENT
THERMIQUE D'UN FOUR INDUSTRIEL EN
FONCTION DES PHASES OPERATIONNELLES

Présenté par
FOULAOUI Rafika

Soutenu le : 25/05/2026 devant le jury composé de :

| | | | |
|------------|-------------------|-------------|--------------------------|
| Présidente | BELHOUARI Houria | M.A.A | Université de Mostaganem |
| Examineur | BENATMANE Saadiya | Professeure | Université de Mostaganem |
| Rapporteur | ZIANE Samira | Professeure | Université de Mostaganem |

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et à la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à remercier le personnel du Sonatrach et le Complexe GP1Z pour nous avoir accueillis au sein de leur équipe et pour nous avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon mari pour son encouragement constant, son précieux soutien moral durant tout mon parcours, sa présence et son confiance, merci d'avoir toujours cru en moi.

*Je tiens également à adresser mes remerciements à mon encadrante **M^{me} ZIANE-HEZIL Samira**, Professeure à l'université de Mostaganem pour son encadrement attentif, pour sa confiance qu'elle m'a accordé, et la qualité de ses orientations scientifiques et pédagogiques,*

*Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail, Mme **BELHOUARI Houria**, Enseignante à l'université de Mostaganem, qui a accepté de présider le jury, **M^{lle} BANATMANE Saadiya** Professeure à l'Université de Mostaganem, qui a accepté d'examiner le jury de soutenance.*

Je souhaite également adresser ma gratitude à ma famille, À mon père et à ma mère, pour leurs sacrifices et son soutien indéfectible. À mon seul frère, pour ses encouragements permanents.

À toutes celles et ceux qui, ont contribué à la réalisation de ce travail, j'adresse l'expression de ma gratitude la plus sincère.

Dédicace

*Je dédie cet humble travail à ceux qui m'ont mis au monde, élevé, éduqué et ont tout fait pour
que je réussisse dans mes études.*

À mon cher mari ma source d'amour, d'énergie et de joie.

À mes très chers parents, source de vie, d'amour, et d'affection.

À mon seul frère source de bonheur.

À toute ma famille, source d'espoir.

Et à tous mes amis.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I

PRESENTATION DU COMPLEXE GP1/Z ET GENERALITES SUR LE FOUR 5

I.1. Présentation du complexe GP1/Z..... 5

I.2. Introduction..... 5

I.3. Situation géographique du complexe GP1/Z 5

I.4. Les utilités de ce complexe 6

I.5. Les principales installations 6

I.6. Organisation générale 8

I.7. Alimentation de l'usine 8

I.7.1. Section de stockage de la charge..... 8

I.7.2. Section de déshydratation 9

I.7.3. Section de séparation de GPL 10

I.7.4. Section de réfrigération..... 12

I.7.5. Section d'huile chaude (four)..... 13

I.8. Section de stockage et expédition 14

I.9. Section BOG (Boil- Off- Gas) 14

I.10. Section jetée (CN)..... 14

I.11. Section Chargement par Camion (CC) 15

I.12. Section de transfert 15

I.13. Demande nationale des GPL..... 16

I.14. Schéma de Procédé..... 16

I.2. Généralités sur les fours 17

I.2.1. Description des fours industriels..... 18

I.3. Classification du four industriel..... 18

I.3.1. Selon la manutention du produit 18

I.3.2. Selon le procédé de chauffage 19

| | |
|--|----|
| I.4. Les différents types de fours industriels | 20 |
| I.5. Le choix d'un four | 23 |
| I.6. Constitution des fours | 24 |
| I.7. Fours du complexe GP1/Z | 24 |
| I. 8. Rôle des fours du complexe GP1Z | 25 |
| I.9. Contrôle et marche des fours | 26 |
| I.10. Rendement du four..... | 26 |
| I.11. Transferts thermiques dans les fours | 26 |

CHAPITRE II

ÉVALUATION COMPARATIVE DU RENDEMENT THERMIQUE D'UN FOUR INDUSTRIEL EN FONCTION DES PHASES OPERATIONNELLES 30

| | |
|---|-----------|
| II.1. Introduction | 30 |
| II.2. Calcul du rendement dans la zone de radiation des fours..... | 30 |
| II.3. Calcul du rendement dans la phase I | 31 |
| II.3.1. Calcul de la chaleur globale fournie par le four (Q_{f100})..... | 31 |
| II.3.2. Calcul de la chaleur sensible des gaz brûlés ($Q_{brûlés100}$)..... | 37 |
| II.3.3. Calcul de la chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation (Q_{abs100}) | 38 |
| II.3.4. Calcul de la chaleur globale fournie par le four ($Q_f 200$)..... | 39 |
| II.3.5. Calcul de de la chaleur sensible des gaz brûlés ($Q_{Brûlés 200}$) | 42 |
| II.3.6. Calcul de la chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation ($Q_{abs 200}$) | 42 |
| II.4. Calcul du rendement dans la phase II..... | 45 |
| II.4.1. Introduction | 45 |
| II.4.2. Calcul de la chaleur globale fournie par le four (Q_{f400})..... | 45 |
| II.4.3. Calcul de la chaleur sensible des gaz brûlés ($Q_{brûlés400}$)..... | 51 |
| II.4.4. Calcul de la chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation (Q_{abs400}) | 51 |
| II.4.5. Calcul de la chaleur globale fournie par le four ($Q_f 500$)..... | 53 |
| II.4.6. Calcul de la chaleur sensible des gaz brûlés ($Q_{brûlés500}$)..... | 56 |
| II.4.7. Calcul de la chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation (Q_{abs500}) | 57 |
| II.5. Conclusion | 59 |
| CONCLUSION GENERALE | 61 |
| ANNEXS..... | 69 |

Liste des figures

| N° | <i>Liste</i> | <i>Désignations</i> | <i>N° de pages</i> |
|--------------------|--------------|--|--------------------|
| CHAPITRE I | | | |
| 01 | Figure I.1 | La situation géographique de complexe GP1/Z | 5 |
| 02 | Figure I.2 | Trains de traitement du GPL | 6 |
| 03 | Figure I.3 | Les sphères de la charge d'alimentation du GPL1/Z | 7 |
| 04 | Figure I.4 | Les bacs de stockages du GPL1/Z | 7 |
| 05 | Figure I.5 | Schéma de la Section déshydratation | 10 |
| 06 | Figure I.6 | Schéma du Section frationnateur | 11 |
| 07 | Figure I.7 | Schéma de la section dééthaniseur | 11 |
| 08 | Figure I.8 | Schéma du Section dépentaniseur | 12 |
| 09 | Figure I.9 | Schéma de la section de réfrigération | 13 |
| 10 | Figure I.10 | Section d'huile chaude (four) | 13 |
| 11 | Figure I.11 | Les navires de la Section jetée | 15 |
| 12 | Figure I.12 | Section Chargement par Camion | 15 |
| 13 | Figure I.13 | Demande nationale des GPL | 16 |
| 14 | Figure I.14 | Schéma de Procédé utilisé dans GP1/Z | 16 |
| 15 | Figure I.15 | Schéma d'un four à chauffage direct | 19 |
| 16 | Figure I.16 | Schéma d'un four à chauffage indirect | 20 |
| 17 | Figure I.17 | Schéma d'un four cylindrique vertical | 21 |
| 18 | Figure I.18 | Schéma d'un four cabine | 22 |
| 19 | Figure I.19 | Schéma d'un four à chauffage par murs radiants | 22 |
| 20 | Figure I.20 | Schéma d'un four industriel | 24 |
| 21 | Figure I.21 | Schéma du four de type Anderson | 25 |
| 22 | Figure I.22 | Schéma des transferts thermiques dans les fours | 27 |
| CHAPITRE II | | | |
| 23 | Figure II.1 | Présentation du rendement η (%) en fonction des trains 100 et 200 | 44 |
| 24 | Figure II.2 | Présentation des énergies en fonction des trains 100 et 200 | 44 |
| 25 | Figure II.3 | Présentation du rendement η (%) en fonction des trains 400 et 500 | 58 |
| 26 | Figure II.4 | Présentation des énergies en fonction des trains 400 et 500 | 59 |

Liste des tableaux

| N° | <i>Liste</i> | <i>Désignation</i> | <i>N° de pages</i> |
|--------------------|---------------|--|--------------------|
| CHAPITRE II | | | |
| 01 | Tableau II.1 | Détermination de la composition de gaz combustible(T100) | 31 |
| 02 | Tableau II.2 | Résultats des calculs pour calculer LHV'(T100) | 33 |
| 03 | Tableau II.3 | Les Calculs de (H'f) la chaleur sensible du gaz combustible (T100) | 34 |
| 04 | Tableau II.4 | Les Calculs de (H'a) la chaleur sensible d'air(T100) | 35 |
| 05 | Tableau II.5 | Les débits d'O2 de la combustion dans la stœchiométrie(T100) | 36 |
| 06 | Tableau II.6 | Les calculs du Q'Brûlés(T200) | 37 |
| 07 | Tableau II.7 | Résultats des calculs pour calculer LHV'(T200) | 39 |
| 08 | Tableau II.8 | Les Calculs de (H'f) la chaleur sensible du gaz combustible(T200) | 40 |
| 09 | Tableau II.9 | Les Calculs de (H'a) la chaleur sensible d'air(T200) | 40 |
| 10 | Tableau II.10 | Les débits d'O2 de la combustion dans la stœchiométrie(T200) | 41 |
| 11 | Tableau II.11 | Les calculs du Q'Brûlés(T200) | 42 |
| 12 | Tableau II.12 | Tableau récapitulatif des rendements de la phase 1 | 43 |
| 13 | Tableau II.13 | Détermination de la composition de gaz combustible(T400) | 45 |
| 14 | Tableau II.14 | Résultats des calculs pour calculer LHV'(T400) | 47 |
| 15 | Tableau II.15 | Les Calculs de (H'f) la chaleur sensible du gaz combustible(T400) | 48 |
| 16 | Tableau II.16 | Les Calculs de (H'a) la chaleur sensible d'air(T400) | 49 |
| 17 | Tableau II.17 | Les débits d'O2 de la combustion dans la stœchiométrie(T400) | 50 |
| 18 | Tableau II.18 | Les calculs du Q'Brûlés(T400) | 51 |
| 19 | Tableau II.19 | Détermination de la composition de gaz combustible(T500) | 53 |
| 20 | Tableau II.20 | Résultats des calculs pour calculer LHV'(T500) | 54 |

| | | | |
|----|---------------|---|----|
| 21 | Tableau II.21 | Les Calculs de (H'f) la chaleur sensible du gaz combustible(T500) | 55 |
| 22 | Tableau II.22 | Les Calculs de (H'a) la chaleur sensible d'air(T500). | 55 |
| 23 | Tableau II.23 | Les débits d'O2 de la combustion dans la stœchiométrie(T500) | 56 |
| 24 | Tableau II.24 | Les calculs du Q'Brûlés(T500) | 57 |
| 25 | Tableau II.25 | Tableau récapitulatif des rendements de la phase 2 | 58 |

Résumé

Ce travail présente une étude comparative du rendement d'un four industriel opérant sous deux phases de fonctionnement différentes. L'objectif est d'analyser l'influence des conditions opérationnelles sur les performances thermiques du four et d'évaluer son efficacité énergétique.

L'étude s'appuie sur l'exploitation de données réelles issues du fonctionnement du four, permettant d'examiner les variations de température, les échanges thermiques et la quantité de chaleur transmise à l'huile chauffée. Une attention particulière est portée aux paramètres influençant le rendement, tels que la qualité de la combustion, l'excès d'air, l'état des surfaces d'échange ainsi que la formation de dépôts de coke. La comparaison entre les deux phases I et II met en évidence des écarts de performance significatifs, liés principalement aux pertes thermiques et aux conditions d'exploitation. Les résultats obtenus montrent que le train 200 de la phase I et le train 500 de la phase II sont présentés les meilleurs trains par contre le train 100 de la phase I et le train 400 de la phase II sont présentés les moins performants.

L'efficacité thermique d'un four industriel est une variable changeante et dépend fortement des phases d'utilisation du four.

Mots clés : four industriel, les performances thermiques, les échanges thermiques, huile chauffée, le rendement

Abstract

His study presents a comparative analysis of the efficiency of an industrial furnace operating under two different operating modes. The objective is to analyze the influence of operating conditions on the furnace's thermal performance and to evaluate its energy efficiency.

The study is based on the analysis of real-time data from the furnace's operation, allowing for an examination of temperature variations, heat transfer, and the amount of heat transferred to the heated oil. Particular attention is paid to parameters influencing efficiency, such as combustion quality, excess air, the condition of heat exchange surfaces, and the formation of coke deposits. A comparison between Phases I and II reveals significant performance differences, primarily related to heat losses and operating conditions. The results show that Line 200 in Phase I and Line 500 in Phase II are the best-performing lines, whereas Line 100 in Phase I and Line 400 in Phase II are the least efficient.

The thermal efficiency of an industrial furnace is a variable factor and depends heavily on the furnace's operating phases.

Keywords: industrial furnace, thermal performance, heat transfer, heated oil, efficiency

ملخص

تقدم هذه الدراسة مقارنة بين كفاءة فرن صناعي يعمل في مرحلتين مختلفتين من التشغيل. والهدف من ذلك هو تحليل تأثير الظروف التشغيلية على الأداء الحراري للفرن وتقييم كفاءته في استخدام الطاقة.

وتستند الدراسة إلى استغلال البيانات الفعلية المستمدة من تشغيل الفرن، مما يسمح بفحص التغيرات في درجة الحرارة، والتبادل الحراري، وكمية الحرارة المنقولة إلى الزيت المسخن. ويتم إيلاء اهتمام خاص للمعاملات التي تؤثر على الكفاءة، مثل جودة الاحتراق، وفائض الهواء، وحالة أسطح التبادل، وكذلك تكوين رواسب الكوك. تُظهر المقارنة بين المرحلتين الأولى والثانية اختلافات كبيرة في الأداء، ترتبط بشكل أساسي بالفقد الحراري وظروف التشغيل. وتُظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن خط الإنتاج 200 في المرحلة الأولى وخط الإنتاج 500 في المرحلة الثانية هما الأفضل أداءً، في حين أن خط الإنتاج 100 في المرحلة الأولى وخط الإنتاج 400 في المرحلة الثانية هما الأقل أداءً.

تعد الكفاءة الحرارية للفرن الصناعي متغيرًا متغيرًا وتعتمد بشكل كبير على مراحل استخدام الفرن .

الكلمات المفتاحية: الفرن الصناعي، الأداء الحراري، التبادل الحراري، الزيت المسخن، الكفاءة

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie des hydrocarbures représente un secteur stratégique qui contribue fortement au développement économique et industriel à l'échelle mondiale. Dans ce contexte, le gaz naturel s'impose comme une source d'énergie essentielle grâce à sa forte efficacité thermique, sa disponibilité abondante et ses émissions polluantes relativement réduites par rapport aux autres combustibles fossiles. Il intervient dans plusieurs applications industrielles, notamment le chauffage des installations, la production d'électricité et l'alimentation des unités pétrochimiques. En raison de l'augmentation continue des besoins énergétiques mondiaux, le gaz naturel joue également un rôle important dans l'amélioration des performances énergétiques et dans la transition vers des systèmes énergétiques plus durables [1].

En Algérie, le secteur des hydrocarbures occupe une place centrale dans l'économie nationale et constitue l'un des principaux moteurs du développement industriel. L'exploitation du gaz naturel est assurée principalement par la compagnie nationale Sonatrach, qui représente l'acteur historique et stratégique du secteur énergétique depuis sa création en 1963. Cette entreprise est chargée de l'ensemble des activités de la chaîne des hydrocarbures, incluant l'exploration, la production, le transport ainsi que la commercialisation du gaz naturel.

Par ailleurs, l'Algérie dispose de ressources gazières importantes permettant de maintenir une position significative sur le marché énergétique international. Le champ de Hassi R'Mel constitue le principal gisement gazier du pays et l'un des plus importants en Afrique, en raison de son rôle stratégique dans la production nationale et dans l'approvisionnement des réseaux de transport. Ce gisement contribue de manière essentielle à la sécurité énergétique du pays ainsi qu'à ses exportations vers les marchés extérieurs [2].

Dans la wilaya d'Oran, plus précisément dans la zone industrielle d'Arzew, se trouvent plusieurs complexes de liquéfaction du gaz naturel appartenant à Sonatrach, notamment les complexes GL1Z, GL2Z et GL3Z. Ces installations permettent de transformer le gaz naturel en gaz naturel liquéfié (GNL), facilitant ainsi son transport maritime vers les marchés internationaux. Elles disposent d'importantes capacités de production et jouent un rôle essentiel dans les exportations gazières de l'Algérie.

On trouve également dans la même zone industrielle d'Arzew le complexe GP1/Z, qui constitue une unité importante de séparation et de traitement des gaz de pétrole liquéfiés (GPL). Ce complexe assure la récupération et la séparation des différents composants du gaz, notamment le propane et le butane, destinés à l'exportation ou à la consommation nationale.

Le complexe GP1/Z joue ainsi un rôle stratégique dans la valorisation des hydrocarbures gazeux et dans l'optimisation des chaînes de production et de transformation.

Dans les unités de traitement et de transformation du gaz naturel, plusieurs équipements thermiques sont utilisés afin de satisfaire les besoins énergétiques des procédés industriels. Parmi ces équipements, les fours industriels occupent une place centrale en raison de leur rôle dans la génération de chaleur nécessaire aux différentes opérations de production. Leur fonctionnement repose principalement sur la combustion d'un combustible, généralement le gaz naturel, permettant de produire une énergie thermique élevée et contrôlée. Cette énergie est ensuite utilisée pour le chauffage des fluides de procédé ou pour faciliter certaines transformations physico-chimiques indispensables aux différentes étapes industrielles. Ainsi, les fours industriels constituent des éléments essentiels pour assurer la continuité et l'efficacité des installations de traitement du gaz naturel [3].

Dans ce contexte, les entreprises énergétiques cherchent à optimiser les performances de leurs équipements thermiques afin de réduire la consommation énergétique, diminuer les coûts d'exploitation et limiter les impacts environnementaux liés aux émissions de gaz polluants. L'analyse du rendement énergétique des fours industriels permet ainsi d'identifier les différentes sources de pertes thermiques et de proposer des solutions techniques visant à améliorer leur efficacité énergétique.

Le bon fonctionnement d'un four industriel est influencé par un ensemble de paramètres interdépendants, notamment la qualité de la combustion, les pertes thermiques au niveau des parois, les conditions d'exploitation ainsi que les choix de conception de l'équipement. Dans le secteur des industries gazières et pétrochimiques, l'amélioration du rendement thermique des fours constitue un enjeu majeur, dans la mesure où elle permet de réduire la consommation de combustible, d'accroître l'efficacité énergétique des installations et de limiter les émissions atmosphériques associées à la combustion. Dans ce contexte, l'analyse et l'optimisation des performances énergétiques des fours industriels représentent un axe de recherche important en ingénierie énergétique et en génie des procédés, visant à améliorer la durabilité et la performance globale des systèmes industriels [4].

Dans les fours industriels utilisés pour le traitement des hydrocarbures, l'accumulation de coke sur les surfaces chauffantes constitue un problème récurrent, particulièrement lorsque l'huile utilisée est de type huile torréfiée. Ce phénomène de cokage réduit l'échange thermique entre le fluide à chauffer et les parois du four, obligeant l'installation à fonctionner à des températures plus élevées pour atteindre les conditions de procédé souhaitées.

Cette situation entraîne une augmentation significative de la consommation de gaz naturel, puisque le combustible doit compenser les pertes thermiques causées par la couche de coke isolante. En plus de l'impact économique, cette surconsommation contribue à l'émission accrue de gaz à effet de serre, ce qui a des répercussions environnementales importantes.

Le problème principal est que le rendement thermique n'est pas constant et dépend fortement des phases d'utilisation du four.

La formation du coke constitue souvent un problème majeur sur les surfaces chauffantes des fours industriels.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] International Energy Agency (IEA), *Gas Market Report, Q1. (2024)*
- [2] Benyahia. Étude de la performance des installations de traitement du gaz naturel à Hassi R'Mel. Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah (Ouargla), (2020)
- [3] Speight, J. G. *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*. McGraw-Hill. (2022)
- [4] Smith, R. *Chemical Process Design and Integration*. Wiley. (2019)

I.4. Les utilités de ce complexe

Eau :

- Production de l'eau distillée
- Production l'eau de refroidissement
- Production l'eau potable.

Air :

- Air instrument
- Air de service

Fuel : le gaz naturel est utilisé comme un combustible

Vapeur : La vapeur produite dans les chaudières est utilisée pour le chauffage des équipements

Méthanol : pour empêcher la formation de glace et d'hydrates

Gasoil : pour le fonctionnement des générateurs électriques de secours

Azote : utilisé pour assurer l'inertage des équipements.

I.5. Les principales installations

Les principales installations du complexe GP1/Z sont :

- 09 Trains de traitement du GPL.



Figure I.2. Trains de traitement du GPL [1].

- 02 unités de liquéfaction des boil-off.
- 22 Sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m³ chacune.



Figure I.3.Les sphères de la charge d'alimentation du GPL1/Z [2].

- 04 Bacs de stockage de propane basse température de 70000 m³ chacune.
- 03 Bacs de stockage de butane basse température de 70000 m³ chacune.
- 01 Bacs de stockage de bu_pro basse température de 70000 m³.



Figure I.4.Les bacs de stockages du GPL1/Z [3].

- 04 Sphères de stockage de produits ambiants (propane et Butane) de 500m³ chacune.
- 01 Sphères de stockage gazoline de 500 m³.
- Unité de démercurisation.
- 05 salles de contrôle.
- 01 Station électrique alimentée par SONELGAZ.
- 04 Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe.
- 02 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité variante entre
- 4000 et 5000 tonnes.

- Une rampe de chargement de camions.
- Une station de pompage d'eau de mer.
- Un système de télésurveillance.

I.6. Organisation générale [2]

L'organisation générale du complexe GP1/Z permet de comprendre sa situation géographique, ses effectifs, ses objectifs ainsi que le rôle de chaque département :

- Département de sécurité
- Département maintenance
- Département technique
- Département approvisionnement
- Département finances et juridique
- Département administration / social
- Département moyens généraux
- Département du Développement des Ressources Humaines
- Département travaux neufs
- Département production

I.7. Alimentation de l'usine

I.7.1. Section de stockage de la charge

La section de stockage de la charge assure un fonctionnement stable de l'usine et reçoit à la fois le flux de recyclage et les produits hors spécification provenant des autres sections.

La charge arrive par pipeline depuis la Région Transport Ouest (RTO). Elle passe d'abord par un collecteur avec contrôleur de pression pour maintenir une pression stable, puis par des filtres équipés d'un indicateur d'encrassement.

Ensuite, la charge traverse des dégazeurs pour séparer les vapeurs, puis passe par six démercuriseurs afin de réduire le mercure à environ 5 nano-g/Nm³. Des redresseurs de flux assurent un écoulement régulier pour mesurer correctement le débit et la densité du GPL.

Enfin, le GPL est stocké dans 22 réservoirs sphériques (capacité 1 000 m³ chacun) sous une pression de 18 à 22 kg/cm² et une température de 5 à 41,8 °C. Ces réservoirs sont organisés en 5 blocs :

- Trois blocs alimentent les trains de la phase I

- Un bloc pour la phase II
- Un bloc pour la phase III

I.7.2. Section de déshydratation

Le but de la déshydratation est de retirer l'eau dissoute dans le GPL de 100ppm jusqu'à 5ppm. Cela permet d'éviter la formation des glaces et la corrosion dans les pipelines et les équipements.

Il existe deux unités de déshydratation :

- Déshydratation de charge
- Déshydratation de garde

1. Déshydratation de charge

Ce système de déshydratation comprend trois colonnes d'adsorption remplies de tamis moléculaires, organisées de manière à ce que :

- La première colonne soit en fonctionnement actif (adsorption).
- La seconde colonne soit en phase de régénération.
- La troisième colonne reste en attente.

Le GPL circule à travers le sécheur de bas en haut, et l'humidité est éliminée au fur et à mesure que le gaz traverse les tamis moléculaires, pendant une durée de **36 heures**. Une fois ce temps écoulé, la colonne passe automatiquement en phase de régénération.

La régénération passe par les étapes suivantes :

- a. Drainage (durée 1 h)
- b. Dépressurisation (durée 30min)
- c. Réchauffage (durée 11h)
- d. Refroidissement (durée 5h)
- e. Remise sous pression (durée 30min)
- f. Remplissage (durée 1h)

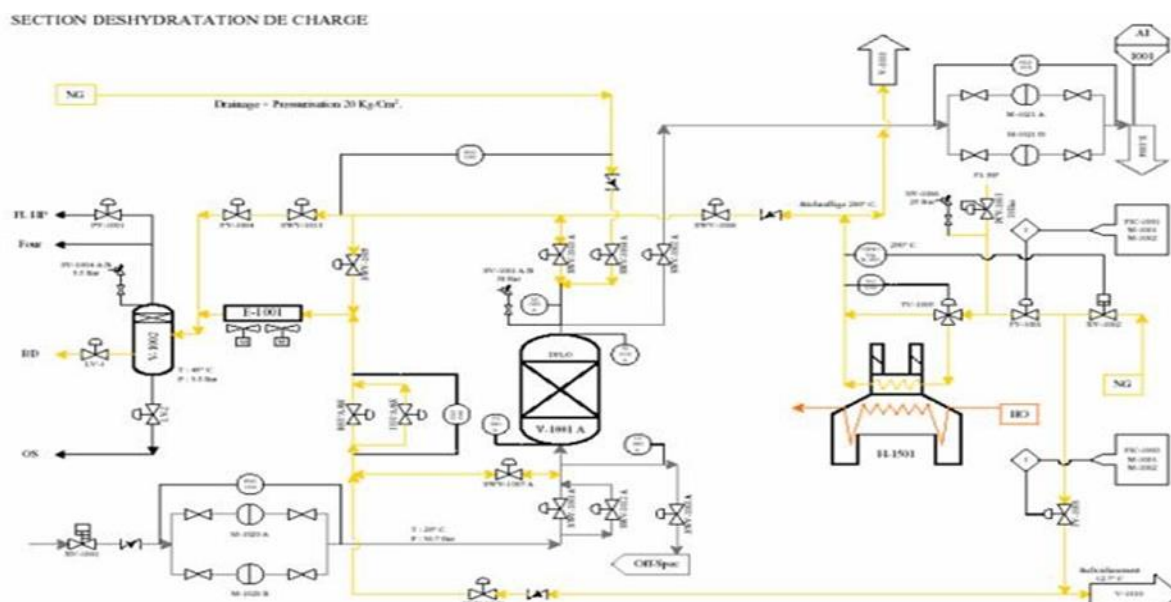


Figure I.5. Schéma de la Section déshydratation [4].

2. Déshydratation de garde

Cette opération se trouve sur la ligne de propane liquide pour réduire la teneur en eau du GPL de 5 ppm à 1 ppm, pour éviter le givrage dans la section de réfrigération. Cette étape au même principe que la déshydratation de charge sauf que la phase d'adsorption s'étend sur 26 jours et la régénération s'effectue sur une période de 24 jours.

I.7.3. Section de séparation de GPL

Cette section permet de séparer le GPL en propane C3 et butane C4, avec de faibles traces d'éthane C2 et de pentane C5. Avant la séparation, le GPL est déshydraté puis chauffé jusqu'à 71 °C à l'aide de trois échangeurs de chaleur. Il est ensuite introduit dans une colonne de fractionnement où les composants légers (C3 et C2) sont récupérés en tête, tandis que les plus lourds (C4 et C5) sont obtenus en fond. Cette section est divisée en trois séparateurs :

I.7.3.1. Fractionnateur : Après la déshydratation, le GPL brut est préchauffé dans 3 échangeurs jusqu'à environ 71 °C avant d'entrer dans le fractionnateur qui contient de 55 plateaux à clapets. Dans cette colonne, les composants légers (éthane et propane) montent en tête, tandis que le butane reste en fond. Les produits de tête sont condensés puis séparés ; une partie est recyclée comme reflux et l'autre est envoyée vers le dééthaniseur ou la réfrigération selon la teneur en éthane. Le produit de fond, riche en butane, sert d'abord à préchauffer l'alimentation. Ensuite, il est envoyé vers le dépentaniseur s'il contient beaucoup de pentane.

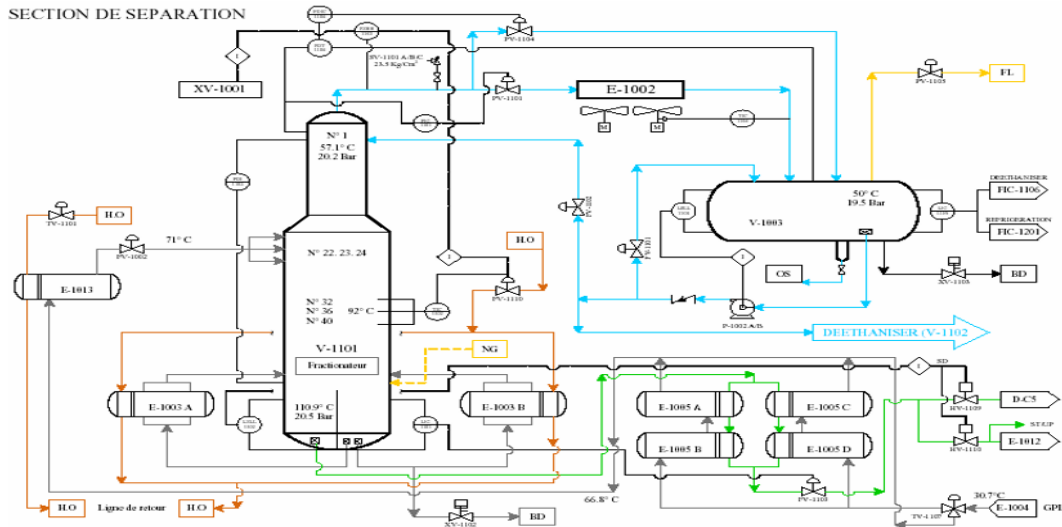


Figure I.6. Schéma du Section fractionnateur [5].

I.7.3.2. Dééthaniseur : cette colonne est équipée de 25 plateaux à clapets, utilisée pour éliminer le C2 présent dans le C3 afin d'obtenir un propane commercial plus pur. Les produits légers, principalement le C2, sont récupérés en tête de colonne, puis condensés et accumulés dans un ballon de reflux. Le C3 est récupéré au fond de la colonne à une température d'environ 62 °C, puis dirigé soit vers la section de réfrigération.

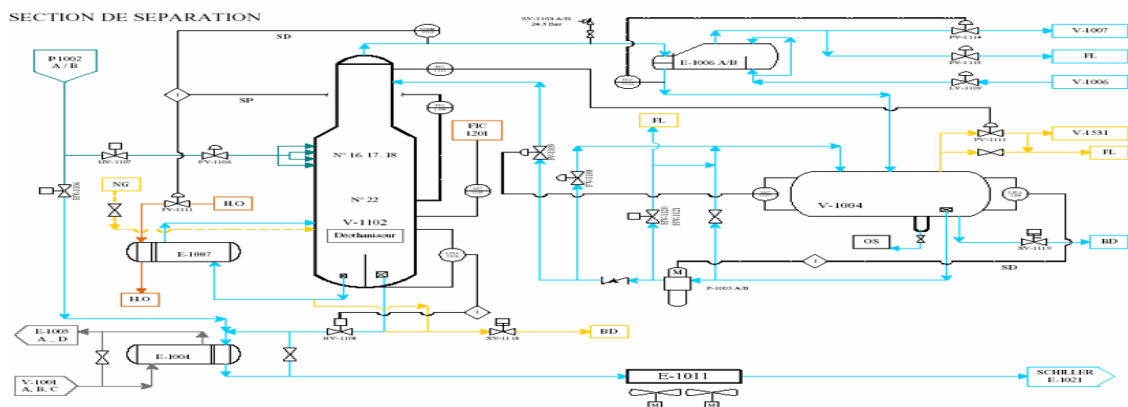


Figure I.7. Schéma de la section dééthaniseur [6].

I.7.3.3. Dépentaniseur : cette colonne est équipée de 50 plateaux à clapets. Le rôle d'un dépentaniseur est d'éliminer les traces de pentane contenues dans le butane. Le butane récupéré en tête du dépentaniseur est mélangé avec le butane non dépentanisé, puis envoyé vers la section de réfrigération.

Le pentane obtenu au fond de la colonne est refroidi à l'aide d'un aéroréfrigérant avant d'être dirigé vers le stockage à température ambiante.

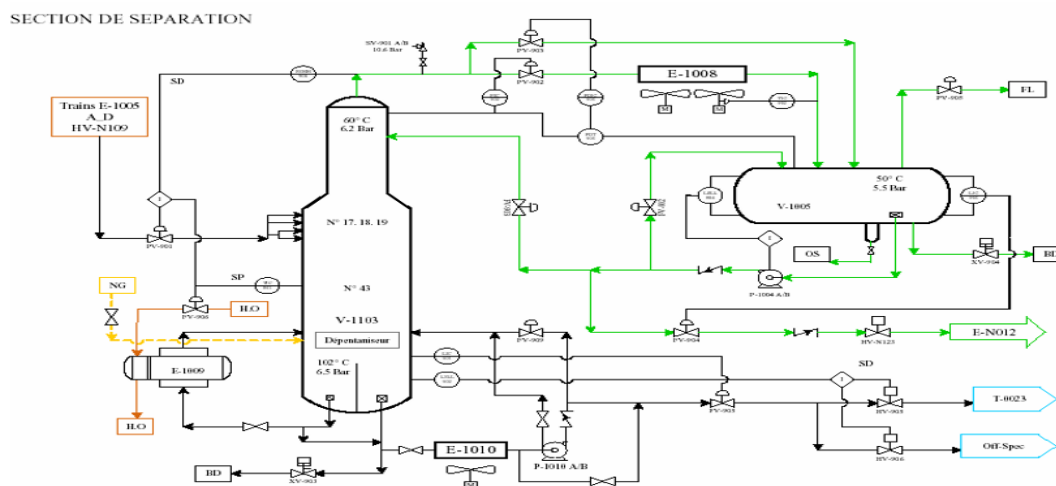


Figure I.8. Schéma du Section dépentaniseur [7].

I.7.4. Section de réfrigération

Cette section a pour rôle de réduire la température des produits finis afin de permettre leur stockage.

Le refroidissement est assuré par trois échangeurs de chaleur fonctionnant en circuit fermé, constituant une boucle de réfrigération. Le fluide utilisé est du propane pur, qui s'évapore à l'intérieur des échangeurs pour produire l'effet de refroidissement. Une fois refroidis, les produits finis sont acheminés vers les réservoirs de stockage.

- Propane : -38°C à -42°C
- Butane : -8°C à -10°C

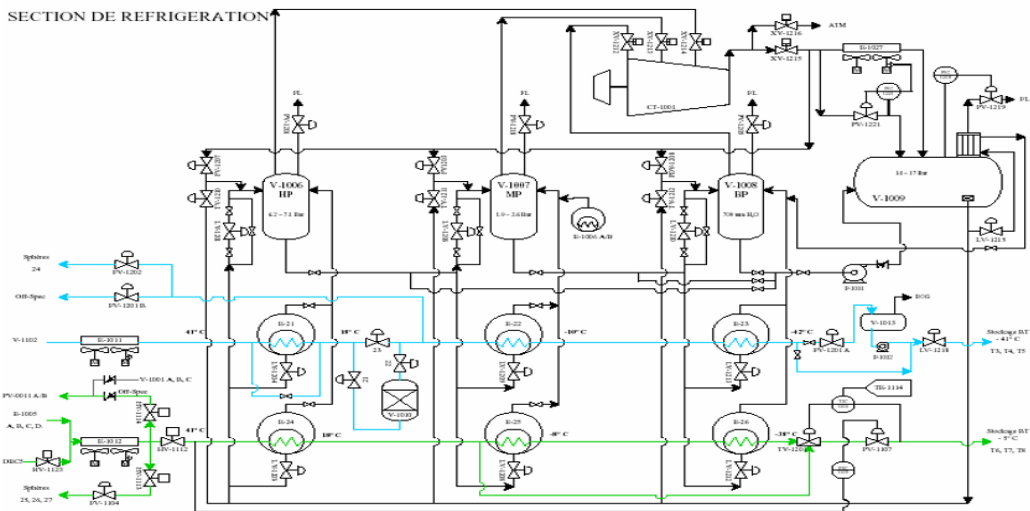


Figure I.9. Schéma de la section de réfrigération [8].

I.7.5. Section d'huile chaude (four)

Cette section d'huile caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour les équipements suivants :

- Le troisième préchauffeur
- Les rebouilleurs de la section séparation
- Le gaz naturel de régénération de la section déshydratation.

L'huile TORADA circule dans une boucle fermée, les pompes en circulation aspirent l'huile du ballon d'expansion et le refoulent vers le four.

Au niveau du four l'huile est chauffée premièrement par convection puis radiation jusqu'à 180°C ensuite elle est dirigée vers les différents utilisateurs, à son retour l'huile est refroidie à 130°C.

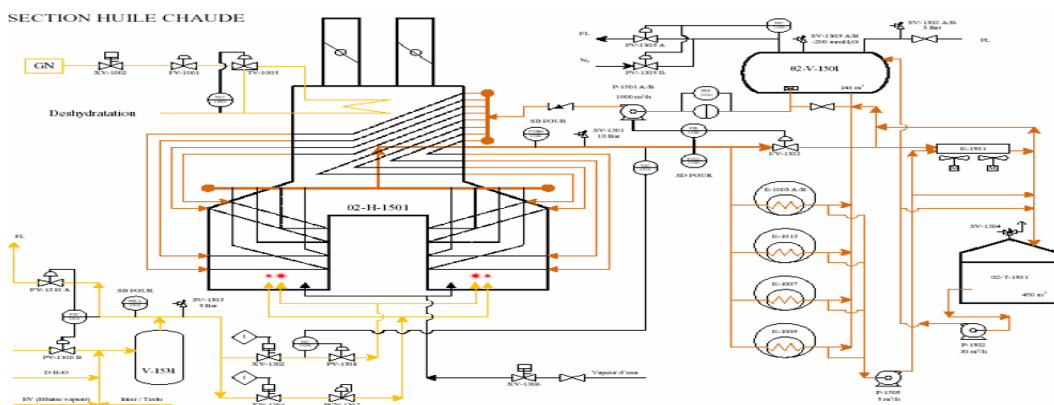


Figure I.10. Section d'huile chaude (four) [9].

I.8. Section de stockage et expédition

Elle assure le stockage des produits finis et l'expédition par navires et camions. On distingue deux types de stockage :

Section de stockage à basse température : (marché international)

- Trois (4) bacs pour le Propane de 70000 m³ chacun.
- Trois (4) bacs pour le Butane de 70000 m³ chacun.

Section de stockage à température ambiante : (marché national)

- Une sphère (1) pour le Propane de 500 m³.
- Trois sphères (3) pour le Butane de 500 m³ chacune.
- Une sphère (1) pour le pentane de 500 m³ chacune.

I.9. Section BOG (Boil- Off- Gas)

La section de reliquéfaction des vapeurs (BOG) a pour objectif de maintenir la pression dans les réservoirs de stockage à basse température. Le contrôle de cette opération est assuré par deux salles de commande :

- LCR (local control room) : s'occupe de la gestion des opérations de stockage des produits finis, section récupération BOG (gaz évaporé)
- JRC (Jetty Control Room) : s'occupe de la supervision des opérations de chargement par navire.

I.10. Section jetée (CN)

C'est une section d'expédition de C3 et C4 pour le marché international, elle contient deux quais de chargement navires :

- D1 : concernant les petits navires.
- M6 : concernant les grands navires.



Figure I.11. Les navires de la Section jetée [10].

I.11. Section Chargement par Camion (CC)

Cette section assure l'organisation des enlèvements par camions au niveau de la rampe de chargement, pour NAFTAL ainsi que pour les opérateurs privés. Elle est équipée de cinq réservoirs sphériques, de pompes et de bras de chargement. L'ensemble de ces installations permet le chargement simultané du propane, du butane et du pentane.



Figure I.12. Section Chargement par Camion [11].

I.12. Section de transfert

Lorsqu'un produit est hors spécifications ou contaminé, le propane ou le butane réfrigéré provenant des bacs à basse température est redirigé vers la section de stockage à température ambiante. Cette opération permet d'assurer le chargement des camions.

I.13. Demande nationale des GPL

Le niveau de la demande nationale des GPL est de l'ordre de 1.4 millions de tonnes dont 90 % de butane, 5 % de propane et 5 % de GPL carburant (GPL/c).

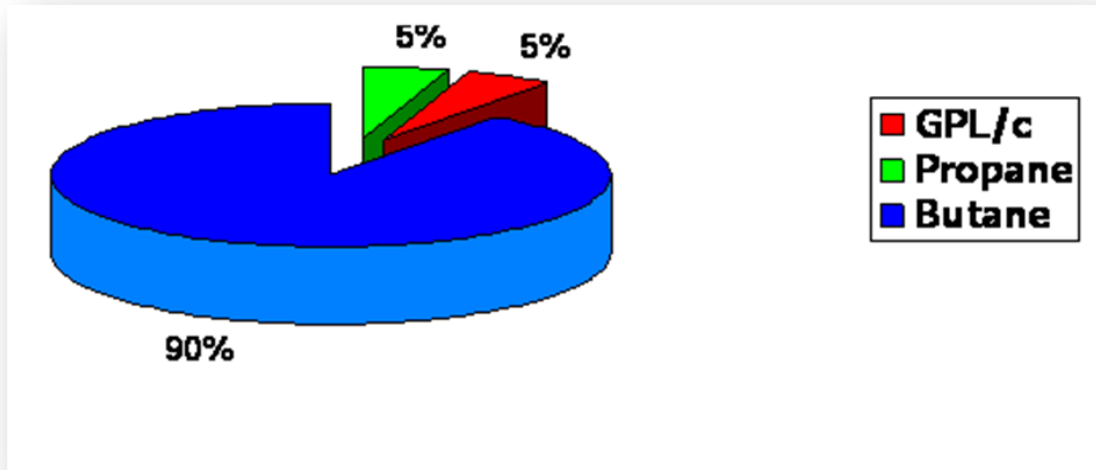


Figure I.13. Demande nationale des GPL

I.14. Schéma de Procédé

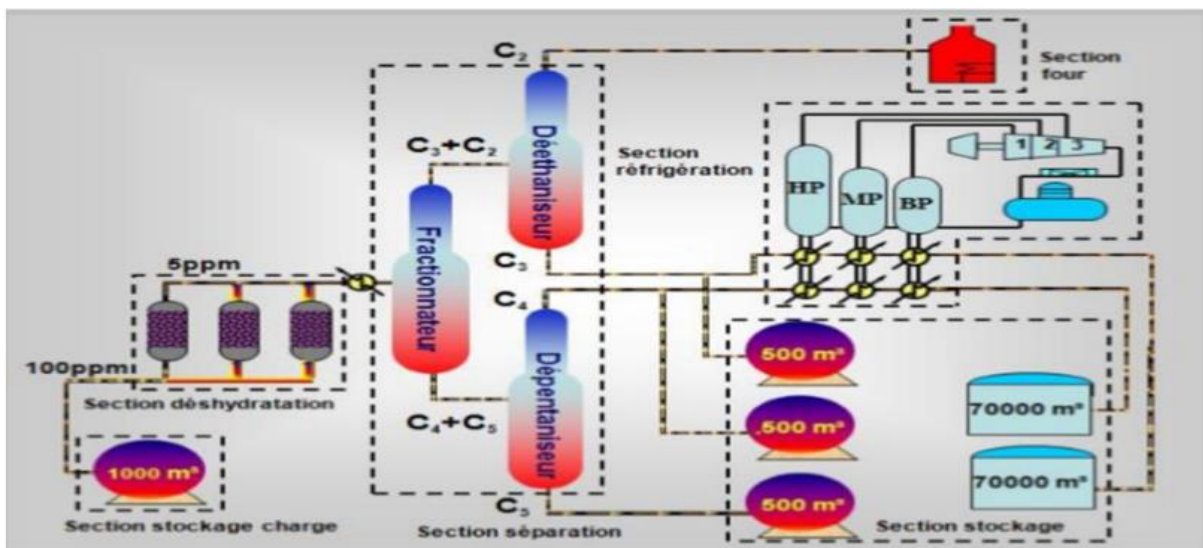


Figure I.14. Schéma de Procédé utilisé dans GP1/Z [12].

I.2. Généralités sur les fours

Les fours industriels occupent une place stratégique dans plusieurs secteurs industriels, notamment le raffinage, la pétrochimie, la métallurgie, la céramique ainsi que l'industrie agroalimentaire. Ces équipements thermiques sont conçus pour fournir l'énergie nécessaire aux opérations de chauffage, de transformation ou de traitement des matières premières, dans des conditions rigoureusement contrôlées de température, de pression et de débit.

Dans le secteur pétrolier et gazier, les fours industriels sont principalement utilisés pour le chauffage des fluides de procédé, tels que les hydrocarbures ou les huiles thermiques, avant leur introduction dans les différentes unités de traitement. Leur importance est considérable, car ils influencent directement la performance énergétique globale des installations, la qualité des produits obtenus ainsi que la sécurité des procédés industriels.

Le principe de fonctionnement d'un four industriel repose sur la production de chaleur issue de la combustion d'un combustible, généralement le gaz naturel ou le fuel. Cette énergie thermique est ensuite transférée au fluide circulant dans les tubes à travers les mécanismes de rayonnement, de convection et, dans une moindre mesure, de conduction. Ainsi, la performance thermique d'un four dépend de plusieurs paramètres clés, tels que la qualité de la combustion, l'efficacité de l'isolation thermique, l'encrassement des surfaces d'échange et les conditions d'exploitation.

Dans un contexte industriel marqué par la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les émissions polluantes, l'optimisation du rendement des fours industriels constitue un enjeu majeur. Une meilleure maîtrise de leur fonctionnement permet non seulement de diminuer la consommation de combustible, mais également de réduire les pertes thermiques et l'impact environnemental des installations.

Par conséquent, l'étude des performances énergétiques des fours industriels représente un axe de recherche essentiel en génie des procédés et en ingénierie énergétique, contribuant à l'amélioration de la rentabilité des installations et à une exploitation plus durable des ressources énergétiques [3].

I.2.1. Description des fours industriels [4]

Un four industriel est un dispositif permettant de produire une chaleur élevée, générée à partir d'une énergie thermique ou électrique, dans le but d'augmenter la température d'un produit. Il peut remplir deux fonctions principales :

- un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de pétrole brut avant distillation) ;
- un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de vapocraquage de la pétrochimie).

Généralement, le four s'intègre dans une chaîne de production industrielle complexe dont il constitue un élément essentiel. On le retrouve dans de nombreux secteurs d'activité, ce qui rend difficile une approche globale et unique. Ainsi, l'étude des fours industriels repose sur l'identification de leurs caractéristiques communes, tout en tenant compte de leurs spécificités selon les domaines d'application. Il introduit une série d'articles portant chacun sur les fours spécifiques à une industrie notamment :

- les fours de traitement thermique des métaux.
- les fours de raffinage et de l'industrie chimique.
- les fours de cimenterie.
- les fours de l'industrie verrière.
- les fours des industries céramiques et des produits réfractaires.

I.3. Classification du four industriel

I.3.1. Selon la manutention du produit [5]

I.3.1.1. Fours continus

Un four continu est un four industriel dans lequel les produits à traiter se déplacent de manière continue ou par étapes à travers différentes zones de chauffage, depuis l'entrée jusqu'à la sortie, sans interruption du fonctionnement. Ce type de four permet d'assurer une production régulière, une température contrôlée et un meilleur rendement thermique, ce qui le rend adapté aux procédés industriels en continu.

I.3.1.2. Fours discontinus

Un four discontinu est un four industriel dans lequel la charge est introduite, traitée thermiquement pendant une durée déterminée, puis retirée avant le chargement d'un nouveau lot. Contrairement au four continu, son fonctionnement se fait par cycles successifs (chargement – chauffage – déchargement).

I.3.2. Selon le procédé de chauffage [6]

I.3.2.1. Fours à chauffage direct

Dans les fours à chauffage direct, l'énergie thermique issue de la combustion d'un combustible est transférée directement au fluide à chauffer, sans utilisation de fluide intermédiaire. Dans ce cas, les gaz de combustion entrent en contact direct avec les tubes contenant le produit à chauffer, ce qui permet un échange thermique principalement par convection.

Les réchauffeurs directs sont utilisés lorsque la quantité d'énergie à transférer est très importante :

- Chauffage à haute température.
- Gros débit de produit à réchauffer.

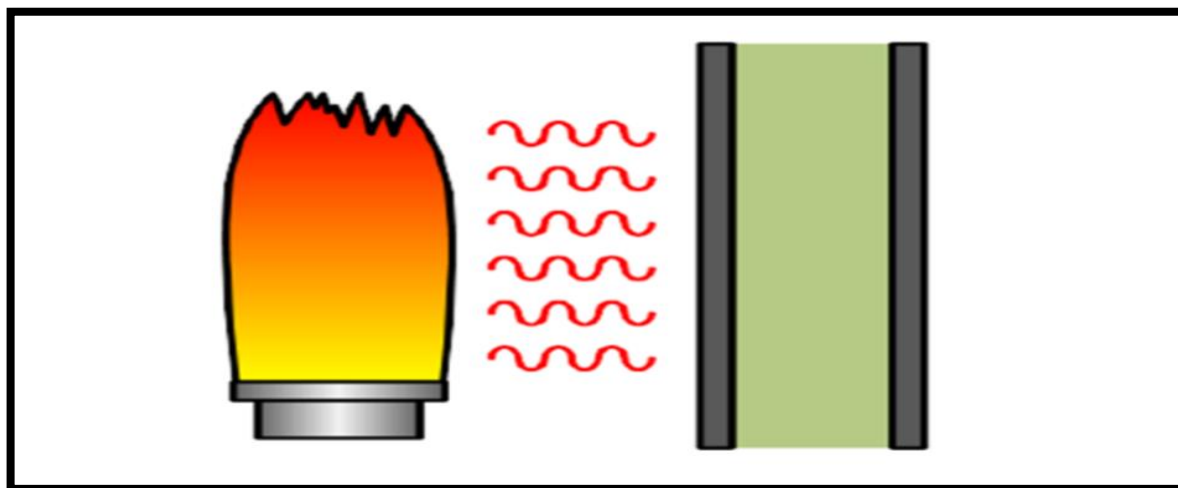


Figure I.15. Schéma d'un four à chauffage direct [13].

I.3.2.2. Fours à chauffage indirect

Dans un réchauffeur indirect, l'énergie thermique est transférée au produit à chauffer à travers un fluide caloporteur, généralement de la vapeur d'eau ou de l'huile thermique. Ce fluide circule dans des échangeurs de chaleur assurant la transmission de l'énergie vers le procédé.

Contrairement au chauffage direct, il n'existe aucun contact entre les gaz de combustion et le produit à chauffer. Le transfert de chaleur s'effectue de manière indirecte, ce qui introduit une résistance thermique supplémentaire, notamment à travers les parois de séparation. Le transfert se réalise successivement par conduction à travers la paroi, puis par rayonnement et convection vers le fluide ou la charge.

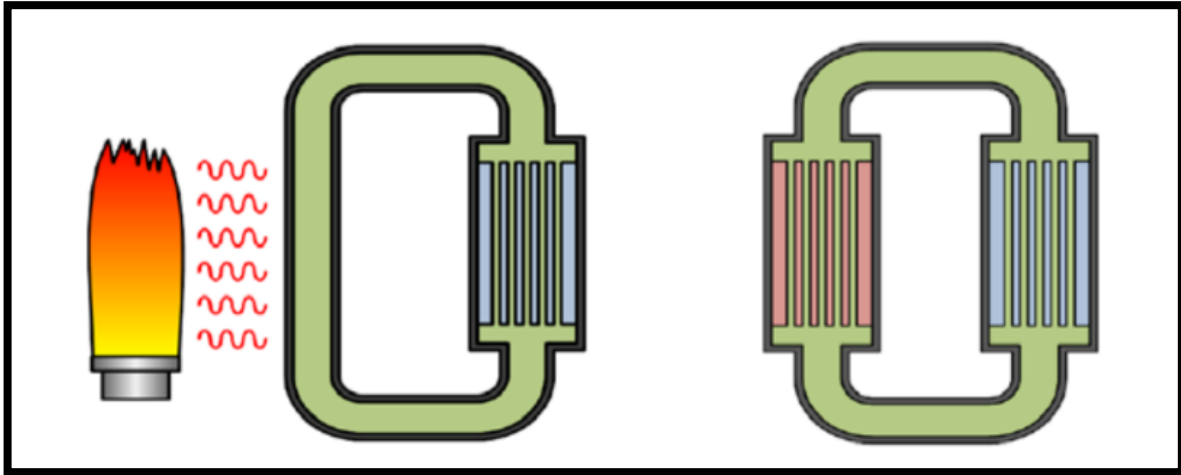


Figure I.16. Schéma d'un four à chauffage indirect [14].

I.4. Les différents types de fours industriels [7]

Les différents types de fours résultent des nombreuses configurations de tubes présentes dans les zones de rayonnement et de convection, ainsi que de leurs relations entre elles. Les catégories suivantes les décrivent :

I.4.1. Les fours cylindriques verticaux

Le four cylindrique vertical est un four industriel dont la zone de chauffage a une forme cylindrique verticale. Les brûleurs sont placés en bas, ce qui permet de répartir la chaleur de manière uniforme à l'intérieur du four.

Ce type de four est adapté à toutes les capacités de production (faibles à élevées). Il est aussi compatible avec différents types de combustibles (gaz et fuel).

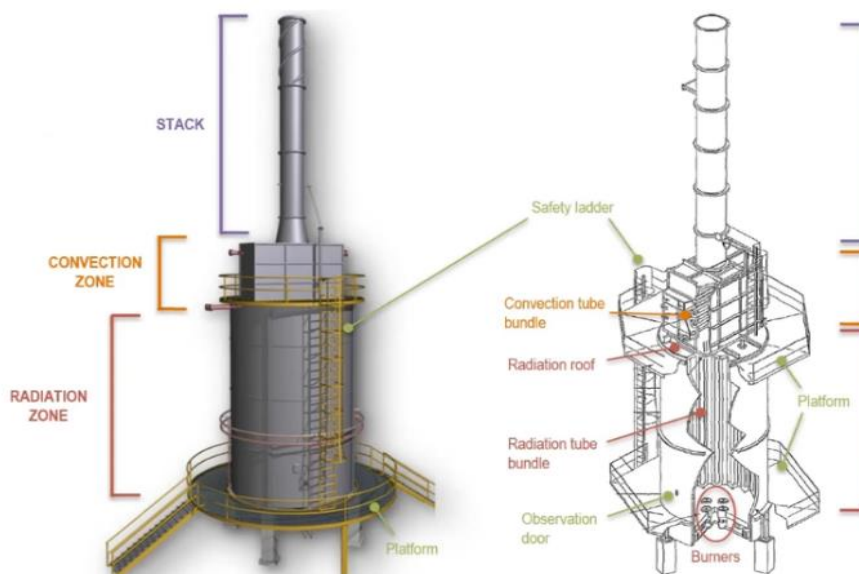


Figure I.17. Schéma d'un four cylindrique vertical [15].

I.4.2. Les fours dits (boîtes) à tubes verticaux

Les fours dits « boîtes » à tubes verticaux sont des fours industriels dont la chambre de combustion a une forme parallélépipédique (en forme de boîte). Dans ce type de four, les tubes sont disposés verticalement le long des parois internes.

Les brûleurs sont généralement placés au niveau du sol ou sur les parois latérales, permettant ainsi une bonne diffusion de la chaleur dans la zone de rayonnement. La chaleur est transférée principalement par rayonnement vers les tubes, assurant le chauffage du fluide qui y circule.

I.4.3. Les fours dits (cabines) à tubes horizontaux

Dans ces fours, la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède, dans la plus grande longueur est horizontale. Les tubes sont placés horizontalement le long des parois latérales les plus longues. Dans ces fours, la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède. Les brûleurs sont situés sur sole, la surface d'échange couvre les parois verticales latérales. Les brûleurs sont situés sur la sole, ou sur la partie inférieure des murs latéraux les plus longs, ou encore sur les murs d'extrémités ne recevant pas les tubes.

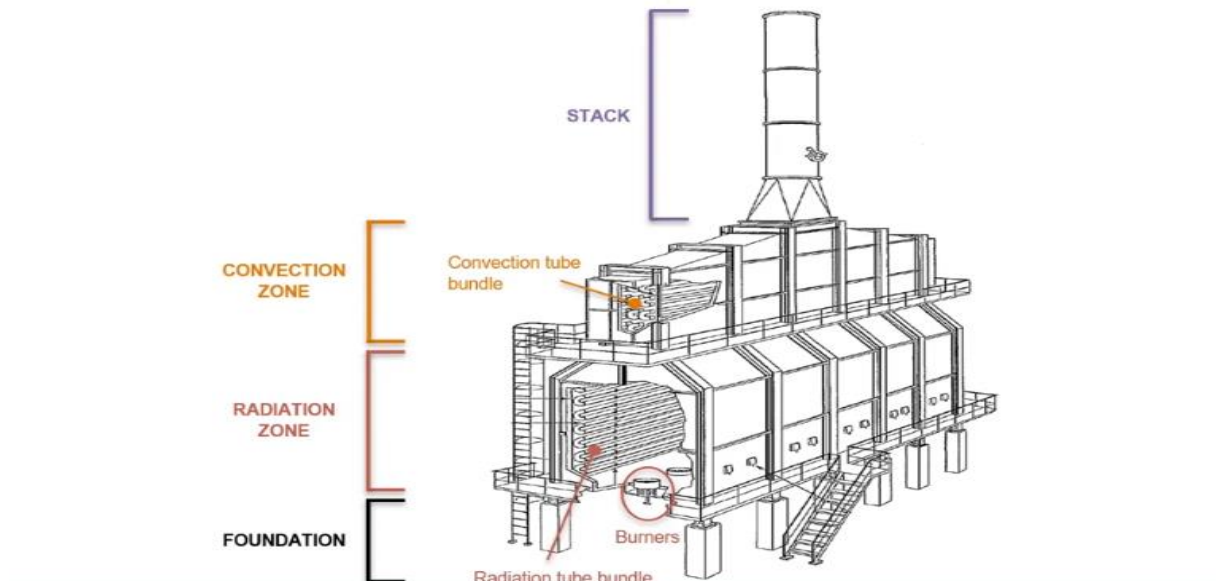


Figure I.18. Schéma d'un four cabine [16].

I.4.4. Les fours à chauffage par murs radiants

Sont des fours industriels où la chaleur est principalement transmise par rayonnement depuis les parois chaudes de la chambre de combustion vers les tubes ou le produit à chauffer.

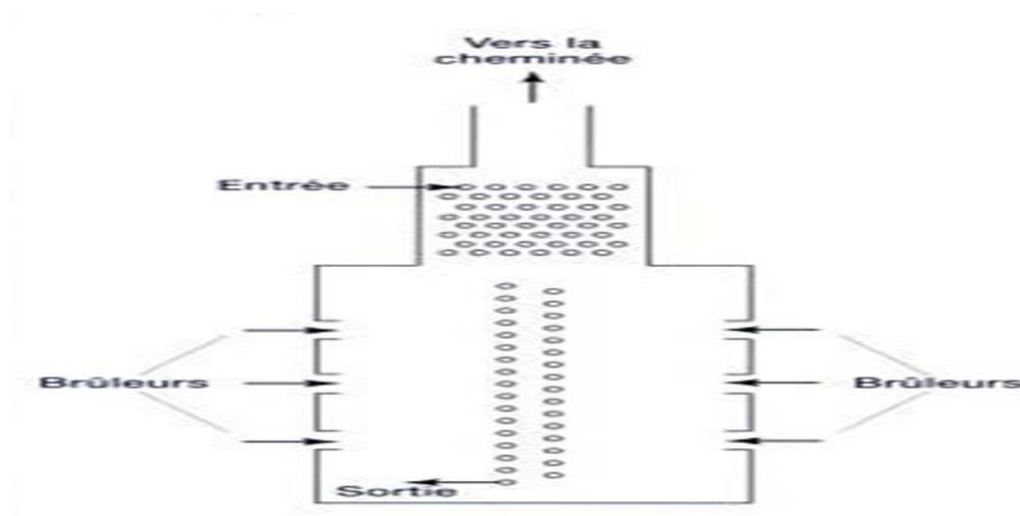


Figure I.19. Schéma d'un four à chauffage par murs radiants [17].

I.5. Le choix d'un four [8]

Le choix d'un four est principalement dicté par :

- **La construction**

La construction d'un four industriel dépend de la capacité de production, des conditions opératoires et du rendement thermique recherché.

- **L'encombrement**

L'encombrement la place nécessaire à l'installation du four dans l'unité industrielle. Il constitue un critère important dans le choix de la construction du four.

- **L'investissement**

L'investissement correspond au coût global de mise en place du four industriel.

- **La conduite**

La conduite correspond à la manière de piloter et de surveiller le four pour assurer son bon fonctionnement.

- **Le raccordement**

Le raccordement correspond aux liaisons du four avec les réseaux de combustible, de fluide, d'air et de contrôle de l'installation.

- **L'imposition**

L'imposition représente les charges fiscales ou taxes associées à l'acquisition et à l'exploitation du four industriel.

- **Prix d'un four**

Le prix d'un four correspond au coût d'achat de l'équipement selon ses caractéristiques techniques.

I.6. Constitution des fours

Les fours en général se composent de deux principales zones :

I.6.1. Zone de radiation

C'est une chambre de combustion, elle est l'élément principal de l'espace où se forme la flamme. Les tubes, en contact direct avec la flamme, sont parallèles aux parois de la chambre, disposés en une ou parfois deux rangées. Le fluide chauffé circule dans le faisceau de tubes. Le rayonnement est le principal mode de transfert de chaleur, mais une partie de cet échange se fait par convection, du fait de la proximité des gaz de combustion et des tubes.

I.6.2. Zone de convection

C'est une chambre intermédiaire, elle est installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion elle est constituée d'un faisceau de tubes, afin de récupérer la chaleur sensible des fumées, ces derniers circulent à vitesse élevée à travers ce faisceau. Ces tubes peuvent être garnis d'aiguilles, afin d'augmenter la vitesse des fumées et alors la surface d'échange.

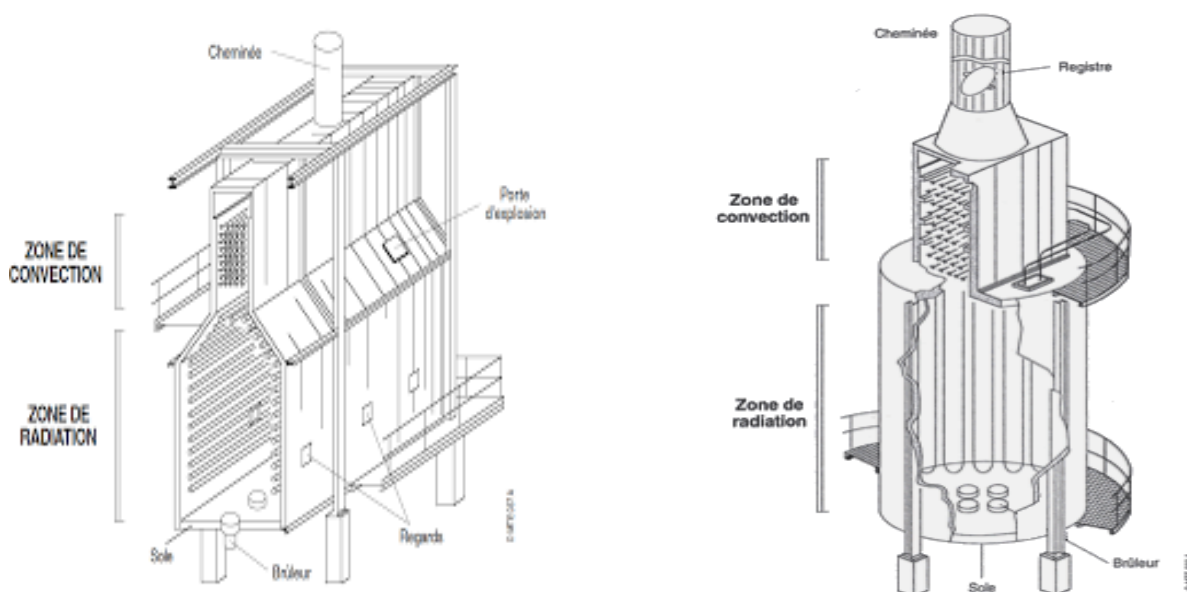


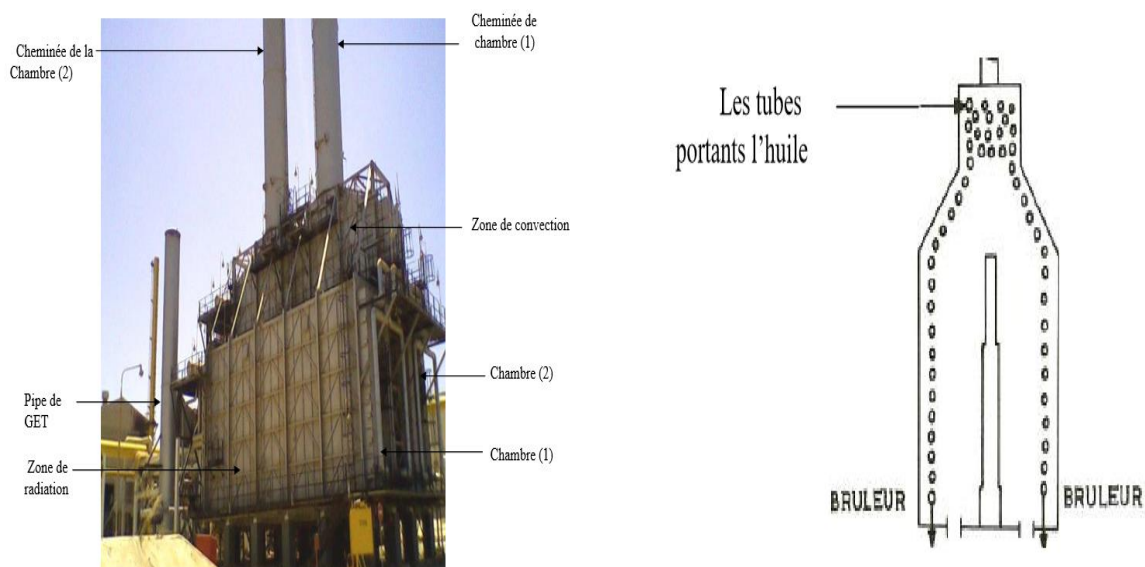
Figure I.20. Schéma d'un four industriel [18].

I.7. Fours du complexe GP1/Z

Les fours des complexes GP1Z (phases I et II) sont de types « Lummus » et « Anderson », caractérisés par un transfert thermique élevé et uniforme, ce qui les rend adaptés aux capacités moyennes et importantes. Chaque four comporte huit passes et deux chambres de combustion traversées par le fluide caloporteur. La première chambre, appelée zone de radiation, transfère la chaleur par rayonnement et est équipée de 15 pilotes et 15 brûleurs

utilisant un mélange de gaz naturel et d'éthane récupéré du dééthaniseur du train. La seconde chambre, dite zone de convection, récupère la chaleur des gaz brûlés provenant de la zone de radiation. Ces fours servent à chauffer l'huile caloporteur destinée aux rebouilleurs et aux colonnes de séparation des hydrocarbures (C2, C3 et C4). Le gaz naturel chauffé est également utilisé pour la régénération des déshydrateurs, tandis que le gaz et l'éthane récupérés constituent le combustible principal. En cas de besoin supplémentaire, du gaz naturel frais est injecté automatiquement pour compléter l'alimentation.

Pour le complexe GPL1/Z, le four à huit passes fonctionne de manière similaire : l'huile TORADA-TC circule d'abord dans la zone de convection avant de passer par la zone de radiation, et la chaleur est fournie par trente brûleurs utilisant le même mélange de gaz naturel et d'éthane.



I. 8. Rôle des fours du complexe GP1Z

Le four a pour fonction principale de réchauffer l'huile de circulation TORADA TC (130°C à 180°C) utilisée comme source de chaleur à la section de séparation et au préchauffeur de GPL brut, et pour fonction secondaire, de chauffer le gaz naturel dans la zone de convection (jusqu'à 280°C) pour alimenter la section déshydratation en gaz de régénération.

I.9. Contrôle et marche des fours

Le fonctionnement des fours à huile chaude dépend du réglage de l'excès d'air et de la température du fluide réchauffé. Les systèmes automatiques contrôlent le débit de combustible pour maintenir une température stable, tandis que l'analyseur I-1301 mesure la concentration d'oxygène. Le taux optimal d'excès d'air pour un fonctionnement normal est de 15 %. En cas de variation importante du débit de combustible, un réglage manuel devient nécessaire. Il est également essentiel d'arrêter les brûleurs si la circulation du fluide cesse afin d'éviter la surchauffe des tubes, ce qui peut être prévenu par un système d'alarme de débit bas et une coupure automatique du combustible.

I.10. Rendement du four

Le rendement d'un four industriel à gaz est un indicateur énergétique qui exprime la capacité du four à transformer l'énergie chimique du combustible (gaz naturel, propane, etc.) en chaleur utile réellement transmise au produit ou au fluide à chauffer. [9]

➤ **Expression du rendement d'un four industriel**

$$\eta(\%) = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{Q_{\text{entrée}}} \times 100 \quad (I.1)$$

I.11. Transferts thermiques dans les fours [10]

I.11.1. Transfert par rayonnement

Dans la zone de radiation, la chaleur est transférée principalement par rayonnement thermique depuis la flamme et les gaz chauds vers les tubes contenant le fluide à chauffer.

I.11.2. Transfert par convection

Dans la zone de convection, assurant le transfert de chaleur entre les gaz chauds et les tubes.

I.11.3. Transfert par conduction

Elle s'effectue à travers les parois des tubes et les revêtements réfractaires du four.

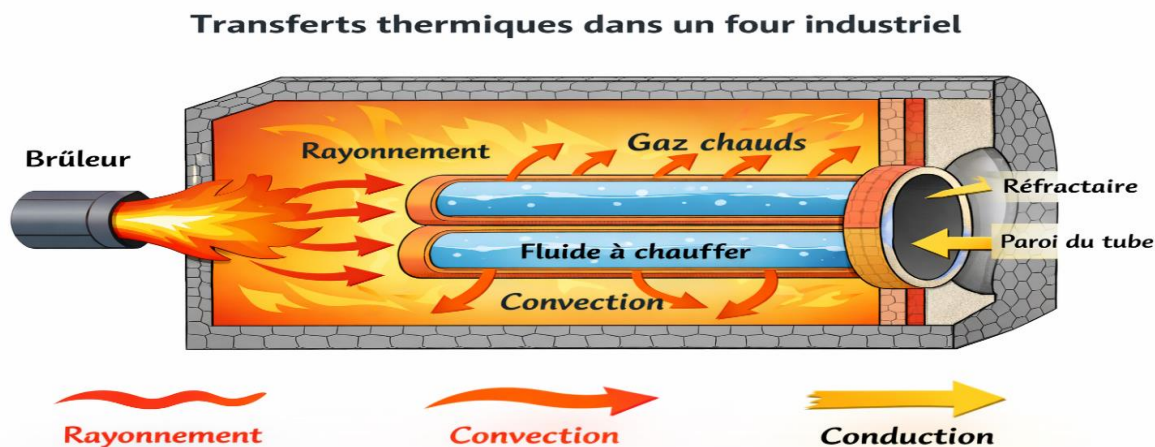


Figure I.22. Schéma des transferts thermiques dans les fours

I.12. Conclusion

L'étude du complexe GP1Z montre que ses différentes unités fonctionnent de manière coordonnée pour assurer la production, le traitement et le stockage du GPL. Les phases I et II présentent des conceptions très proches, ce qui facilite la gestion et l'optimisation des opérations. Cette structuration garantit non seulement l'efficacité du procédé, mais aussi la qualité et la sécurité des produits finis.

Les fours industriels sont des équipements essentiels dans les procédés de chauffage des industries pétrochimiques et gazières. Ils assurent le transfert thermique nécessaire au traitement des fluides avec différentes conceptions adaptées aux besoins industriels. Leur rendement dépend principalement de la qualité de la combustion et des conditions d'exploitation. Une bonne maîtrise du fonctionnement permet de réduire les pertes d'énergie et d'améliorer l'efficacité globale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] <https://sonatrach.com/fr/liquifaction-separation/complexe-GP1Z>
- [2] Mémoire Etude de la performance de la section séparation au niveau du complexe GP1/Z. CHEHAIDIA Zahira, BENABDI Rekia. Université de Mostaganem. (2018-2019).
- [3] Mullinger, P., & Jenkins, B. Industrial and Process Furnaces : Principles, Design and Operation (3 rd Edition). Elsevier (Butterworth-Heinemann), (2022)
- [4] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/foursindustriels-42484210>
- [5] <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/4497470/four-continu>
- [6] Polycopié de cours module : Fours et Chaudière, Niveau 1 ère Année Master en Génie Chimique, Département de Génie des Procédés, FST, réalisé par Dr MEZOUAGH Amina Université de Mostaganem. (2021).
- [7] Mémoire Étude du rendement du four au niveau du complexe GP1/Z. Calcul analytique et simulation. BELALIA Abdelillah, BELARBI Abderrahmane Mohamed Anis. Université de Mostaganem. (2024-2025).
- [8] Mémoire Détermination de rendement actuel d'un équipement industriel : Four H101 de la Raffinerie d'Arzew. SLIMANE Mansouria, ZERROUKI Noura Kheir El Houda. Université de Mostaganem. (2022-2023).
- [9] <https://sauermanngroup.com/fr-INT/cas-pratiques/mesure-du-rendement-decombustion-des-fours-industriels-et-des-chaudières>
- [10] Taine, J., Enguehard, F., & Iacona, E. Transferts thermiques. Introduction aux transferts d'énergie, 6^e édition, Dunod, Paris. (2021).

FIGURES

- [1] [2] [3] Mémoire Etude du rendement et l'optimisation de la section du four au niveau du complexe GP1/Z. KOURDOURLI Marwa, IDRICI Khalida. Université de Mostaganem. (2023-2024).
- [4] [5] [6] [7] [8] [9] Mémoire Étude du rendement du four au niveau du complexe GP1/Z. Calcul analytique et simulation. BELALIA Abdelillah, BELARBI Abderrahmane Mohamed Anis. Université de Mostaganem. (2024-2025).
- [10] [11][12] Mémoire calcul de vérification du four H101. LARBI Ikram, OULDABDALLAH Fatima. Université de Mostaganem. (2020-2021).

[13] [14] Mémoire Détermination de rendement actuel d'un équipement industriel : Four H101 de la Raffinerie d'Arzew. SLIMANE Mansouria, ZERROUKI Noura Kheir El Houda. Université de Mostaganem. (2022-2023).

[15] [16] [17] [18] https://www.univ-ueb.dz/fssa/wp-content/uploads/2023/12/Support-de-Cours-Fours-et-chaudi%C3%A8res-M1-G%C3%A9nie-Chimique-H.Amar_.pdf

[19] Mémoire Étude du rendement du four au niveau du complexe GP1/Z. Calcul analytique et simulation. BELALIA Abdelillah, BELARBI Abderrahmane Mohamed Anis. Université de Mostaganem. (2024-2025).

CHAPITRE II

ÉVALUATION COMPARATIVE DU RENDEMENT THERMIQUE D'UN FOUR INDUSTRIEL EN FONCTION DES PHASES OPERATIONNELLES

II.1. Introduction

Dans le cadre de l'évaluation de l'état de fonctionnement des fours des phases I et II ainsi que du calcul de la chaleur échangée, une étude technique a été réalisée, au niveau du complexe GP1/Z en se basant sur des trains représentatifs de chaque phase.

Pour la phase I, les trains 100 et 200 ont été retenus en raison de leur représentativité et de la disponibilité complète des données techniques les concernant.

Les fours de la phase I se distinguent par la présence d'un système de récupération d'énergie situé au niveau de la zone de convection. Cette récupération est assurée grâce aux gaz d'échappement issus de la combustion du gaz naturel dans la turbine, contribuant ainsi à l'amélioration du rendement énergétique global de l'installation.

Le choix des trains 100 et 200 s'explique donc par la fiabilité et la disponibilité des informations techniques nécessaires à la réalisation des différentes études de calcul.

II.2. Calcul du rendement dans la zone de radiation des fours

Le rendement d'un four au niveau de la zone de radiation correspond à un rapport énergétique. Il est défini comme le quotient entre la quantité de chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation et la quantité de chaleur fournie dans cette même zone [1].

Le calcul du rendement dans la zone de radiation sera présenté en détail pour le train 100. En revanche, pour le second train, seuls les résultats finaux seront indiqués, étant donné que la méthode de calcul appliquée est identique.

$$\eta = \frac{Q_{\text{abs huile rad}}}{Q_f - Q_{\text{brûlés}}} \quad (\text{II.1})$$

$Q_{\text{abs huile rad}}$: chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation.

Q_f : chaleur globale fournie par le four.

Chapitre II

$Q_{brûlés}$: chaleur des gaz brûlés dans la zone de radiation.

$Q_f - Q_{brûlés}$: chaleur fournie par le four dans la zone de radiation.

II.3. Calcul du rendement dans la phase 1

❖ Train 100

II.3.1. Calcul de la chaleur globale fournie par le four (Q_{f100})

Détermination de la composition de gaz combustible (train100) :

La composition du combustible au niveau de la phase I a été prise par le chromatographe en ligne.

Tableau II. 1 : Détermination de la composition de gaz combustible (T100).

| Composants | $X_i\%$ (molaire) | M_i (Kg/Kmole) | X_i (molaire)* M_i | $X_i\%$ (massique) |
|---------------------------------|-------------------|------------------|------------------------|--------------------|
| N ₂ | 5,8 | 28 | 1,624 | 8,523 |
| He | 0,19 | 4 | 0,0076 | 0,0398 |
| CO ₂ | 0,21 | 44 | 0,0924 | 0,484 |
| H ₂ O | 0 | 18 | 0 | 0 |
| CH ₄ | 83 | 16 | 13,28 | 69,699 |
| C ₂ H ₆ | 7,1 | 30 | 2,130 | 11,179 |
| C ₃ H ₈ | 2,25 | 44 | 0,990 | 5,195 |
| iC ₄ H ₁₀ | 0,4 | 58 | 0,232 | 1,217 |
| nC ₄ H ₁₀ | 0,6 | 58 | 0,348 | 1,826 |
| iC ₅ H ₁₂ | 0,12 | 72 | 0,0864 | 0,453 |
| nC ₅ H ₁₂ | 0,15 | 72 | 0,108 | 0,566 |
| C ₆ H ₁₄ | 0,18 | 86 | 0,155 | 0,812 |
| TOTAL | 100 | / | 19,0532 | 100 |

La chaleur fournie par le four a été calculée selon la formule suivante [2] :

$$Q_f = LHV + H_f + H_a \quad (\text{II.2})$$

Où :

LHV : PCI, Pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible en Kcal/hr ;

Chapitre II

Hf : La chaleur sensible de gaz combustible en Kcal/hr

Ha : La chaleur sensible de l'air en Kcal/hr ;

Pour déterminer cette chaleur Qf, on doit calculer LHV, Hf, Ha.

Calcul du pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible (LHV) :

Le pouvoir calorifique (LHV) sera calculé comme suit :

$$\text{LHV} = \text{LHV}' * (\text{débit massique de combustible}) \quad (\text{II.3})$$

Où :

LHV' : Pouvoir calorifique du gaz combustible par rapport à 1Kg de ce gaz en Kcal/Kg.

Calcul de LHV' :

$$\text{LHV}' = \sum \text{Xi (massique)} * \text{PCI i} \quad (\text{II.4})$$

Xi massique : Composition massique de chaque composant de gaz combustible ;

PCI i : Pouvoir calorifique de chaque composant de gaz combustible à 0° C en kcal /Kg

Mi : Masse molaire de chaque composant en Kg/Kmole

Xi (molaire) : Composition molaire de chaque composant de gaz combustible.

$$\text{Xi(massique)} = \frac{\text{Xi (molaire)} * \text{Mi}}{\sum \text{Xi (molaire)} * \text{Mi}} \quad (\text{II.5})$$

Chapitre II

Tableau II.2 : Calculs le Pouvoir calorifique LHV pour (T100).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (molaire)* Mi | Xi% (massique) | PCli (Kcal/Kg) | Xi (massique)*PCli |
|------------|------------------|------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| N2 | 5,8 | 28 | 1,624 | 8,523 | 0 | 0 |
| He | 0,19 | 4 | 0,0076 | 0,0398 | 0 | 0 |
| CO2 | 0,21 | 44 | 0,0924 | 0,484 | 0 | 0 |
| H2O | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CH4 | 83 | 16 | 13,280 | 69,699 | 11957 | 8333,978 |
| C2H6 | 7,1 | 30 | 2,130 | 11,179 | 11355 | 1269,400 |
| C3H8 | 2,25 | 44 | 0,990 | 5,195 | 11075 | 575,454 |
| iC4H10 | 0,4 | 58 | 0,232 | 1,217 | 10890 | 132,601 |
| nC4H10 | 0,6 | 58 | 0,348 | 1,826 | 10940 | 199,815 |
| iC5H12 | 0,12 | 72 | 0,0864 | 0,453 | 10797 | 48,960 |
| nC5H12 | 0,15 | 72 | 0,108 | 0,566 | 10825 | 61,359 |
| C6H14 | 0,18 | 86 | 0,155 | 0,812 | 10825 | 87,949 |
| TOTAL | 100 | / | 19,0532 | 100 | / | 10709,520 |

Alors

$$\text{LHV}'_{100} = 10709,52023 \text{ kcal/kg}$$

Débit massique de combustible :

$$\text{Débit massique} = \text{débit molaire} * \text{masse volumique} \quad (\text{II.6})$$

(Le débit molaire et la masse volumique sont donnés)

| | |
|-----------------------|----------|
| P (masses volumiques) | 0,771 |
| Débit de GN (m3/h) | 2600,000 |
| Débit de GN (kg/h) | 2004,600 |

Alors

$$\text{LHV} = 10709,52023 * 2004,600 = 21468304 \text{ kcal/h}$$

Calcul de la chaleur sensible de gaz combustible (Hf) :

La chaleur sensible est la quantité de chaleur emmagasinée dans le combustible avant de subir une quelconque transformation ou réaction, elle dépend de la température du combustible [3].

Elle est calculée comme suit [4] :

$$H_f = H_f' * (\text{débit massique du combustible}) \quad (\text{II.7})$$

Où H_f' est la chaleur sensible spécifique du gaz combustible.

$$H_f' = \sum X_i (\text{masse}) * H_i \quad (\text{II.8})$$

Tableau II.3 : Calculs de (H_f') la chaleur sensible du gaz combustible (T100).

| Composants | H_i (Kj/Kg) | $H_i * X_i$ |
|------------|---------------|-------------|
| N2 | 19,711 | 1,680 |
| He | 0 | 0 |
| CO2 | 16,634 | 0,0806 |
| H2O | 35,278 | 0 |
| CH4 | 44,144 | 30,768 |
| C2H6 | 33,932 | 3,793 |
| C3H8 | 32,254 | 1,675 |
| iC4H10 | 32,174 | 0,391 |
| nC4H10 | 32,926 | 0,601 |
| iC5H12 | 31,501 | 0,142 |
| nC5H12 | 32,0519 | 0,181 |
| C6H14 | 31,675 | 0,257 |
| TOTAL | / | 39,573 |

$$H_f' = 39.57388 \text{ kj/kg} = 39.57388 / 4.18 = 9.467 \text{ kcal/kg}$$

$$H_f = 9.467 * 2004,600 = 18978.42 \text{ kcal/h}$$

Calcul de la chaleur sensible d'air (H_a) :

La chaleur sensible de l'air sera calculée suivant la formule [4] :

$$H_a = H_a' * (\text{débit massique d'air}) \quad (\text{II.9})$$

$$H_a' = \sum X_i (\text{masse}) H_i \quad (\text{II.10})$$

Avec

X_i (masse) : fraction massique de composant dans l'air ;

H_i : enthalpie des composés de l'air entre la température de référence 0°C et la température à l'entrée du four (T).

Chapitre II

On note que les H_i ont été déjà donnés

Tableau II.4 : Les Calculs de ($H'a$) la chaleur sensible d'air (T_{100}).

| Composants | $X_i\%$ (molaire) | M_i (Kg/Kmole) | X_i (molaire) * M_i | $X_i\%$ (massique) | H_i (kj/kg) | X_i*H_i (kj/kg) |
|----------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------|---------------|----------------------|
| N ₂ | 79 | 28 | 22,12 | 76,699 | 19,711 | 15,118 |
| O ₂ | 21 | 32 | 6,72 | 23,300 | 17,350 | 4,0427 |
| TOTAL | 100 | / | 28,84 | 100 | / | 19,161 |

$$H_a' = 19,161 \text{ kj/kg} = 4,583971292 \text{ kcal/kg}$$

Calcul du débit massique d'air :

$$\text{Débit massique d'air} = [Q_v \text{ air} * M (\text{air})] / 22.4 \quad (\text{II.11})$$

Avec

$$Q_v \text{ air} = \text{débit volumique d'air entrant dans le four} + \text{l'humidité d'air entrant} \quad (\text{II.12})$$

Avec

$$\text{Débit volumique d'air entrant dans le four} = (\text{débit molaire d'air}) * V_m \quad (\text{II.13})$$

$$V_m = \text{volume molaire} = 22.4$$

$$\text{Débit molaire d'air} = \text{débit molaire de O}_2 / 0.21 \quad (\text{II.14})$$

L'humidité contenue dans l'air entrant est égale à 579,458 m³/h

Les principales réactions chimiques intervenant lors de la combustion au niveau du four

Sont:



Tableau II.5. Les débits d'O₂ de la combustion dans la stœchiométrie (T100)

| Composants | Nombre de moles (Kmol/h) | O ₂ de la combustion |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| N ₂ | 5,471 | 0 |
| He | 0 | 0 |
| CO ₂ | 0,22 | 2 |
| H ₂ O | 0 | 0 |
| CH ₄ | 83,783 | 140,686 |
| C ₂ H ₆ | 7,792 | 71,981 |
| C ₃ H ₈ | 1,863 | 18,0015 |
| iC ₄ H ₁₀ | 0,255 | 1,411 |
| nC ₄ H ₁₀ | 0,386 | 2,249 |
| iC ₅ H ₁₂ | 0,075 | 0,579 |
| nC ₅ H ₁₂ | 0,084 | 0,381 |
| C ₆ H ₁₄ | 0,071 | 0 |
| Total | 94,309 | 237,290 |

Débit molaire de O₂ = 237,29044 kmol/h

Débit molaire d'air = débit molaire de O₂ / 0.21 = 237.29044 / 0.21 = 1129,954 kmol/h

Débit volumique d'air entrant dans le four = (débit molaire d'air) * V_m

Débit volumique d'air entrant dans le four = 1129,954 * 22.4 = 25310,98 m³/h

Alors

Q_v air (m³/h) = débit volumique d'air entrant dans le four + l'humidité d'air entrant

Q_v air = 25310,98 + 579,458 = 25890,44 m³/h = 1155,823 kmol/h

Q_v air (kg/h) = 1155,823 * 28.84 = 33333,94 kg/h

Alors : H_a = 33333,94 * 4,583971292 = 152801,8 kcal/h

Donc

$$Q_f = LHV + H_f + H_a = 21468304 + 18978.42 + 152801,8 = 21640084 \text{ kcal/h}$$

II.3.2. Calcul de la chaleur sensible des gaz brûlés (Q_{brûlés100}) [5]

$$Q_{\text{brûlés100}} = Q'_{\text{brûlés100}} * (\text{débit massique des gaz brûlés}) \quad (\text{II.15})$$

Q_{brûlés} : la chaleur des gaz brûlés en Kcal/h.

Q'_{brûlés} : la chaleur des gaz brûlés calculée par rapport à 1Kg des gaz brûlés

Calcul de la chaleur sensible des gaz brûlés :

$$Q'_{\text{brûlés100}} = \sum X_i \text{ massique} * H_i \quad (\text{II.16})$$

X_i massique : fractions massiques des gaz brûlés ;

H_i : enthalpie de composant des gaz brûlés calculée à la température T_g.

Tableau II.6. Les calculs du Q'_{Brûlés} (T₁₀₀)

| Gaz brûlés | Débit molaire (Kmol/h) | X _i %(mol) | M _i (Kg/kmol) | M _i *X _i | X _i %(mass) | H _i (kj/Kg) | X _i *H _i |
|------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| O ₂ | 35,81 | 2,52 | 32 | 0,806 | 2,884 | 945,272 | 27,2641 |
| N ₂ | 1024 | 72,84 | 28 | 20,395 | 72,947 | 1021,824 | 745,398 |
| CO ₂ | 125,68 | 8,93 | 44 | 3,929 | 14,0536 | 1053,919 | 148,114 |
| H ₂ O | 220,75 | 15,71 | 18 | 2,827 | 10,114 | 1948,985 | 197,125 |
| TOTAL | 1406,3 | 100 | 122 | 27,958 | 100 | / | 1117,902 |

Alors

$$Q'_{\text{brûlés}} = 1117,902 \text{ kJ/kg} / 4.18 = 267,4407 \text{ kcal/kg}$$

Débit massique des gaz brûlés :

$$\text{Débit massique des gaz brûlés} = \text{débit molaire (Kmol/h)} * (M_i * X_i)$$

$$= 1406,3 * 27,9586 = 39317,21 \text{ kg/h}$$

$$Q_{\text{brûlés100}} = 267,4407 * 39317,21 = 10515021 \text{ kcal/h}$$

II.3.3. Calcul de la chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation (Qabs100)

La quantité de chaleur absorbée par l'huile TORADA est donnée par l'expression suivante [6] :

$$dQ_{abs} = Q_m * (C_p \text{ huile}) * dT \quad (\text{II.17})$$

$$dQ_{abs} = P_{huile} Q_v C_p \text{ huile } dT$$

$$dQ_{abs} = P_{huile} Q_v (0.435 + 0.000866 T) dT$$

$$Q_{abs} = P_{huile} Q_v \int 0.435 T + 0.000433 * T^2 \quad (\text{II.18})$$

Avec

P_{huile} : Masse volumique d'huile en g/cm^3 calculée à la température de sortie du four car la mesure du débit volumique d'huile a été prise à la sortie du four

Q_v : Débit volumique d'huile en m^3/hr

Q_m : Débit massique d'huile en Kg/hr ;

C_p : Capacité calorifique d'huile en $Kcal/Kg \text{ } ^\circ C$

On a

$$Q_v \text{ donné} = 1200 m^3/h$$

$$C_p = 0,583 \text{ Kcal/Kg}^\circ C$$

$$P_{huile} = 780 kg/m^3$$

$$T_{e \text{ rad}} = 155 \text{ } ^\circ C$$

$$T_{s \text{ rad}} = 170 \text{ } ^\circ C$$

$$Dt = 15$$

Alors

$$Q_m = 1200 * 780 = 936000 kg/h$$

$$Q_{abs} = Q_m * c_p * dt = 936000 * 0.583 * 15 = 8185320 \text{ kcal/h}$$

Chapitre II

Donc : Le rendement est calculé par :

$$\eta = \frac{8185320}{(21640084 - 10515021)}$$

$$\eta_{100} = 73.58 \%$$

❖ Train 200

II.3.4. Calcul de la chaleur globale fournie par le four (Qf 200)

Tous les calculs au niveau du ce train seront faits d'une façon brève car toutes ses méthodologies de calcul sont identiques à celles de train100.

Tableau II.7. Calculs le Pouvoir calorifique LHV pour (T200).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (molaire)* Mi | Xi %(massique) | PCli (Kcal/Kg) | Xi (Massique)*PC li |
|------------|------------------|------------------|------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| N2 | 5,469 | 28 | 1,531 | 8,1759 | 0 | 0 |
| He | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CO2 | 0,224 | 44 | 0,0985 | 0,526 | 0 | 0 |
| H2O | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CH4 | 83,804 | 16 | 13,408 | 71,590 | 11957 | 8560,119 |
| C2H6 | 7,795 | 30 | 2,338 | 12,485 | 11355 | 1417,742 |
| C3H8 | 1,851 | 44 | 0,814 | 4,3484 | 11075 | 481,588 |
| iC4H10 | 0,252 | 58 | 0,146 | 0,780 | 10890 | 84,982 |
| nC4H10 | 0,381 | 58 | 0,220 | 1,179 | 10940 | 129,0753 |
| iC5H12 | 0,073 | 72 | 0,0525 | 0,280 | 10797 | 30,299 |
| nC5H12 | 0,082 | 72 | 0,0590 | 0,315 | 10825 | 34,1229 |
| C6H14 | 0,069 | 86 | 0,0593 | 0,316 | 10825 | 34,296 |
| TOTAL | 100 | / | 18,729 | 100 | / | 10772,227 |

Alors

$$\text{LHV}' = 10772,227 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Avec le débit du combustible} = 1707,444 \text{ kg/h}$$

$$\text{LHV} = 10772,227 * 1707,444 = 18392974,35 \text{ kcal/h}$$

Chapitre II

Calcul de Hf :

Tableau II.8. Calculs de la chaleur sensible du gaz combustible (T200).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (molaire)* Mi | Xi%(massique) | Hi (KJ/Kg) | Hi*Xi |
|------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------|---------------|--------|
| N2 | 5,469 | 28 | 1,531 | 8,175 | 19,711 | 1,6115 |
| He | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CO2 | 0,224 | 44 | 0,0985 | 0,526 | 16,634 | 0,0875 |
| H2O | 0 | 18 | 0 | 0 | 35,278 | 0 |
| CH4 | 83,804 | 16 | 13,408 | 71,590 | 44,144 | 31,603 |
| C2H6 | 7,795 | 30 | 2,338 | 12,485 | 33,932 | 4,236 |
| C3H8 | 1,851 | 44 | 0,814 | 4,348 | 32,254 | 1,402 |
| iC4H10 | 0,252 | 58 | 0,146 | 0,780 | 32,174 | 0,251 |
| nC4H10 | 0,381 | 58 | 0,220 | 1,1798 | 32,926 | 0,388 |
| iC5H12 | 0,073 | 72 | 0,0525 | 0,280 | 31,501 | 0,0884 |
| nC5H12 | 0,082 | 72 | 0,05904 | 0,315 | 32,0519 | 0,101 |
| C6H14 | 0,069 | 86 | 0,05934 | 0,316 | 31,675 | 0,100 |
| TOTAL | 100 | / | 18,729 | 100 | | 39,871 |

$$H'f = 39,87139 \text{ kj/kg} = 9,539 \text{ kcal/kg}$$

$$Hf = 9.539 * 1707.444 = 16286,64125 \text{ kcal/h}$$

Calcul de Ha :

Tableau II.9. Les Calculs de (H'a) la chaleur sensible d'air(T200).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (molaire)* Mi | Xi%(massique) | Hi (kJ/kg) | Xi*Hi (kJ/kg) |
|------------|------------------|------------------|------------------------|---------------|---------------|------------------|
| N2 | 79 | 28 | 22,12 | 76,699 | 19,711 | 15,118 |
| O2 | 21 | 32 | 6,72 | 23,300 | 17,350 | 4,0427 |
| TOTAL | 100 | / | 28,84 | 100 | / | 19,161 |

$$H'a = 19.161 \text{ kj/k} = 4,583971292 \text{ kcal/kg}$$

Chapitre II

Tableau II.10 : Débits de l'O₂ de la combustion dans la stœchiométrie (T200).

| Composants | Nombre de moles (Kmol/h) | O ₂ de la combustion |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| N ₂ | 5,566 | 0 |
| He | 0 | 0 |
| CO ₂ | 0,263 | 0 |
| H ₂ O | 0 | 0 |
| CH ₄ | 83,202 | 142,05 |
| C ₂ H ₆ | 7,622 | 51,52 |
| C ₃ H ₈ | 1,692 | 31,7 |
| iC ₄ H ₁₀ | 0,140 | 2,852 |
| nC ₄ H ₁₀ | 0,455 | 5,2 |
| iC ₅ H ₁₂ | 0,0887 | 0,123 |
| nC ₅ H ₁₂ | 0,1 | 0,269 |
| C ₆ H ₁₄ | 0,870 | 0 |
| Total | 100 | 233,714 |

Débit molaire de O₂ = 233,714 kmol/h

Débit molaire d'air = débit molaire de O₂ / 0.21 = 233,714 / 0.21 = 1112,92381 kmol/h

Débit volumique d'air entrant dans le four = (débit molaire d'air) * V_m

Débit volumique d'air entrant dans le four = 1112,92381 * 22.4 = 24929,49333 m³/h

Alors :

Q_v air (m³/h) = débit volumique d'air entrant dans le four + l'humidité d'air entrant

Q_v air = 24929,49333 + 579,458 = 25508,95133 m³/h = 1138,79247 kmol/h

Q_v air (kg/h) = 1138,79247 * 28.84 = 32842,77484 kg/h

Alors : H_a = 32842,77484 * 4,583971292 = 150550,337 kcal/h

Donc :

$$Q_f = LHV + H_f + H_a = 18392974,35 + 16286,64125 + 150550,337$$

$$Q_f 200 = 21640084 \text{ kcal/h}$$

Chapitre II

II.3.5. Calcul de de la chaleur sensible des gaz brûlés (Q Brûlés 200)

Tableau II.11. Calculs du Q Brûlés (T200).

| Gaz Brûlés | Débit molaire (Kmol/h) | Xi%(mol) | Mi (kg/kmol) | Mi*Xi | Xi%(mass) | Hi (kj/Kg) | Xi*Hi |
|------------|------------------------|----------|--------------|--------|-----------|------------|----------|
| O2 | 34,362 | 2,01 | 32 | 0,643 | 2,355 | 945,272 | 22,266 |
| N2 | 1045,011 | 72,015 | 28 | 20,164 | 73,845 | 1021,824 | 754,568 |
| CO2 | 122,365 | 7,012 | 44 | 3,0852 | 11,298 | 1053,92 | 119,0813 |
| H2O | 236,056 | 18,963 | 18 | 3,413 | 12,500 | 1948,985 | 243,629 |
| TOTAL | 1437,794 | 100 | 122 | 27,306 | 100 | / | 1139,545 |

$$Q'_{\text{brûlés200}} = 1139,545 \text{ kJ/kg} = 272,6185153 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Débit massique des gaz brûlés} = 1437,794 * 27,30602 = 39317,21 \text{ kg/h}$$

$$Q_{\text{brûlés200}} = 267,4407 * 39260,43172 = 10203120,61 \text{ kcal/h}$$

II.3.6. Calcul de la chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation (Qabs 200)

On a

$$Q_v \text{ donné} = 1200 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_p = 0,583 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$P \text{ huile} = 668 \text{ kg/m}^3$$

$$T_e \text{ rad} = 101 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s \text{ rad} = 116 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Dt = 15$$

Alors

$$Q_m = 1200 * 668 = 801600 \text{ kg/h}$$

$$Q_{\text{abs}} = Q_m * c_p * dt = 801600 * 0.583 * 15 = 11009992 \text{ kcal/h}$$

Chapitre II

Le rendement est calculé par :

$$\eta = \frac{11009992}{(21640084 - 10703120,61)}$$

| |
|---------------------------------------|
| η 200 = 89,22% |
|---------------------------------------|

Tableau II.12 : Tableau récapitulatif des rendements de la phase I

| Train | Train100 | Train200 |
|--|-----------------|-----------------|
| Te rad (°C) | 155 | 101 |
| Ts rad (°C) | 170 | 116 |
| Qf (kcal/h) | 21640084,49 | 18559811,33 |
| Q brûlés (kcal/h) | 10515021,31 | 10203120,61 |
| Qabs (kcal/h) | 8185320 | 11009992 |
| Rendement (η) (%) | 73,575 | 89,223 |

Les résultats du tableau II.12 montrent que le train 200 est plus efficace que le train 100. La quantité de chaleur absorbée par l'huile (Qabs) pour le train 200 est supérieure à celle du train 100. Donc on peut dire que le train 100 fournit plus d'énergie (Q Brûlés), ce qui signifie la présence de coke dans le train100.

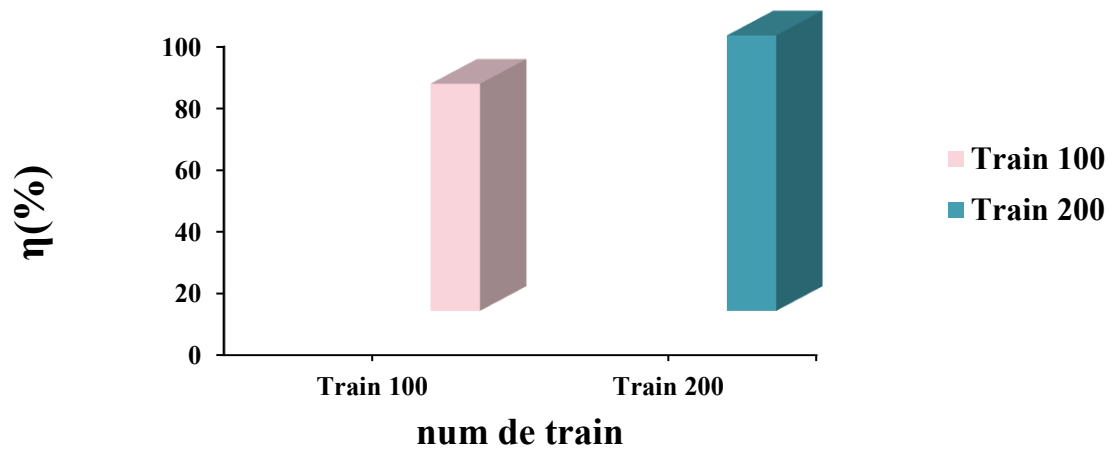


Figure II.1. Présentation du rendement η (%) en fonction des trains 100 et 200

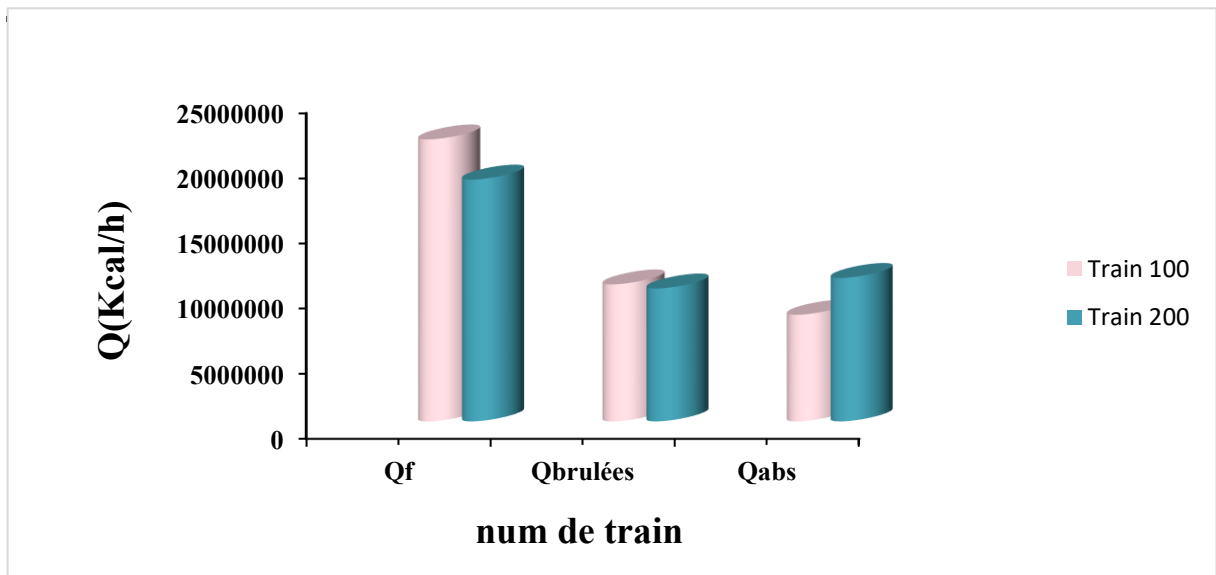


Figure II.2. Présentation des énergies en fonction des trains 100 et 200

II.4. Calcul du rendement dans la phase II

II.4.1. Introduction

Pour améliorer nos calculs, nous avons choisi les trains 400 et 500 de la phase II car toutes les informations techniques sur ces deux trains étaient disponibles.

Le calcul du rendement se fera d'une façon bien détaillée sur le train400 et au niveau du second train.

❖ Train 400

II.4.2. Calcul de la chaleur globale fournie par le four (Qf400)

Détermination de la composition de gaz combustible (train400) :

La composition du combustible au niveau de la phase II a été prise par le chromatographe en ligne.

Tableau II. 13. Détermination de la composition de gaz combustible (T400).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (molaire)* Mi | Xi%(massique) |
|------------|---------------|---------------|------------------|---------------|
| N2 | 5,66 | 28 | 1,584 | 8,434 |
| He | 0 | 4 | 0 | 0 |
| CO2 | 0,23 | 44 | 0,101 | 0,538 |
| H2O | 0 | 18 | 0 | 0 |
| CH4 | 83,56 | 16 | 13,369 | 71,156 |
| C2H6 | 7,7 | 30 | 2,31 | 12,294 |
| C3H8 | 1,92 | 44 | 0,844 | 4,496 |
| iC4H10 | 0,27 | 58 | 0,156 | 0,833 |
| nC4H10 | 0,43 | 58 | 0,249 | 1,327 |
| iC5H12 | 0,09 | 72 | 0,0648 | 0,344 |
| nC5H12 | 0,09 | 72 | 0,0648 | 0,344 |
| C6H14 | 0,05 | 86 | 0,043 | 0,228 |
| TOTAL | 100 | / | 18,789 | 100 |

La chaleur fournie par le four a été calculée selon la formule suivante :

$$Q_f = LHV + H_f + H_a$$

Où

LHV : PCI, Pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible en Kcal/h ;

Hf : La chaleur sensible de gaz combustible en Kcal/h

Ha : La chaleur sensible de l'air en Kcal/h ;

Pour déterminer cette chaleur Qf, on doit calculer LHV, Hf, Ha.

Calcul du pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible (LHV) :

Le pouvoir calorifique (LHV) sera calculé comme suit :

$$\text{LHV} = \text{LHV}' * (\text{débit massique de combustible})$$

Calcul de LHV' :

$$\text{LHV}' = \sum \text{Xi (massique)} * \text{PCI i}$$

Xi massique : Composition massique de chaque composant de gaz combustible ;

PCI i : Pouvoir calorifique de chaque composant de gaz combustible à 0° C en kcal /Kg

$$\text{Xi (massique)} = \frac{\text{Xi (molaire)} * \text{Mi}}{\sum \text{Xi (molaire)} * \text{Mi}}$$

Chapitre II

Tableau II.14 : Calculs le Pouvoir calorifique pour LHV pour (T400).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (Molaire)* Mi | Xi% (massique) | PCli (Kcal/Kg) | Xi (Massique)*PCl i |
|------------|----------------------|----------------------|------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| N2 | 5,66 | 28 | 1,584 | 8,434 | 0 | 0 |
| He | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CO2 | 0,23 | 44 | 0,101 | 0,538 | 0 | 0 |
| H2O | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CH4 | 83,56 | 16 | 13,369 | 71,156 | 11957 | 8508,186 |
| C2H6 | 7,7 | 30 | 2,31 | 12,294 | 11355 | 1396,0322 |
| C3H8 | 1,92 | 44 | 0,844 | 4,496 | 11075 | 497,959 |
| iC4H10 | 0,27 | 58 | 0,156 | 0,833 | 10890 | 90,764 |
| nC4H10 | 0,43 | 58 | 0,249 | 1,327 | 10940 | 145,214 |
| iC5H12 | 0,09 | 72 | 0,0648 | 0,344 | 10797 | 37,236 |
| nC5H12 | 0,09 | 72 | 0,0648 | 0,344 | 10825 | 37,333 |
| C6H14 | 0,05 | 86 | 0,043 | 0,228 | 10825 | 24,773 |
| TOTAL | 100 | / | 18,789 | 100 | / | 10737,501 |

Alors

$$\text{LHV}'_{400} = 10737,50108 \text{ kcal/kg}$$

Débit massique de combustible :

$$\text{Débit massique} = \text{débit molaire} * \text{masse volumique}$$

(Le débit molaire et la masse volumique sont donnés)

| | |
|---------------------|----------|
| P (masse volumique) | 0,778 |
| Débit de GN (m3/h) | 2556,000 |
| Débit de GN (kg/h) | 2013,157 |

Alors

$$\text{LHV} = 10737,50108 * 2013,157 = 21616272,46 \text{ kcal/h}$$

Chapitre II

Calcul de la chaleur sensible de gaz combustible (Hf) :

La chaleur sensible est la quantité de chaleur emmagasinée dans le combustible avant de subir une quelconque transformation ou réaction, elle dépend de la température du combustible.

Elle est calculée comme suit :

$$H_f = H_f' * (\text{débit massique du combustible})$$

Où H_f' est la chaleur sensible spécifique du gaz combustible.

$$H_f' = \sum X_i (\text{masse}) * H_i$$

Tableau II. 15 : Calculs de la chaleur sensible du gaz combustible (T400).

| Composants | H_i (KJ/Kg) | $H_i * X_i$ (massique) |
|------------|---------------|------------------------|
| N2 | 19,711 | 1,662 |
| He | 0 | 0 |
| CO2 | 15,793 | 0,0850 |
| H2O | 35,278 | 0 |
| CH4 | 41,917 | 29,826 |
| C2H6 | 32,200 | 3,958 |
| C3H8 | 30,601 | 1,375 |
| iC4H10 | 30,521 | 0,254 |
| nC4H10 | 31,238 | 0,414 |
| iC5H12 | 29,878 | 0,103 |
| nC5H12 | 30,403 | 0,104 |
| C6H14 | 30,0455 | 0,0687 |
| TOTAL | / | 37,854 |

$$H_f' = 37,8549213 \text{ kJ/kg} = 37,8549213 / 4.18 = 9,056 \text{ kcal/kg}$$

Alors

$$H_f = 9,056 * 2013,157 = 18231,55244 \text{ kcal/h}$$

Calcul de la chaleur sensible d'air (Ha) :

La chaleur sensible de l'air sera calculée suivant la formule :

$$H_a = H_a' * (\text{débit massique d'air})$$

$$H_a' = \sum X_i (\text{masse}) * H_i$$

Chapitre II

Avec

X_i (masse) : fraction massique de composant dans l'air ;

H_i : enthalpie des composés de l'air entre la température de référence 0°C et la température à l'entrée du four (T).

On note que les H_i ont été déjà donnés

Tableau II.16 : Calculs de la chaleur sensible d'air (T400).

| Composants | $X_i\%$ (molaire) | M_i (Kg/Kmole) | X_i (molaire)* M_i | $X_i\%$ (massique) | H_i (kj/kg) | X_i*H_i (kj/kg) |
|------------|----------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|------------------|----------------------|
| N2 | 79 | 28 | 22,12 | 76,699 | 19,711 | 15,118 |
| O2 | 21 | 32 | 6,72 | 23,300 | 17,350 | 4,0427 |
| TOTAL | 100 | / | 28,84 | 100 | / | 19,161 |

$$H_a' = 19,161 \text{ kj/kg} = 4,583971292 \text{ kcal/kg}$$

Calcul du débit massique d'air :

$$\text{Débit massique d'air} = [Q_v \text{ air} * M (\text{air})] / 22.4$$

Avec

$Q_v \text{ air}$ = débit volumique d'air entrant dans le four + l'humidité d'air entrant en (Nm³/h).

Débit volumique d'air entrant dans le four = (débit molaire d'air) * V_m

V_m = volume molaire = 22.4

Débit molaire d'air = débit molaire de O₂ / 0.21

L'humidité contenue dans l'air entrant est égale à 579,458 m³/h

Chapitre II

Tableau II.17 : Débits de l'O₂ de la combustion dans la stœchiométrie (T400).

| Composants | Nombre de moles (Kmol/h) | O ₂ de la combustion |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| N ₂ | 5,471 | 0 |
| He | 00 | 0 |
| CO ₂ | 0,22 | 0 |
| H ₂ O | 0 | 0 |
| CH ₄ | 83,783 | 116,3 |
| C ₂ H ₆ | 7,792 | 139,1 |
| C ₃ H ₈ | 1,863 | 29,2 |
| iC ₄ H ₁₀ | 0,255 | 0 |
| nC ₄ H ₁₀ | 0,386 | 1,098 |
| iC ₅ H ₁₂ | 0,075 | 0 |
| nC ₅ H ₁₂ | 0,084 | 0 |
| C ₆ H ₁₄ | 0,071 | 0 |
| Total | 94,309 | 285,698 |

Débit molaire de O₂ = 285,698 kmol/h

Débit molaire d'air = débit molaire de O₂ / 0.21 = 285,698 / 0.21 = 1360,466667 kmol/h

Débit volumique d'air entrant dans le four = (débit molaire d'air) * V_m

Débit volumique d'air entrant dans le four = 1360,466667 * 22.4 = 30474,4533 m³/h

Alors

Q_v air (m³/h) = débit volumique d'air entrant dans le four + l'humidité d'air entrant

Q_v air = 30474,45 + 579,458 = 31053,911 m³/h = 1386,335 kmol/h

Q_v air (kg/h) = 1386,335 * 28.84 = 39981,911 kg/h

Alors

H_a = 39981,911 * 4,583971292 = 183275,93 kcal/h

Donc :

$$Q_f = LHV + H_f + H_a = 21616272,46 + 18231,552 + 183275,93 = 21817779,94 \text{ kcal/h}$$

II.4.3. Calcul de la chaleur sensible des gaz brûlés (Qbrûlés400)

$$Q_{brûlés400} = Q'_{brûlés100} * (\text{débit massique des gaz brûlés})$$

Qbrûlés : la chaleur des gaz brûlés en Kcal/h.

Q'brûlés : la chaleur des gaz brûlés calculée par rapport à 1Kg des gaz brûlés

Calcul de la chaleur sensible des gaz brûlés

$$Q'_{brûlés400} = \sum X_i \text{ massique} * H_i$$

Xi massique : fractions massiques des gaz brûlés ;

Hi : enthalpie de composant des gaz brûlés calculée à la température Tg.

Tableau II.18 : Calculs de la chaleur des gaz brûlés (T400).

| Gaz brûlés | Débit molaire (Kmol/h) | Xi%(mol) | Mi (kg/kmol) | Mi*Xi | Xi%(mass) | Hi (kj/Kg) | Xi*Hi |
|------------|------------------------|----------|--------------|--------|-----------|------------|----------|
| O2 | 37,381 | 2,453 | 32 | 0,784 | 2,619 | 945,272 | 24,759 |
| N2 | 1036,0221 | 64,213 | 28 | 17,979 | 59,996 | 1021,824 | 613,0581 |
| CO2 | 124,125 | 20,012 | 44 | 8,805 | 29,382 | 1053,92 | 309,667 |
| H2O | 249,326 | 13,322 | 18 | 2,397 | 8,001 | 1948,985 | 155,953 |
| TOTAL | 1446,854 | 100 | 122 | 29,967 | 100 | / | 1103,438 |

$$Q'_{brûlés} = 1103,44 \text{ kj/kg} / 4.18 = 263,98 \text{ kcal/kg}$$

Débit massique des gaz brûlés :

$$\text{Débit massique des gaz brûlés} = \text{débit molaire (Kmol/h)} * (\text{Mi} * \text{Xi}) = 1446,854 * 29,967 = 43359,104 \text{ kg/h}$$

$$Q_{brûlés400} = 263,98 * 43359,104 = 11445960,76 \text{ kcal/h}$$

II.4.4. Calcul de la chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation (Qabs400)

La quantité de chaleur absorbée par l'huile TORADA est donnée par l'expression suivante :

Chapitre II

$$dQ_{abs} = Q_m * (C_p \text{ huile}) * dT$$

$$dQ_{abs} = P_{huile} Q_v C_p \text{ huile } dT$$

$$dQ_{abs} = P_{huile} Q_v (0.435 + 0.000866 T) dT$$

$$Q_{abs} = P_{huile} Q_v \int 0.435 T + 0.000433 * T^2$$

Avec

Phuile : Masse volumique d'huile en g/cm³ qui sera calculée à la température de sortie du four car la mesure du débit volumique d'huile a été prise à la sortie du four

Qv : Débit volumique d'huile en m³/h

Qm : Débit massique d'huile en Kg/h ;

Cp : Capacité calorifique d'huile en Kcal/Kg °C

On a

$$Q_v \text{ donné} = 1300 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_p = 0,583 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{huile}} = 769.1 \text{ kg/m}^3$$

$$T_{e \text{ rad}} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{s \text{ rad}} = 163 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Dt = 13$$

Alors

$$Q_m = 1300 * 769.1 = 999830 \text{ kg/h}$$

$$Q_{abs} = Q_m * c_p * dt = 999830 * 0.583 * 13 = 7577711,57 \text{ kcal/h}$$

Le rendement est calculé par :

$$\eta = \frac{7577711,57}{(21817779,94 - 11445960,76)}$$

| |
|-------------------------|
| $\eta_{400} = 73,06 \%$ |
|-------------------------|

❖ Train500

Détermination de la composition de gaz combustible (train500) :

La même méthode de calculs comme le train 400

Tableau II.19 : Détermination de la composition de gaz combustible (T500).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (molaire)* Mi | Xi%(massique) |
|------------|---------------|---------------|------------------|---------------|
| N2 | 5,471 | 28 | 1,531 | 8,174 |
| He | 0 | 4 | 0 | 0 |
| CO2 | 0,22 | 44 | 0,0968 | 0,516 |
| H2O | 0 | 18 | 0 | 0 |
| CH4 | 83,783 | 16 | 13,405 | 71,538 |
| C2H6 | 7,792 | 30 | 2,337 | 12,474 |
| C3H8 | 1,863 | 44 | 0,819 | 4,374 |
| iC4H10 | 0,255 | 58 | 0,147 | 0,789 |
| nC4H10 | 0,386 | 58 | 0,223 | 1,194 |
| iC5H12 | 0,075 | 72 | 0,054 | 0,288 |
| nC5H12 | 0,084 | 72 | 0,0604 | 0,322 |
| C6H14 | 0,071 | 86 | 0,0610 | 0,325 |
| TOTAL | 100 | / | 18,738 | 100 |

II.4.5. Calcul de la chaleur globale fournie par le four (Qf 500)

$$Q_f = LHV + H_f + H_a$$

Où

LHV : PCI, Pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible en Kcal/h ;

H_f : La chaleur sensible de gaz combustible en Kcal/h

H_a : La chaleur sensible de l'air en Kcal/h ;

Chapitre II

Tableau II.20 : calculs le Pouvoir calorifique LHV pour (T500).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (molaire)* Mi | Xi%(massique) | PCLi (Kcal/Kg) | Xi (massique)*PCLi |
|------------|------------------|------------------|------------------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| N2 | 5,471 | 28 | 1,531 | 8,174 | 0 | 0 |
| He | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CO2 | 0,22 | 44 | 0,0968 | 0,516 | 0 | 0 |
| H2O | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CH4 | 83,783 | 16 | 13,405 | 71,538 | 11957 | 8553,837 |
| C2H6 | 7,792 | 30 | 2,337 | 12,474 | 11355 | 1416,511 |
| C3H8 | 1,863 | 44 | 0,819 | 4,374 | 11075 | 484,475 |
| iC4H10 | 0,255 | 58 | 0,147 | 0,789 | 10890 | 85,952 |
| nC4H10 | 0,386 | 58 | 0,223 | 1,194 | 10940 | 130,705 |
| iC5H12 | 0,075 | 72 | 0,054 | 0,288 | 10797 | 31,114 |
| nC5H12 | 0,084 | 72 | 0,0604 | 0,322 | 10825 | 34,938 |
| C6H14 | 0,071 | 86 | 0,0610 | 0,325 | 10825 | 35,273 |
| TOTAL | 100 | / | 18,738 | 100 | / | 10772,809 |

$$\text{LHV}'_{500} = 10772,80942 \text{ kcal/kg}$$

Débit massique de combustible :

(Le débit molaire et la masse volumique sont donnés)

| | |
|---------------------------------|----------|
| p (masse volumique) | 0,788 |
| Débit de GN (m ³ /h) | 2700,000 |
| Débit de GN (kg/h) | 2126,574 |

$$\text{LHV} = 2126,574 * 10772,80942 = 22909176,43 \text{ kcal/h}$$

Calcul de la chaleur sensible de gaz combustible (Hf) :

Elle est calculée comme suit :

$$\text{Hf} = \text{Hf}' * (\text{débit massique du combustible})$$

Tableau II.21 : Calculs la chaleur sensible du gaz combustible pour (T500).

| Composants | Hi (KJ/Kg) | Hi* Xi (massique) |
|------------|------------|-------------------|
| N2 | 19,711 | 1,611 |
| He | 0 | 0 |
| CO2 | 15,793 | 0,0815 |
| H2O | 35,278 | 0 |
| CH4 | 41,917 | 29,986 |
| C2H6 | 32,200 | 4,0169 |
| C3H8 | 30,601 | 1,338 |
| iC4H10 | 30,521 | 0,240 |
| nC4H10 | 31,238 | 0,373 |
| iC5H12 | 29,878 | 0,0861 |
| nC5H12 | 30,403 | 0,0981 |
| C6H14 | 30,0455 | 0,0979 |
| TOTAL | / | 37,931 |

$$H'f = 37,93166073 \text{ kj/kg} = 37,93166073/4.18 = 9,075 \text{ kcal/kg}$$

$$Hf = 9,075 * 2126,574 = 19297,72 \text{ kcal/h}$$

Calcul de la chaleur sensible d'air (Ha) :

Tableau II. 22 : Calculs de la chaleur sensible d'air (T500).

| Composants | Xi% (molaire) | Mi (Kg/Kmole) | Xi (molaire)* Mi | Xi%(massique) | Hi (kj/kg) | Xi*Hi (kj/kg) |
|------------|------------------|------------------|------------------------|---------------|---------------|------------------|
| N2 | 79 | 28 | 22,12 | 76,699 | 19,711 | 15,118 |
| O2 | 21 | 32 | 6,72 | 23,300 | 17,350 | 4,0427 |
| TOTAL | 100 | / | 28,84 | 100 | / | 19,161 |

$$Ha' = 19,161 \text{ kj/kg} = 4,583971292 \text{ kcal/kg}$$

Calcul du débit massique d'air

L'humidité contenue dans l'air entrant est égale 579,458 m3/h

Tableau II.23 : Débits de l'O₂ de la combustion dans la stœchiométrie (T500).

| Composants | Nombre de moles (Kmol/hr) | O ₂ de la combustion |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| N ₂ | 5,471 | 0 |
| He | 0 | 0 |
| CO ₂ | 0,22 | 0 |
| H ₂ O | 0 | 0 |
| CH ₄ | 83,783 | 111,56 |
| C ₂ H ₆ | 7,792 | 131,565 |
| C ₃ H ₈ | 1,863 | 31,5 |
| iC ₄ H ₁₀ | 0,255 | 0 |
| nC ₄ H ₁₀ | 0,386 | 1,625 |
| iC ₅ H ₁₂ | 0,075 | 0 |
| nC ₅ H ₁₂ | 0,084 | 0 |
| C ₆ H ₁₄ | 0,071 | 0 |
| Total | 94,309 | 276,25 |

Débit molaire de O₂ = 276,25 kmol/h

Débit molaire d'air = 276,25 / 0,21 = 1315,476 kmol/h

Débit volumique d'air entrant dans le four = 1315,476 * 22,4 = 29466,67 m³/h

Alors

Q_v air (m³/h) = 29466,67 + 579,458 = 30046,12 m³/h = 1341,345 kmol/h

Q_v air (kg/h) = 1341,345 * 28,84 = 38684,39 kg/h

H_a = 38684,39 * 4,583971292 = 177328,1 kcal/h

$$Q_f = LHV + H_f + H_a = 22909176,43 + 19297,72 + 177328,1 = 20105802 \text{ kcal/h}$$

II.4.6. Calcul de la chaleur sensible des gaz brûlés (Q_{brûlés500})

$$Q_{\text{brûlés500}} = Q'_{\text{brûlés100}} * (\text{débit massique des gaz brûlés})$$

$$Q'_{\text{brûlés500}} = \sum X_i \text{ massique} * H_i$$

Tableau II.24 : Calculs de la chaleur sensible des gaz brûlés (T500).

| Gaz brûlés | Débit molaire (Kmol/h) | Xi%(mol) | Mi (kg/kmol) | Mi*Xi | Xi%(mass) | Hi (kj/Kg) | Xi*Hi |
|------------|------------------------|----------|--------------|---------|-----------|------------|----------|
| O2 | 35,380 | 2,476 | 32 | 0,792 | 2,850 | 945,272 | 26,945 |
| N2 | 1022,0221 | 71,679 | 28 | 20,0703 | 72,190 | 1021,824 | 737,656 |
| CO2 | 124,985 | 8,797 | 44 | 3,870 | 13,922 | 1053,919 | 146,736 |
| H2O | 244,563 | 17,0463 | 18 | 3,0683 | 11,0363 | 1948,985 | 215,0972 |
| TOTAL | 1426,951 | 100 | 122 | 27,802 | 100 | / | 1126,435 |

$$Q' \text{ brûlés} = 1126,43548 \text{ kJ/kg} / 4.18 = 269,4822 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Débit massique des gaz brûlés} = 1426,9515 * 27,80202 = 39672,13 \text{ kg/h}$$

$$\boxed{Q_{\text{brûlés500}} = 269,4822 * 39672,13 = 10690932 \text{ kcal/h}}$$

II.4.7. Calcul de la chaleur absorbée par l'huile dans la zone de radiation (Qabs500)

$$dQ_{\text{abs}} = Q_m * (C_p \text{ huile}) * dT$$

$$dQ_{\text{abs}} = P_{\text{huile}} Q_v C_p \text{ huile } dT$$

$$dQ_{\text{abs}} = P_{\text{huile}} Q_v (0.435 + 0.000866 T) dT$$

$$Q_{\text{abs}} = P_{\text{huile}} Q_v \int 0.435 T + 0.000433 * T^2$$

On a

$$T_{\text{e rad}} = 160 \text{ °C}, T_{\text{s rad}} = 180 \text{ °C}, Dt = 20, Q_v \text{ donné} = 1150 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_p = 0,583 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{huile}} = 769.1 \text{ kg/m}^3$$

Alors

$$Q_m = 1150 * 769.1 = 884465 \text{ kg/h}$$

$$Q_{\text{abs}} = 884465 * 0.583 * 20 = 10312862 \text{ kcal/h}$$

Le rendement est calculé par :

$$\eta = \frac{10312862}{(23105802 - 10690932)}$$

$$\boxed{\eta_{500} = 83,07 \%}$$

Tableau II.25 : Tableau récapitulatif des rendements de la phase II

| Train | Train400 | Train500 |
|-------------------------|-------------|-------------|
| Te rad (°C) | 150 | 160 |
| Ts rad (°C) | 163 | 180 |
| Qf (kcal/h) | 21817779,94 | 20105802,26 |
| Qbrûlés (kcal/h) | 11445960,76 | 10690932,12 |
| Qabs (kcal/h) | 7577711,57 | 10312861,9 |
| Rendement (η)(%) | 73,0605 | 83,0686 |

Les résultats du tableau (II.25) montrent que le train 500 est plus efficace que le train 400. La quantité de chaleur absorbée par l'huile (Qabs) pour le train 500 est supérieure à celle du train 400. Donc on peut dire que le train 400 fournit plus d'énergie (Q Brûlés), ce qui signifie la présence de coke dans ce dernier.

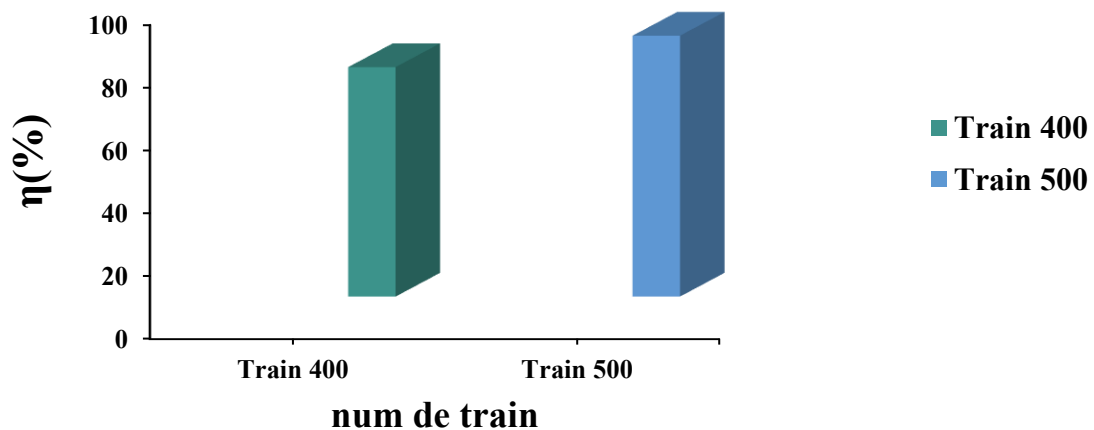


Figure II.3. Présentation du rendement η (%) en fonction des trains 400 et 500

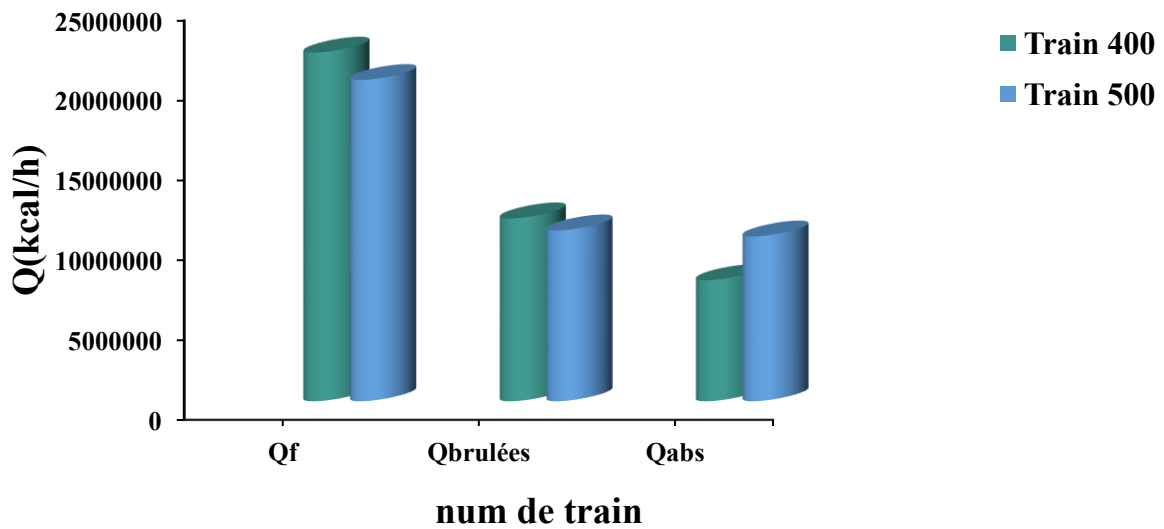


Figure II.4. Présentation des énergies en fonction des trains 400 et 500

II.5. Conclusion

En conclusion, l'étude comparative des rendements réalisée entre les deux phases I et II met en évidence des différences significatives de performance entre les trains étudiés. Au sein de la phase 1, le train 200 se distingue par un rendement supérieur à celui du train 100. De manière analogue, dans la phase II, le train 500 présente de meilleures performances que le train 400.

Ainsi, les résultats obtenus permettent d'identifier le train **200** et le train **500** comme étant les plus performants dans leurs phases respectives. Ces observations traduisent une amélioration globale des rendements et constituent une base pertinente pour l'analyse et l'optimisation des performances du système étudié.

BIBLIOGRAPHIE

[1] <https://www.techniques-ingenieur.fr/>

[2] Mullinger & Jenkins, *Industrial and Process Furnaces*, Elsevier. (2022)

[3] Reboux, P. & Marchio, D. *Introduction aux transferts thermiques*. Presses des Mines, Paris, (2023)

[4] Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. *Separation Process Principles* (4th ed.). Wiley. (2019).

[5] Turns, S. R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education. (2020).

[6] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (8th ed.). Wiley. (2021).

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été réalisé après avoir effectué un stage pratique qui a duré 1 mois au niveau du site Sonatrach complexe GP1/Z situé dans la région d'Arzew de la wilaya d'ORAN, Ceci nous a permis de mieux comprendre le processus industriel de traitement de gaz naturel et d'acquérir des compétences professionnelles.

Cette étude portant sur l'évaluation comparative du rendement thermique d'un four industriel selon ses différentes phases opérationnelles a permis de mettre en évidence des écarts significatifs de performance énergétique entre les conditions de fonctionnement analysées. Les résultats obtenus montrent clairement que le rendement thermique n'est pas constant, mais dépend fortement de la phase opérationnelle ainsi que des paramètres de conduite associés.

L'analyse comparative a révélé que le train 200, correspondant à la phase I, présente le rendement thermique le plus élevé pour cette phase, traduisant une meilleure utilisation de l'énergie fournie et des pertes thermiques réduites. De même, pour la phase II, le train 500 s'est distingué par des performances supérieures, confirmant que certaines configurations ou conditions d'exploitation permettent d'optimiser significativement l'efficacité énergétique du four.

Ces résultats mettent en évidence l'importance d'un pilotage adapté du four en fonction des phases opérationnelles, ainsi que la nécessité d'identifier et de reproduire les conditions optimales observées pour les trains les plus performants. Une telle démarche peut conduire à une amélioration globale du rendement thermique, à une réduction des consommations énergétiques et, par conséquent, à une diminution des coûts d'exploitation et de l'impact environnemental.

Enfin, cette étude ouvre des perspectives intéressantes pour des travaux futurs, notamment en approfondissant l'analyse des paramètres influençant le rendement thermique, en intégrant des outils de modélisation ou de simulation, et en explorant des stratégies d'optimisation en temps réel. L'objectif ultime étant d'atteindre un fonctionnement du four industriel à la fois performant, stable et économe en énergie.

Annexe train100

| Composants | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmole) | PCI_i (kcal/kg) | H_i (kJ/kg) |
|--|-------------------|------------------|-------------------|---------------|
| Azote (N ₂) | 5,8 | 28 | — | 19,7112 |
| Hélium (He) | 0,19 | 4 | — | 0 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 0,21 | 44 | — | 16,6347 |
| Eau (H ₂ O) | 0 | 18 | — | 35,2782 |
| Méthane (CH ₄) | 83 | 16 | 11 957 | 44,1448 |
| Éthane (C ₂ H ₆) | 7,1 | 30 | 11 355 | 33,9327 |
| Propane (C ₃ H ₈) | 2,25 | 44 | 11 075 | 32,2545 |
| i-Butane (iC ₄ H ₁₀) | 0,4 | 58 | 10 890 | 32,1748 |
| n-Butane (nC ₄ H ₁₀) | 0,6 | 58 | 10 940 | 32,9261 |
| i-Pentane (iC ₅ H ₁₂) | 0,12 | 72 | 10 797 | 31,5013 |
| n-Pentane (nC ₅ H ₁₂) | 0,15 | 72 | 10 825 | 32,0519 |
| Hexane (C ₆ H ₁₄) | 0,18 | 86 | 10 825 | 31,6756 |
| Total | 100 | — | — | — |

Annexe.1 : Composition, pouvoir calorifique et enthalpie des constituants du gaz naturel (train100)

| Composants | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmole) | H_i (kJ/kg) |
|---------------------------|-------------------|------------------|---------------|
| Azote (N ₂) | 79 | 28 | 19,7112 |
| Oxygène (O ₂) | 21 | 32 | 17,3501 |
| Total | 100 | — | — |

Annexe.2 : Composition de l'air de combustion (train100)

| Gaz brûlés | Débit molaire (kmol/h) | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmol) | H_i (kJ/kg) |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| Oxygène (O ₂) | 35,81 | 2,52 | 32 | 945,2726 |
| Azote (N ₂) | 1024 | 72,84 | 28 | 1021,824 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 125,68 | 8,93 | 44 | 1053,9198 |
| Vapeur d'eau (H ₂ O) | 220,75 | 15,71 | 18 | 1948,9851 |
| Total | 1406,3 | 100 | 122 | — |

Annexe.3 : Composition des gaz brûlés (train100)

| Composants | Nombre de moles (kmol/h) | O ₂ de combustion |
|--|--------------------------|------------------------------|
| Azote (N ₂) | 5,471 | 0 |
| Hélium (He) | — | 0 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 0,22 | 2 |
| Eau (H ₂ O) | — | 0 |
| Méthane (CH ₄) | 83,783 | 140,686 |
| Éthane (C ₂ H ₆) | 7,792 | 71,981 |
| Propane (C ₃ H ₈) | 1,863 | 18,0015 |
| i-Butane (iC ₄ H ₁₀) | 0,255 | 1,41124 |
| n-Butane (nC ₄ H ₁₀) | 0,386 | 2,2496 |
| i-Pentane (iC ₅ H ₁₂) | 0,075 | 0,5792 |
| n-Pentane (nC ₅ H ₁₂) | 0,084 | 0,3819 |
| Hexane (C ₆ H ₁₄) | 0,071 | 0 |
| Total | 94,309 | 237,29044 |

Annexe.4 : Nombre de moles et besoin en oxygène pour la combustion (train100)

Annexe train200

| Composants | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmole) | PCI_i (kcal/kg) | H_i (kJ/kg) |
|--|-------------------|------------------|-------------------|---------------|
| Azote (N ₂) | 5,469 | 28 | — | 19,7112 |
| Hélium (He) | 0 | 4 | — | 0 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 0,224 | 44 | — | 16,6347 |
| Eau (H ₂ O) | 0 | 18 | — | 35,2782 |
| Méthane (CH ₄) | 83,804 | 16 | 11 957 | 44,1448 |
| Éthane (C ₂ H ₆) | 7,795 | 30 | 11 355 | 33,9327 |
| Propane (C ₃ H ₈) | 1,851 | 44 | 11 075 | 32,2545 |
| i-Butane (iC ₄ H ₁₀) | 0,252 | 58 | 10 890 | 32,1748 |
| n-Butane (nC ₄ H ₁₀) | 0,381 | 58 | 10 940 | 32,9261 |
| i-Pentane (iC ₅ H ₁₂) | 0,073 | 72 | 10 797 | 31,5013 |
| n-Pentane (nC ₅ H ₁₂) | 0,082 | 72 | 10 825 | 32,0519 |
| Hexane (C ₆ H ₁₄) | 0,069 | 86 | 10 825 | 31,6756 |
| Total | 100 | — | — | — |

Annexe.1. : Composition molaire, pouvoir calorifique et enthalpie du gaz combustible (train200)

| Composants | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmole) | H_i (kJ/kg) |
|---------------------------|-------------------|------------------|---------------|
| Azote (N ₂) | 79 | 28 | 19,7112 |
| Oxygène (O ₂) | 21 | 32 | 17,3501 |
| Total | 100 | — | — |

Annexe.2. : Composition de l'air de combustion (train200)

| Gaz brûlés | Débit molaire (kmol/h) | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmol) | H_i (kJ/kg) |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| Oxygène (O ₂) | 34,362 | 2,01 | 32 | 945,2726 |
| Azote (N ₂) | 1045,011 | 72,015 | 28 | 1021,824 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 122,365 | 7,012 | 44 | 1053,92 |
| Vapeur d'eau (H ₂ O) | 236,056 | 18,963 | 18 | 1948,985 |
| Total | 1437,794 | 100 | 122 | — |

Annexe.3 : Composition des gaz brûlés (train200)

| Composants | Nombre de moles (kmol/h) | U_2 de combustion |
|--|--------------------------|---------------------|
| Azote (N ₂) | 5,566 | 0 |
| Hélium (He) | 0 | 0 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 0,263 | 0 |
| Eau (H ₂ O) | 0 | 0 |
| Méthane (CH ₄) | 83,2021 | 142,05 |
| Éthane (C ₂ H ₆) | 7,622 | 51,52 |
| Propane (C ₃ H ₈) | 1,692 | 31,7 |
| Total | — | — |

Annexe.4 : Nombre de moles et besoin en oxygène pour la combustion (train200)

Annexe train 400

| Composants | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmole) | PCI_i (kcal/kg) | H_i (kJ/kg) |
|--|-------------------|------------------|-------------------|---------------|
| Azote (N ₂) | 5,66 | 28 | — | 19,7112 |
| Hélium (He) | 0 | 4 | — | 0 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 0,23 | 44 | — | 15,7936 |
| Eau (H ₂ O) | 0 | 18 | — | 35,2782 |
| Méthane (CH ₄) | 83,56 | 16 | 11 957 | 41,9171 |
| Éthane (C ₂ H ₆) | 7,7 | 30 | 11 355 | 32,2007 |
| Propane (C ₃ H ₈) | 1,92 | 44 | 11 075 | 30,6018 |
| i-Butane (iC ₄ H ₁₀) | 0,27 | 58 | 10 890 | 30,5211 |
| n-Butane (nC ₄ H ₁₀) | 0,43 | 58 | 10 940 | 31,2381 |
| i-Pentane (iC ₅ H ₁₂) | 0,09 | 72 | 10 797 | 29,8784 |
| n-Pentane (nC ₅ H ₁₂) | 0,09 | 72 | 10 825 | 30,4036 |
| Hexane (C ₆ H ₁₄) | 0,05 | 86 | 10 825 | 30,0455 |
| Total | 100 | ↓ | — | — |

Annexe.1 : Composition molaire, pouvoir calorifique et enthalpie du gaz combustible (train400)

| Composants | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmole) | H_i (kJ/kg) |
|---------------------------|-------------------|------------------|---------------|
| Azote (N ₂) | 79 | 28 | 19,7112 |
| Oxygène (O ₂) | 21 | 32 | 17,3501 |
| Total | 100 | — | — |

Annexe.2 : Composition de l'air de combustion (train400)

| Gaz brûlés | Débit molaire (kmol/h) | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmol) | H_i (kJ/kg) |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| Oxygène (O ₂) | 37,381 | 2,453 | 32 | 945,2726 |
| Azote (N ₂) | 1036,0221 | 64,213 | 28 | 1021,824 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 124,1254 | 20,012 | 44 | 1053,92 |
| Vapeur d'eau (H ₂ O) | 249,326 | 13,322 | 18 | 1948,985 |
| Total | 1446,8545 | 100 | 122 | — |

Annexe.3 : Composition des gaz brûlés (train400)

| Composants | Nombre de moles (kmol/h) | O ₂ de combustion |
|--|--------------------------|------------------------------|
| Azote (N ₂) | 5,471 | 0 |
| Hélium (He) | 0,00 | 0 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 0,22 | 0 |
| Eau (H ₂ O) | 0 | 0 |
| Méthane (CH ₄) | 83,783 | 116,3 |
| Éthane (C ₂ H ₆) | 7,792 | 139,1 |
| Propane (C ₃ H ₈) | 1,863 | 29,2 |
| i-Butane (iC ₄ H ₁₀) | 0,255 | 0 |
| n-Butane (nC ₄ H ₁₀) | 0,386 | 1,098 |
| i-Pentane (iC ₅ H ₁₂) | 0,075 | 0 |
| n-Pentane (nC ₅ H ₁₂) | 0,084 | 0 |
| Hexane (C ₆ H ₁₄) | 0,071 | 0 |
| Total | 94,309 | 285,698 |

Annexe.4 : Nombre de moles et besoin en oxygène pour la combustion (train400)

Annexe train500

| Composants | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmole) | PCI_i (kcal/kg) | H_i (kJ/kg) |
|--|-------------------|------------------|-------------------|---------------|
| Azote (N ₂) | 5,471 | 28 | — | 19,7112 |
| Hélium (He) | 0 | 4 | — | 0 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 0,22 | 44 | — | 15,7936 |
| Eau (H ₂ O) | 0 | 18 | — | 35,2782 |
| Méthane (CH ₄) | 83,783 | 16 | 11 957 | 41,9171 |
| Éthane (C ₂ H ₆) | 7,792 | 30 | 11 355 | 32,2007 |
| Propane (C ₃ H ₈) | 1,863 | 44 | 11 075 | 30,6018 |
| i-Butane (iC ₄ H ₁₀) | 0,255 | 58 | 10 890 | 30,5211 |
| n-Butane (nC ₄ H ₁₀) | 0,386 | 58 | 10 940 | 31,2381 |
| i-Pentane (iC ₅ H ₁₂) | 0,075 | 72 | 10 797 | 29,8784 |
| n-Pentane (nC ₅ H ₁₂) | 0,084 | 72 | 10 825 | 30,4036 |
| Hexane (C ₆ H ₁₄) | 0,071 | 86 | 10 825 | 30,0455 |
| Total | 100 | — | — | — |

Annexe.1 : Composition molaire, pouvoir calorifique et enthalpie du gaz combustible
(train500)

| Composants | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmole) | H_i (kJ/kg) |
|---------------------------|-------------------|------------------|---------------|
| Azote (N ₂) | 79 | 28 | 19,7112 |
| Oxygène (O ₂) | 21 | 32 | 17,3501 |
| Total | 100 | — | — |

Annexe.2 : Composition De L'air De Combustion (Train500)

| Gaz brûlés | Débit molaire (kmol/h) | X_i (%) molaire | M_i (kg/kmol) | H_i (kJ/kg) |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| Oxygène (O ₂) | 37,381 | 2,453 | 32 | 945,2726 |
| Azote (N ₂) | 1036,0221 | 64,213 | 28 | 1021,824 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 124,1254 | 20,012 | 44 | 1053,92 |
| Vapeur d'eau (H ₂ O) | 249,326 | 13,322 | 18 | 1948,985 |
| Total | 1446,8545 | 100 | 122 | — |

Annexe.3 : Composition des gaz brûlés (train500)

| Composants | Nombre de moles (kmol/h) | O ₂ de combustion |
|--|--------------------------|------------------------------|
| Azote (N ₂) | 5,471 | 0 |
| Hélium (He) | — | 0 |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | 0,22 | 0 |
| Eau (H ₂ O) | — | 0 |
| Méthane (CH ₄) | 83,783 | 111,56 |
| Éthane (C ₂ H ₆) | 7,792 | 131,565 |
| Propane (C ₃ H ₈) | 1,863 | 31,5 |
| i-Butane (iC ₄ H ₁₀) | 0,255 | 0 |
| n-Butane (nC ₄ H ₁₀) | 0,386 | 1,625 |
| i-Pentane (iC ₅ H ₁₂) | 0,075 | 0 |
| n-Pentane (nC ₅ H ₁₂) | 0,084 | 0 |
| Hexane (C ₆ H ₁₄) | 0,071 | 0 |
| Total | 94,309 | 276,25 |

Annexe.4 : Nombre de moles et besoin en oxygène pour la combustion (train500)