



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم

Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم هندسة الطرائق



Département of Process Engineering

N° d'ordre : M2...../GP/2026

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie chimique**

### Thème

**Vérification de la flexibilité des fours C&D du complexe GP2/Z**

Présenté par

1-BENDAHOUSalima

2-BENYOUSSANesrine

Soutenu le 28/06/ 2026 devant le jury composé de :

|                 |                             |            |                          |
|-----------------|-----------------------------|------------|--------------------------|
| Président(e) :  | Dr MEZOUAGH Amina           | MCA        | Université de Mostaganem |
| Examineurs :    | Dr MOHAMED SEGHIR<br>Zahira | MCB        | Université de Mostaganem |
| Encadrant (e) : | Pr. ABSAR Belkacem          | Professeur | Université de Mostaganem |

Année universitaire 2025/2026

## Remerciements

*Avant tout, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé la foi, la patience, le courage, la santé et tous les moyens durant les années d'études et de nous avoir permis la réalisation de ce modeste document.*

*Nous remercions particulièrement notre encadrant Pr ABSAR Belkacem pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et sa confiance tout au long de ce travail. Nous exprimons aussi notre gratitude aux membres du jury, en l'occurrence Dr MEZOUAGH Amina et Dr MOHAMED SEGHIR Zahira qui, malgré leurs obligations professionnelles et administratives, ont pu consacrer le temps nécessaire à l'examen de ce travail.*

*Nous tenons aussi à remercier tous les enseignants et le staff administratif du département de Génie des Procédés.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur patience tout au long de cette aventure.*

*Merci à tous !*

# Liste des figures

|                                                                                       |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Figure I-1</b> : Schéma de l'unité de Séparation. ....                             | - 9 -  |
| <b>Figure I-2</b> : les deux fours 401 /6201 C/D de complexe GP2/Z. ....              | - 11 - |
| <b>Figure II-1</b> : Schéma de procédé séparation par le logiciel Aspen HYSYS. ....   | - 34 - |
| <b>Figure II-2</b> : Conditions d'entrée GPL. ....                                    | - 35 - |
| <b>Figure II-3</b> : Schéma de process du préchauffeur de charge. ....                | - 35 - |
| <b>Figure II-4</b> : Schéma de colonne séparation (Reboiled Absorber) « T-100 ». .... | - 36 - |
| <b>Figure II-5</b> : Schéma de circuit de propane. ....                               | - 37 - |
| <b>Figure II-6</b> : Schéma de circuit de propane. ....                               | - 37 - |
| <b>Figure II-7</b> : Schéma de circuit de butane. ....                                | - 38 - |
| <b>Figure II-8</b> : Schéma de réfrigération. ....                                    | - 39 - |
| <b>Figure II-9</b> : Schéma de section BOG. ....                                      | - 39 - |
| <b>Figure II-10</b> : Schéma des deux fours (D et C). ....                            | - 40 - |
| <b>Figure II-11</b> : Schéma de courant d'entrée d'huile. ....                        | - 40 - |
| <b>Figure II-12</b> : Schéma de four D. ....                                          | - 41 - |
| <b>Figure III-1</b> : Courbe de chaleur absorbée en fonction de température. ....     | - 47 - |

# Liste des tableaux

|                                                                                                   |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Tableau I-1:</b> Caractéristiques techniques des fours 401/6201/C/D (Annexe).....              | - 11 - |
| <b>Tableau II-1 :</b> Paramètres et conditions de service des fours (Annexe B).....               | - 14 - |
| <b>Tableau II-2 :</b> Composition du combustible d'alimentation du four. ....                     | - 15 - |
| <b>Tableau II-3 :</b> Les enthalpies standard de formation. ....                                  | - 17 - |
| <b>Tableau II-4 :</b> PCI des constituants du gaz de combustion.....                              | - 18 - |
| <b>Tableau II-5:</b> Les valeurs de composition théorique des fumées. ....                        | - 22 - |
| <b>Tableau II-6:</b> Les quantités des constituants des fumées. ....                              | - 24 - |
| <b>Tableau II-7:</b> Les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle. ....        | - 25 - |
| <b>Tableau II-8:</b> Les compositions réelles des fumées dans les deux Fours. ....                | - 26 - |
| <b>Tableau II-9:</b> Chaleurs spécifiques des fumées. ....                                        | - 28 - |
| <b>Tableau II-10:</b> Paramètres et conditions de service des fours (cas design) (Annexe 2). .... | - 30 - |
| <b>Tableau II-11:</b> les rendements thermiques des fours. ....                                   | - 32 - |
| <b>Tableau II-12:</b> Récapitulatif des calculs chaleur fournie (max). ....                       | - 32 - |
| <b>Tableau II-13:</b> Les quantités de chaleur des Rebouilleurs (cas Design). ....                | - 33 - |
| <b>Tableau III-1:</b> Paramètres de fonctionnement des deux fours (débit fixe). ....              | - 44 - |
| <b>Tableau III-2:</b> Paramètres de fonctionnement du four C. ....                                | - 45 - |
| <b>Tableau III-3:</b> Paramètres de fonctionnement du four D avec débit fixe. ....                | - 45 - |
| <b>Tableau III-4:</b> Paramètres de fonctionnement du four D avec la température fixe. ....       | - 46 - |
| <b>Tableau III-5:</b> Paramètres de fonctionnement du four C avec la température fixe. ....       | - 46 - |

## Résumé-Abstract - ملخص

### ملخص :

تقدم هذه الدراسة تحليلاً متعمقاً لأداء الطاقة في الأفران الصناعية المستخدمة في مجمع معالجة غاز البترول المسال GP2Z (GPL) في الجزائر. ويستند هذا التحليل إلى حسابات حرارية مفصلة، مدعومة بمحاكاة رقمية أجريت باستخدام برنامج Aspen HYSYS، بهدف تقييم أداء المعدات ودراسة عمليات نقل الحرارة داخل وحدات المعالجة المختلفة. تقارن الدراسة أيضاً نتائج الحسابات النظرية والمحاكاة للتحقق من اتساقها ودقة النمذجة. ويتم إيلاء اهتمام خاص لتقييم جدوى تشغيل دائرة الزيت الحراري TORODA TC 32 بفرن واحد بدلاً من اثنين، ودراسة تأثير هذا الخيار على استمرارية التشغيل وكفاءة الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، تستعرض الدراسة مراحل عملية التجزئة المستخدمة لفصل البروبان والبيتان التجاريين، من خلال تحليل الاحتياجات الحرارية المرتبطة بها. وأخيراً، يتم اقتراح مجموعة من السيناريوهات التشغيلية لتحسين كفاءة الطاقة في الوحدة الصناعية، مع ضمان الامتثال لمتطلبات السلامة والحفاظ على إنتاج مستقر.

### Résumé :

Cette étude présente une analyse approfondie de la performance énergétique des fours industriels utilisés dans le complexe de traitement de gaz de pétrole liquéfié (GPL) GP2Z en Algérie. Cette analyse repose sur des calculs thermiques détaillés, appuyés par des simulations numériques réalisées avec le logiciel Aspen HYSYS, afin d'évaluer la performance des équipements et d'étudier les transferts de chaleur au sein des différentes unités de traitement. L'étude compare également les résultats des calculs théoriques et des simulations pour vérifier leur cohérence et la précision de la modélisation. Une attention particulière est portée à l'évaluation de la faisabilité du fonctionnement du circuit d'huile thermique TORODA TC 32 avec un seul four au lieu de deux, et à l'examen de l'impact de cette option sur la continuité de l'exploitation et l'efficacité énergétique. Par ailleurs, l'étude passe en revue les étapes du procédé de fractionnement utilisé pour séparer le propane et le butane commerciaux, en analysant les besoins thermiques associés. Enfin, un ensemble de scénarios opérationnels est proposé pour améliorer l'efficacité énergétique de l'unité industrielle, tout en garantissant le respect des exigences de sécurité et en maintenant une production stable.

**Abstract:**

This study presents an in-depth analysis of the energy performance of the industrial furnaces used at the GP2Z liquefied petroleum gas (LPG) processing complex in Algeria. This analysis is based on detailed thermal calculations, supported by numerical simulations performed using Aspen HYSYS software, in order to evaluate equipment performance and study heat transfer within the various processing units. The study also compares the results of theoretical calculations and simulations to verify their consistency and the accuracy of the modeling. Particular attention is given to evaluating the feasibility of operating the TORODA TC 32 thermal oil circuit with a single furnace instead of two, and to examining the impact of this option on operational continuity and energy efficiency. Furthermore, the study reviews the stages of the fractionation process used to separate commercial propane and butane, analyzing the associated thermal requirements. Finally, a set of operational scenarios is proposed to improve the energy efficiency of the industrial unit, while ensuring compliance with safety requirements and maintaining stable production.

# Table des matières

|                                                                                  |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Remerciements .....                                                              | i      |
| Liste des figures .....                                                          | ii     |
| Liste des tableaux .....                                                         | iii    |
| ملخص -Résumé-Abstract .....                                                      | iv     |
| Introduction Générale .....                                                      | - 1 -  |
| Chapitre I : Rappels sur le transfert de chaleur et description du procédé ..... | - 2 -  |
| I.1    Introduction .....                                                        | - 2 -  |
| I.2    Étude de la combustion et du transfert de chaleur .....                   | - 2 -  |
| I.2.1    La combustion .....                                                     | - 3 -  |
| I.2.2    Notion de pouvoir calorifique .....                                     | - 3 -  |
| I.2.3    Pouvoir comburivore .....                                               | - 4 -  |
| I.2.4    Pouvoir fumigène .....                                                  | - 4 -  |
| I.2.5    Excès d'air .....                                                       | - 4 -  |
| I.2.6    Modes de transmission de chaleur .....                                  | - 4 -  |
| I.3    Description du procédé de séparation du GPL .....                         | - 7 -  |
| I.3.1    Étape de traitement .....                                               | - 7 -  |
| I.3.2    Étape de séparation .....                                               | - 7 -  |
| I.3.3    Les fours du complexe GP2Z .....                                        | - 9 -  |
| I.3.4    Sécurité du four .....                                                  | - 11 - |
| I.4    Problématique .....                                                       | - 11 - |

|                                                                                                                                      |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Chapitre II : Calculs techniques et simulation du procédé étudié .....                                                               | - 13 - |
| II.1    Introduction .....                                                                                                           | - 13 - |
| II.2    Les calculs techniques .....                                                                                                 | - 13 - |
| II.2.1    Rendement des fours cas actuel .....                                                                                       | - 14 - |
| II.2.2    Quantité de chaleur fournie par la combustion .....                                                                        | - 15 - |
| II.2.3    Quantité de la chaleur perdue par les fumées .....                                                                         | - 19 - |
| II.2.4    Quantité de chaleur perdue par les parois .....                                                                            | - 29 - |
| II.2.5    Quantité de chaleur absorbée .....                                                                                         | - 29 - |
| II.2.6    Calcul du rendement technique .....                                                                                        | - 30 - |
| II.2.7    Quantité de chaleur absorbée et libérée Cas design .....                                                                   | - 30 - |
| II.2.8    Quantité de chaleur maximale fournie par les deux fours .....                                                              | - 32 - |
| II.2.9    Comparaison entre quantité de chaleur maximale fournie par les deux fours et<br>quantité de chaleur des rebouilleurs ..... | - 33 - |
| II.3    Simulation du procédé étudié .....                                                                                           | - 34 - |
| II.3.1    Schéma du procédé de séparation .....                                                                                      | - 34 - |
| II.3.2    Simulation des fours .....                                                                                                 | - 39 - |
| II.4    Comparaison entre les résultats de calcul et de la simulation .....                                                          | - 41 - |
| II.4.1    Conclusion .....                                                                                                           | - 42 - |
| Chapitre III : Etude des différentes situations possibles .....                                                                      | - 44 - |
| III.1    Introduction .....                                                                                                          | - 44 - |
| III.2    Etude de cas 1 .....                                                                                                        | - 44 - |
| III.3    Etude de cas 2 et 3 .....                                                                                                   | - 45 - |
| III.4    Etude de cas 4 et 5 .....                                                                                                   | - 46 - |

|                                              |        |
|----------------------------------------------|--------|
| III.5 Conclusion.....                        | - 47 - |
| Conclusion générale et recommandations ..... | - 48 - |
| Bibliographie .....                          | - 50 - |
| Annexe A .....                               | - 51 - |
| Annexe B .....                               | - 54 - |
| Annexe C .....                               | - 57 - |
| Annexe D .....                               | - 58 - |
| Annexe E .....                               | - 59 - |
| Annexe F .....                               | - 60 - |
| Annexe G .....                               | - 61 - |

## Introduction Générale

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) s'impose comme l'une des principales sources d'énergie primaire non renouvelable, grâce à sa large diffusion, sa facilité d'utilisation, ses caractéristiques environnementales acceptables, ainsi que son coût compétitif.

Le GPL est principalement composé d'hydrocarbures légers appartenant aux catégories C3 et C4, le propane et le butane en étant les principaux composants. Ces composés se présentent à l'état gazeux sous des conditions normales de pression et de température, Cependant, sa liquéfaction est facile, ce qui en facilite le stockage et le transport. La production de ce gaz dépend de la maîtrise d'une série d'opérations intégrées, qui va de l'extraction au raffinage et au traitement, en passant par le transport et le stockage, jusqu'à la distribution finale.

En Algérie, plusieurs complexes industriels de traitement du gaz ont été construits, parmi lesquels le complexe GP2Z à Arzew. Ce complexe utilise des fours industriels pour chauffer un fluide caloporteur (TORADA TC), qui est ensuite utilisé dans des rebouilleurs (Reboilers) à l'intérieur des colonnes de fractionnement, dans le but de séparer le propane et le butane.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances des fours industriels au sein de ce complexe en calculant leur rendement thermique et en analysant leur capacité à répondre aux besoins de chauffage. Elle vise également à examiner la possibilité d'utiliser un seul four au lieu de deux, tout en assurant la qualité des produits finis. À cette fin, sur une simulation à l'aide du logiciel HYSYS a été réalisée pour pouvoir statuer sur possibilité.

# **Chapitre I :**

## **Rappels sur le transfert de chaleur et description du procédé**

### **I.1 Introduction**

Le complexe GP2/Z relève de la Sonatrach, société nationale chargée du transport, du raffinage et de la commercialisation des hydrocarbures, laquelle a été créée le 31 Décembre 1963. Son organisation est basée sur les activités d'approvisionnement énergétique nationales, du développement et de l'exploitation des gisements d'hydrocarbures, l'usine est conçue pour séparer le GPL en propane et butane commercial.

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est réceptionné au niveau de l'unité de réception (stockage tampon) en provenance de RTO « Direction Régionale du Transport par canalisation des hydrocarbures de la Région Ouest ». Ce gaz est un mélange d'hydrocarbures formé principalement de propane et de butane, pouvant contenir des traces de fractions lourdes et des impuretés nécessitant un traitement avant son acheminement vers le stockage ou son utilisation. Afin d'assurer le respect de la conformité de ses caractéristiques aux spécifications opérationnelles et commerciales requises, ce mélange subit une série d'opérations industrielles comme le traitement pour éliminer les impuretés et améliorer la qualité du produit, la séparation des principaux composants en fonction de leur volatilité, puis l'étape de réfrigération pour abaisser la température des produits et les préparer aux conditions de stockage adaptées. L'ultime étape est le stockage des avant leur commercialisation.

### **I.2 Étude de la combustion et du transfert de chaleur**

Le fonctionnement d'une partie des installations s'appuie sur les phénomènes de combustion et de transfert thermique. La combustion se produit en présence de gaz combustibles et en présence de quantités suffisantes d'air. Les modes de transmission de chaleur, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement, interviennent dans les échanges thermiques au sein des fours et des échangeurs afin d'assurer le bon fonctionnement des procédés industriels.

### **I.2.1 La combustion**

La combustion est une réaction chimique rapide entre un combustible et un comburant qui dégage de la chaleur, il s'agit d'une réaction exothermique.

Dans les fours pétroliers, le processus de combustion s'effectue dans la zone de rayonnement, où la chaleur est transmise directement aux tubes. Ce processus utilise des brûleurs fonctionnant au combustible liquide ou gazeux avec un excès d'air compris entre 10 % et 40 % afin d'améliorer le rendement. La chaleur de combustion représente l'énergie thermique libérée par la combustion complète d'une unité de masse de combustible dans des conditions standard [1].

La combustion se produit en présence de trois éléments essentiels qui sont le combustible, le comburant (le plus courant est l'oxygène de l'air) et la source d'énergie pour l'allumage [2].

### **I.2.2 Notion de pouvoir calorifique**

Le pouvoir calorifique est défini comme étant la quantité de chaleur dégagée de la réaction de combustion complète d'une certaine quantité de matière du combustible. On distingue deux types de pouvoir calorifique [3]:

- **Pouvoir calorifique inférieur (PCI)** : Il s'agit de la quantité de chaleur libérée par la combustion complète du combustible, sans tenir compte de la chaleur latente de vaporisation de l'eau contenue dans les fumées.
- **Pouvoir calorifique supérieur (PCS)** : Il s'agit de la quantité totale de chaleur libérée par la combustion complète du combustible, en tenant compte de la chaleur latente résultant de la condensation de la vapeur d'eau formée.

$$PCS = PCI - \text{Chaleur de condensation de l'eau.} \quad (I-1)$$

### **I.2.3 Pouvoir comburivore**

C'est la quantité d'air nécessaire à la combustion d'une quantité unitaire de combustible, exprimée en kg d'air/kg de combustible pour les combustibles solides, ou en  $\text{Nm}^3$  d'air/ $\text{Nm}^3$  de combustible pour les combustibles gazeux [4].

### **I.2.4 Pouvoir fumigène**

C'est la quantité de fumées résultant de la combustion d'une quantité unitaire de combustible dans l'air, exprimée en kg de gaz/kg de combustible ou en  $\text{Nm}^3$  de gaz/ $\text{Nm}^3$  de combustible [4].

### **I.2.5 Excès d'air**

C'est la quantité d'air supérieure au rapport stœchiométrique nécessaire pour assurer la combustion complète du combustible. Il est généralement utilisé dans les procédés industriels à un taux compris entre 2 % et 10 % pour garantir une combustion complète et stable. Son déficit entraîne une combustion incomplète et la formation de fumée, tandis que son excès réduit le rendement thermique en raison du réchauffement inutile d'un excès d'air [4].

### **I.2.6 Modes de transmission de chaleur**

Les principaux modes de transmission de la chaleur sont [5]:

#### **I.2.6.1 La conduction**

La conduction thermique est un mode de transfert de chaleur qui se produit à l'intérieur d'un milieu matériel sans déplacement de matière, sous l'effet d'une variation de température. Elle est assurée par le contact direct entre les molécules, permettant le transfert de l'énergie des zones chaudes vers les zones froides jusqu'à ce qu'un équilibre thermique soit atteint.

L'échange de chaleur par conduction est défini par la relation de FOURIER (1822) ; la valeur instantanée de la quantité de chaleur transmise dans l'unité de temps est proportionnelle à la section plane perpendiculairement traversée par le flux calorifique, à la conductivité thermique du matériau traversé qui dépend des propriétés physiques de la matière et au gradient de température qui est le rapport de la variation de la température à la distance parcourue par le flux calorifique.

$$\vec{\Phi} = - \lambda S \text{ grad}(\overline{T}) \quad (I-2)$$

Sous forme algébrique et suivant la direction  $x$  perpendiculaire à la surface  $S$ , le flux s'écrit :

$$\vec{\Phi} = - \lambda S dT / dx \quad (I-3)$$

Avec

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par conduction ( $W$ ).

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $W / m^{\circ}C$ ).

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux ( $m$ ).

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ ).

### **I.2.6.2 La convection**

La convection se produit dans les fluides, c'est-à-dire dans les liquides et les gaz. Elle est définie par sa relation directe avec le mouvement du fluide. La chaleur est transférée résulte du déplacement des particules du fluide des zones à haute température vers les zones à basse température. On distingue deux types principaux de convection :

- Convection forcée : le mouvement du fluide est provoqué par des influences externes telles que des pompes ou des ventilateurs, ce qui augmente la vitesse d'écoulement et influe directement sur l'intensité du transfert de chaleur.
- Convection naturelle (libre) : le mouvement du fluide se produit spontanément en raison des différences de densité résultant des variations de température, sous l'effet de forces telles que la gravité.

L'intensité du transfert de chaleur par convection peut être décrite de manière à l'aide de la loi de refroidissement de Newton, qui s'écrit :

$$\phi = h S (T_p - T_{\infty}) \quad (I-4)$$

Avec :

- $\Phi$  : Flux de chaleur transmis par convection ( $W$ )
- $h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$ )
- $T_p$  : Température de surface du solide ( $^\circ C$ )
- $T_{\infty}$  : Température du fluide loin de la surface du solide ( $^\circ C$ )
- $S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $m^2$ )

### I.2.6.3 Le rayonnement

Le rayonnement thermique se propage sans avoir besoin de milieu physique, puis qu'il se réalise sous la forme d'ondes électromagnétiques (photons) générées par le mouvement et les vibrations thermiques des atomes à la surface d'un corps. C'est pourquoi le rayonnement thermique peut se propager dans le vide de plus, son transfert y est plus efficace que dans les milieux physiques qui peuvent en absorber une partie.

La quantité de chaleur échangée par rayonnement entre une surface et son environnement peut représenter par la relation suivante :

$$\Phi = \sigma \varepsilon S (T_s - T_a)^4 \quad (I-5)$$

Avec

$\Phi$  : Flux thermique ( $W$ ).

$\sigma$  : Constante de Stéphan Boltzmann  $5,67 \cdot 10^{-8} (W K^{-4} m^{-2})$ .

$\varepsilon$  : Facteur d'émission de la surface.

$S$  : La surface de contact solide/fluide ( $m^2$ ).

$T_s$  : Température de la surface (K).

$T_a$  : Température du milieu environnant la surface (K).

### **I.3 Description du procédé de séparation du GPL**

Le procédé de séparation des GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) s'articule autour de plusieurs étapes, depuis la réception du gaz dans le complexe jusqu'au stockage final des produits finis.

#### **I.3.1 Étape de traitement**

Le traitement préliminaire du GPL vise à améliorer ses propriétés opérationnelles et à garantir le bon fonctionnement des unités industrielles en aval. Cette étape commence par l'élimination des particules solides et des impuretés mécaniques présentes dans le liquide. Cela est réalisé grâce à des systèmes de filtration, afin d'éviter le colmatage des conduites, de limiter la corrosion des équipements et de réduire les pertes de charge au sein du réseau de traitement. Le GPL est ensuite soumis à un processus de (dégazage), qui permet d'éliminer les gaz non condensables accumulés dans le mélange, ce qui permet la stabilisation de la pression de service et l'amélioration des conditions de stockage et de transport, ainsi qu'au renforcement de la sécurité opérationnelle.

Cette étape comprend également un processus de (déshydratation) visant à éliminer l'eau libre et l'humidité dissoute dans le gaz. Il s'agit d'une étape indispensable pour éviter la formation d'hydrates solides à basse température lors des phases de refroidissement ultérieures.

#### **I.3.2 Étape de séparation**

Après l'étape de traitement préliminaire, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est transféré vers la section de séparation, qui a pour objectif de séparer le mélange d'alimentation en deux produits principaux : le propane (C3) comme produit de tête, et le butane (C4) comme produit de fond. Cette opération s'effectue au niveau des deux lignes de séparation identiques (Splitter A et B : 407/6201/A et 407/6201/B), Pour chaque ligne, une colonne de distillation est installée avec l'ensemble des équipements auxiliaires requis, notamment un échangeur de

chaleur primaire, un condenseur à air, un réservoir de retour, des pompes de retour, ainsi qu'un rebouilleur chargé de fournir la chaleur nécessaire à la poursuite du processus de séparation.

Le GPL est introduit par la conduite d'alimentation, où son débit est d'abord contrôlé par une vanne de régulation, puis il passe dans l'échangeur de chaleur primaire (405/6201/A), où il est préchauffé grâce à la récupération de la chaleur du courant de fond chaud riche en butane sortant du bas de la colonne, ce qui permet d'élever la température de l'alimentation avant son entrée dans la colonne de séparation et d'assurer une intégration thermique au sein de l'unité, ce qui conduit à une réduction de la charge thermique du système de rebouillir et à une amélioration du rendement énergétique.

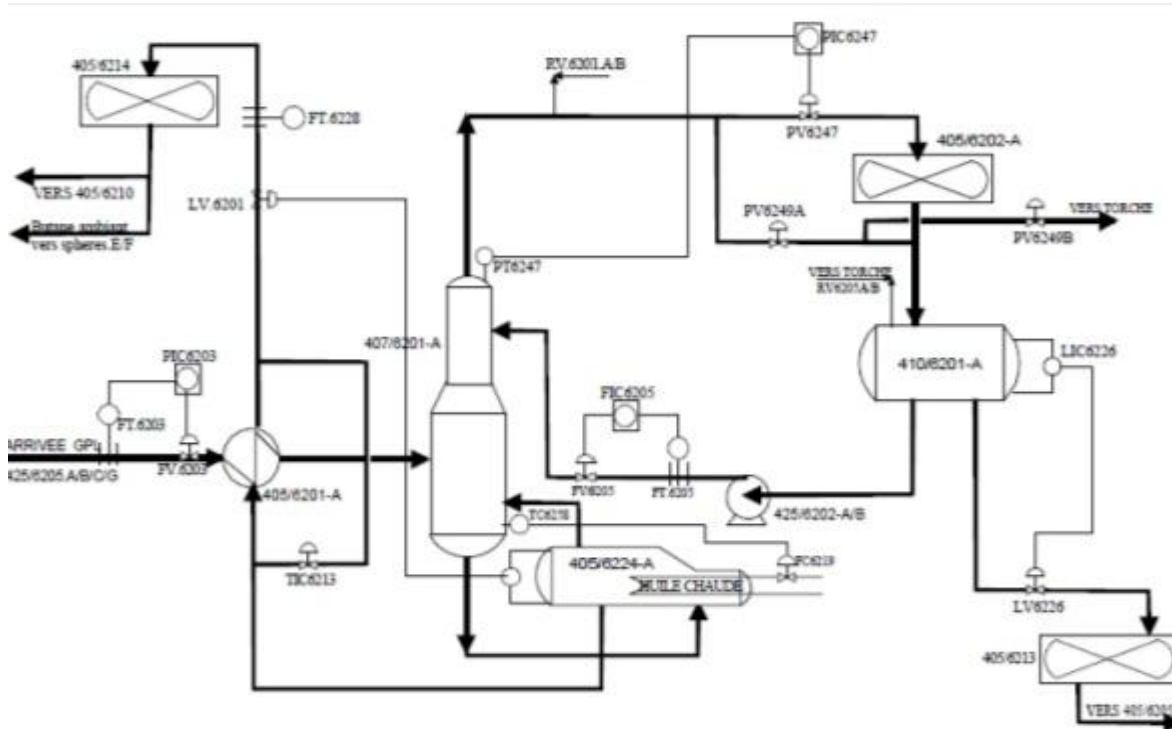
La charge chauffée est ensuite introduite dans la colonne de fractionnement à un niveau approprié, où le processus de distillation fractionnée commence sous l'effet des transferts de chaleur et de masse entre les phases liquide et vapeur à l'intérieur de la colonne. En raison des différences de volatilité des composants, les composés les plus légers, riches en propane, remontent progressivement vers le haut de la colonne, alors que les composés les plus lourds, riches en butane, se dirigent vers la partie inférieure de celle-ci.

En tête de la colonne, le courant de tête riche en propane est extrait et envoyé vers le condenseur à air, où il est refroidi et se condense entièrement, puis collecté dans le ballon de reflux. Ensuite, les pompes de reflux assurent l'aspiration du liquide condensé, dont une partie est renvoyée vers le sommet de la colonne sous forme de reflux afin d'améliorer l'efficacité de la séparation et de maintenir l'équilibre interne entre les deux phases, tandis que le reste est dirigé comme produit final vers les étapes de refroidissement ou de stockage.

À la base de la colonne, une partie du liquide de fond riche en butane est prélevée et acheminée vers un rebouilleur, où il connaît une évaporation grâce au transfert de chaleur assuré par l'huile thermique « TORADA TC 32 ». La partie évaporée est ensuite renvoyée vers le bas de la colonne sous forme de courant vapeur ascendant qui contribue à renforcer le processus de séparation, alors que le résidu liquide est soutiré en tant que produit inférieur riche en butane. Une partie de la chaleur du courant de fond chaud est également utilisée pour

le préchauffage de l'alimentation en GPL via l'échangeur de chaleur, ce qui optimise le processus de récupération thermique au sein de l'unité.

La chaleur nécessaire au processus de rebouillage est fournie par l'huile thermique « TORADA TC 32 », qui est chauffée dans des fours industriels.



**Figure I-1 : Schéma de l'unité de Séparation.**

### I.3.3 Les fours du complexe GP2Z

Les fours 401/6201C/D du complexe industriel GP2Z sont des fours tubulaires verticaux cylindriques à chauffage direct qui comptent parmi les équipements thermiques de base utilisés dans les unités de raffinage et de pétrochimie pour fournir l'énergie thermique nécessaire au déroulement des processus industriels. La fonction principale de ces fours est de fournir l'énergie thermique nécessaire au rebouillage du fond des colonnes à l'aide des échangeurs de chaleur rebouilleur 405/6224A/B, qui chauffent le fluide caloporteur TORADA

TC32 utilisé comme milieu de transfert thermique. Le four est constitué d'une structure métallique cylindrique, Il comporte également des tubes internes à l'intérieur desquels circule le fluide TORODA TC32 à chauffer.

Le four est constitué de deux zones principales : zone de convection, où le fluide subit un premier chauffage grâce à la chaleur des gaz de combustion ascendants et une zone de rayonnement, dans laquelle le fluide acquiert la majeure partie de la chaleur grâce à l'exposition directe des tubes au rayonnement thermique et à la flamme, jusqu'à atteindre la température requise.

Les parois intérieures du four, et en particulier celles de la chambre de combustion, sont protégées contre les effets des températures élevées par un revêtement thermique et isolant, tandis que le sol de la zone de combustion constitue la base du four. Afin de garantir une accessibilité optimale et de faciliter les opérations de maintenance et d'inspection, les parois sont équipées de portes et de fenêtres, qui doivent être assurées par une fermeture étanche afin de garantir le bon fonctionnement de four durant son exploitation. La fumée est évacuée du four par une cheminée cylindrique, où les gaz de combustion sont évacués vers l'atmosphère de manière contrôlée, afin de limiter toute nuisance pour le voisinage.



**Figure I- 2** : les deux fours 401 /6201 C/D de complexe GP2/Z.

**Tableau I- 1:** Caractéristiques techniques des fours 401/6201/C/D (Annexe).

|                            | Four 401/6201C |           | Four 401/6201D |           |
|----------------------------|----------------|-----------|----------------|-----------|
|                            | Convection     | Radiation | Convection     | Radiation |
| Nombre de tube             | 36             | 72        | 36             | 84        |
| Nombre de passe            | 6              | 6         | 6              | 6         |
| Diamètre des tubes (pouce) | 5              | 6         | 6              | 6         |
| Nombre de bruleurs pilotes | 10             |           | 12             |           |
| Nombre de bruleurs         | 10             |           | 12             |           |

### **I.3.4 Sécurité du four**

Un ensemble de commande est utilisé pour assurer la sécurité de fonctionnement des fours. Ceci permet l'exploitation de cet équipement sans risques pour le personnel et les installations.

## **I.4 Problématique**

La nécessité d'assurer la continuité de la production du propane (C3) et du butane(C4) à usage commercial revêt une importance économique majeure pour le complexe GP2Z, notamment face à l'augmentation de la demande et l'optimisation de l'exploitation des unités industrielles. Le débit traité s'élève actuellement à environ 180 tonnes/heure de gaz de pétrole liquéfié, avec

une qualité des produits atteignant 97 % pour le propane et 96 % pour le butane, ce qui souligne l'importance de maintenir et d'améliorer ces caractéristiques.

L'objectif de cette étude est de vérifier si la capacité actuelle de chaque four (401/6201C/D) du circuit d'huile chaude TORADA TC32 peut assurer le chauffage des deux splitter plus la colonne de dééthanisation (est en arrêt actuellement).

## **Chapitre II :**

### **Calculs techniques et simulation du procédé étudié**

#### **II.1 Introduction**

La simulation est considérée comme l'un des outils les plus importants utilisés dans les domaines industriel et scientifique ; elle est définie comme la représentation d'un phénomène physique à l'aide de modèles mathématiques ce qui permet d'analyser leur comportement et comprendre son mécanisme. L'avancement du domaine de l'informatique permet remplacer les calculs manuels longs et complexes par des logiciels adaptés tels qu'Aspen HYSYS, Aspen Plus, Chem CAD et, ce qui a conduit à faciliter l'étude et l'analyse des différents processus industriels. L'importance de la simulation réside dans son utilisation lors de la conception des processus industriels, car elle permet d'établir des bilans matière et énergie, de calculer les caractéristiques d'écoulement en différents points de l'installation, en plus de déterminer les dimensions des équipements et d'estimer les coûts d'investissement et d'exploitation. Elle permet également d'assurer le suivi et l'amélioration des processus industriels existants, en procédant à l'ajustement des conditions de fonctionnement en cas de modification de la composition des matières premières ou des conditions de travail de certains équipements, ainsi que pour évaluer les performances des installations et améliorer leur rendement.

#### **II.2 Les calculs techniques**

Les paramètres et les conditions de service des deux fours indiqués dans le tableau ci-dessous ; ces paramètres sont donnés pour le bon fonctionnement de four et pour éviter la dégradation d'huile ; cette dernière cause citée influence sur la qualité de séparation.

**Tableau II- 1** : Paramètres et conditions de service des fours (Annexe B).

|                                 |             | Four C          | Four D          |
|---------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Fluide                          |             | Huile TORADA TC | Huile TORADA TC |
| Débit                           | <i>kg/h</i> | 365000          | 380000          |
| Pression entrée                 | <i>Bar</i>  | 15,16           | 15,27           |
| Pression sortie                 | <i>Bar</i>  | 13,34           | 13,45           |
| Température entrée              | <i>°C</i>   | 132             | 132             |
| Température sortie              | <i>°C</i>   | 183             | 183             |
| Débit fuel gaz                  | <i>kg/h</i> | 1861,3245       | 1937,8173       |
| Température des fumées          | <i>°C</i>   | 285             | 285             |
| Tenure en $O_2$ dans les fumées | <i>%</i>    | 9,4             | 11,9            |

### II.2.1 Rendement des fours cas actuel

La quantité de chaleur utile générée par un four industriel est mesurée par son efficacité par rapport à l'énergie totale consommée ; plus l'efficacité est grande, plus le four est efficace et économique en termes de consommation d'énergie.

Divers facteurs, notamment la conception d'un four, sa taille, la source d'énergie utilisée, la méthode de chauffage et le volume de travail, sont cruciaux pour déterminer l'efficacité du four, qui dépend de plusieurs facteurs.

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

$$Q_{fournie} = Q_{absorbée} + Q_{fumée} + Q_{parois} \quad (II- 1)$$

L'expression du rendement devient :

$$\eta = (Q_{fournie} - Q_{fumée} - Q_{parois}) / Q_{fournie} \quad (II- 2)$$

$Q_{fournie}$  : la chaleur fournie par la combustion.

$Q_{absorbée}$  : la chaleur absorbée par le fluide de procédé ;

$Q_{fumée}$  : la chaleur perdue par les fumées ;

$Q_{parois}$  : la chaleur perdue par les parois.

Le rendement d'un four  $\eta$  est défini comme le rapport du débit de la chaleur absorbée par le fluide caloporteur au débit de la chaleur fournie au four par la combustion ( $Q_{entrée}$ ) :

$$\eta = \frac{Q_{absorbée}}{Q_{fournie}}. \quad (II- 3)$$

## II.2.2 Quantité de chaleur fournie par la combustion

La quantité de chaleur fournie par la réaction de combustion est donnée par la formule suivante :

$$Q_{fournie} = PCI \times D_{fg} \left( \frac{kcal}{h} \right). \quad (II- 4)$$

- $PCI$  : Pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz ( $kcal/kg$ ) (Voir annexe A) ;
- $D_{fg}$  : Débit du fuel gaz (max) ( $Kg/h$ ).

### II.2.2.1 Composition du gaz combustible

Les données sur le gaz de combustion qui nous ont été données dans l'unité de Sonatrach sont indiquées dans le tableau suivant :

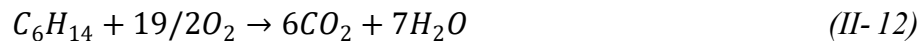
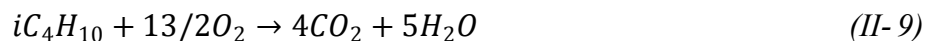
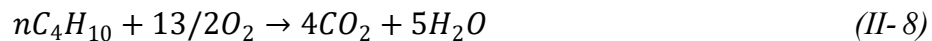
**Tableau II- 2** : Composition du combustible d'alimentation du four.

| Constituants | Formule chimique              | Fraction molaire ( $y_i$ ) |
|--------------|-------------------------------|----------------------------|
| Méthane      | CH <sub>4</sub>               | 0,726298                   |
| Ethane       | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0,12411                    |
| Propane      | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | 0,038734                   |

|                    |                                  |          |
|--------------------|----------------------------------|----------|
| Iso Butane         | i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,006578 |
| N butane           | n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,009711 |
| Iso pentane        | i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,001944 |
| N pentane          | n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,000389 |
| Hexane             | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>   | 0,002322 |
| Azote              | N <sub>2</sub>                   | 0,084684 |
| Dioxyde de carbone | CO <sub>2</sub>                  | 0,005228 |
| Hélium             | He                               | 4,54E-07 |
| Totale             |                                  | 1        |

### II.2.2.2 Réactions de combustion principales

Les principales réactions de combustion sont développées comme suit :



### II.2.2.3 Pouvoir calorifique inférieur (*PCI*) des constituants du gaz combustible

Pouvoir calorifique inférieur est une quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non

recupérée, (l'eau qui résulte de la combustion est supposée à l'état vapeur dans les produits de combustion).

Dans les prochains calculs, nous allons nous contenter du calcul du pouvoir calorifique du méthane :

On a la réaction de la combustion du méthane (II- 5)

On a:

$$PCI = -\Delta H_{combustion} . \quad (II- 13)$$

Ou (Loi de Hess):

$$\Delta H_{combustion} = \sum x \Delta H^{\circ}_{produits} - \sum y \Delta H^{\circ}_{reactifs} . \quad (II- 14)$$

$x, y$  : le nombre stœchiométrique des produits et des réactifs respectivement.

Les  $\Delta H^{\circ}_{formation}$  peuvent être tirées du tableau des enthalpies standard de formation, dans notre cas les valeurs sont les suivantes :

**Tableau II- 3** : Les enthalpies standard de formation.

| Composition      | Masse molaire | $\Delta H^{\circ}_{formation} (kJ/mol)$ |
|------------------|---------------|-----------------------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 44,010        | -393,52                                 |
| H <sub>2</sub> O | 18.01528      | -241,8                                  |
| O <sub>2</sub>   | 32            | 0                                       |
| CH <sub>4</sub>  | 16.043        | -74,9                                   |

$$\Delta H_{combustion} = (\Delta H^{\circ}_{CO2} + 2\Delta H^{\circ}_{H2O}) - (\Delta H^{\circ}_{CH4} + 2\Delta H^{\circ}_{O2}). \quad (II- 15)$$

$$\Delta H_{combustion} = (-393.52 + ((2 \times -241.8)) - (-74.9 + 0) = -802.22 \text{ kJ/mole}$$

$$PCI_{CH_4} = 802.22 \text{ kJ/mole}$$

$$1 \text{ kJ} \rightarrow 0,239006 \text{ kcal}, M_{CH_4} = 16 \text{ g/mol}$$

$$PCI_{CH_4} = 802.22 * 0,239006 / 16 * 10^{-3}$$

$$PCI_{CH_4} = 11983,46 \text{ kcal /kg}$$

#### II.2.2.4 Estimation du PCI du mélange de gaz combustible

Le pouvoir calorifique des autres constituants est déterminé de la même manière que celle développée ci-haut. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau II-4 : PCI des constituants du gaz de combustion.**

| Constituants                     | $y_i$ (%) | $PCI$ (kcal/kg) |
|----------------------------------|-----------|-----------------|
| CH <sub>4</sub>                  | 0,726298  | 11983,46        |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 0,12411   | 11374,61        |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    | 0,038734  | 11097,81        |
| i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,006578  | 10914,25        |
| n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,009711  | 10948,86        |
| i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,001944  | 10834,61        |
| n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,000389  | 10861,49        |
| C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>   | 0,002322  | 10801,46        |
| N <sub>2</sub>                   | 0,084684  | 0               |
| CO <sub>2</sub>                  | 0,005228  | 0               |
| He                               | 4,54E-07  | 0               |

Le PCI du mélange de gaz combustible est déterminé par la formule suivante :

$$PCI = \sum PCI_i \times \frac{y_i}{100} \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right). \quad (II-16)$$

$$PCI_{\text{Combustible}} = 10773,62 \text{ kcal/kg}$$

### II.2.2.5 Calcul de la quantité de chaleur fournie par la combustion ( $Q_{fournie}$ )

L'équation de quantité de chaleur fournie par la combustion est donnée par (II- 4) :

**Application numérique :**

**Four D :**

$$Q = 10773,62 \times 1937,8173$$

$$Q = 20,87730722 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

**Four C:**

$$Q = 10773,62 \times 1861,3245$$

$$Q = 20,05320286 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

### II.2.3 Quantité de la chaleur perdue par les fumées

La quantité de chaleur des fumées est donnée par la formule suivante :

$$Q_{fumées} = \dot{n} \times cp_{moy} \times (T_f - T_{Ref}). \quad (II- 17)$$

Avec :

- $\dot{n}$  : débit molaire des fumées en  $kmol/h$  ;
- $cp_{moy}$  : chaleur spécifique moyenne des fumées ( $kcal/kmol^\circ C$ ) ;
- $T_f$ : température de rejet des fumées ( $^\circ C$ ) ;
- $T_{Ref}$  : On considère la température de référence  $0^\circ C$ .

Nous utilisons la formule suivante pour calculer la chaleur spécifique moyenne des fumées :

$$cp_{moy} = \sum cp_i \times \frac{y_i}{100} \left( \frac{kcal}{kmol^\circ C} \right). \quad (II- 18)$$

Avec :

- $cp_{moy}$  : Chaleur spécifique moyenne des fumées ( $kcal/kmol^{\circ}C$ );
- $cp_i$  : chaleur spécifique du constituant i ( $kcal/kmol^{\circ}C$ );
- $y_i$  : pourcentage molaire du constituant i (%).

La chaleur spécifique de chaque constituant dépend de la température.

Nous avons utilisé l'annexe G pour calculer la chaleur spécifique moyenne entre 0 et  $T^{\circ}C$  en  $kcal/kmole$ .

### II.2.3.1 Composition des fumées

La base de notre calcul c'est  $100 Nm^3$  de gaz combustible.

A partir des réactions de combustion mentionnées dans le paragraphe précédent on peut calculer les volumes  $V_{O_2}$ ,  $V_{CO_2}$  et  $V_{H_2O}$  qui sont donnés en  $Nm^3$  par  $100 Nm^3$  de gaz combustible il faut utiliser les estimations suivantes :

$$\text{✚ } V_{CO_2 \text{ Fumées}} = V_{CO_2 \text{ généré par la combustion}} + V_{CO_2 \text{ combustible}} \quad (II-19)$$

$V_{N_2}$  :

$V_{N_2} \rightarrow 79\%$

$V_{O_2} \rightarrow 21\%$

$$V_{N_2} = V_{O_2} \times 79/21 = 3,76 \times V_{O_2}$$

$$\text{✚ } V_{N_2 \text{ Fumées}} = 3,76 \times V_{O_2 \text{ Air de combustion}} + V_{N_2 \text{ combustible}} \quad (II-20)$$

$$\text{✚ } V_{H_2O \text{ Fumées}} = V_{H_2O \text{ généré par la combustion}} + V_{H_2O \text{ combustible}} \quad (II-21)$$

 Vair de combustion :

$$\begin{aligned} V_{Air} &\rightarrow 100\% \\ V_{O_2} &\rightarrow 21\% \end{aligned}$$

$$V_{air} = V_{O_2} \times 100/21 = 4,76 V_{O_2}$$

$$\text{Air de combustion} = 4,76 V_{O_2 \text{ Air de combustion}} \quad (II-22)$$

Détermination de la quantité de vapeur d'eau dans l'air de combustion

**Humidité relative :** 84 % (météo Oran le jour 22/04/2026 à 14h : 15 minutes)

**Tension de vapeur de l'eau à 20°C :** 17,4 mm Hg

Quantité d'eau dans l'air de combustion :

$$Q_{H_2O \text{ dans l'air combustion}} = (P^\circ \times H\%)/(P_t + P^\circ) \times V_{air} \quad (II-23)$$

Avec :

$H$  : Humidité relative.

$P^\circ$  : Tension de vapeur de l'eau.

$P_t$  : Pression totale.

$$\text{Quantité d'eau dans l'air de combustion} = 0,0197 \times V_{air}$$

### II.2.3.2 Composition théorique des fumées

D'après les réactions de combustion précédentes et compte tenu de la connaissance de la composition du gaz combustible, on peut déterminer les volumes ( $V_{CO_2}$ ,  $V_{H_2O}$  et  $V_{N_2}$ ) nécessaires à la combustion théorique de  $100Nm^3$  de combustible. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

Avec :  $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$  sont les fractions volumiques des constituants. A partir des réactions de la combustion :

$$V_{O_2} = (2 X_1 + 7/2 X_2 + 5 X_3 + 13/2 X_4 + 13/2 X_5 + 8 X_6 + 8 X_7 + 19/2 X_8) \times V_{gaz}$$

$$V_{CO_2} = (X_1 + 2 X_2 + 3 X_3 + 4 X_4 + 4 X_5 + 5 X_6 + 5 X_7 + 6 X_8) \times V_{gaz}$$

$$V_{H_2O} = (2 X_1 + 3 X_2 + 4 X_3 + 5 X_4 + 5 X_5 + 6 X_6 + 6 X_7 + 7 X_8) \times V_{gaz}$$

Alors, la combustion théorique de  $100 Nm^3$  de gaz combustible génère :

$$V_{CO_2} = 119,7763 Nm^3$$

$$V_{H_2O} = 222,3771 Nm^3$$

$$V_{O_2} = 207,5272 Nm^3$$

$$V_{N_2} = 3,76 \times V_{O_{2théorique}} = 3,76 \times 207,5272 = 836,1379 Nm^3$$

$$V_{N_2} = 836,1379 Nm^3$$

$$V_{air\ théorique} = (V_{N_2} + V_{O_{2théorique}}) Nm^3$$

$$V_{air\ théorique} = (207,5272 + 836,1379)$$

$$V_{air\ théorique} = 1058,515 Nm^3$$

Les valeurs calculées sont notées dans le tableau suivant :

**Tableau II- 5:** Les valeurs de composition théorique des fumées.

| $V_i$   | $V_{CO_2}$ | $V_{O_2}$ | $V_{H_2O}$ |
|---------|------------|-----------|------------|
| 72,6299 | 72,62988   | 145,2598  | 145,2598   |
| 12,411  | 24,822     | 43,4385   | 37,233     |
| 3,8734  | 11,6202    | 19,367    | 15,4936    |
| 0,6578  | 3,289      | 4,2757    | 2,6312     |
| 0,9711  | 4,8555     | 6,31215   | 3,8844     |

|        |          |          |          |
|--------|----------|----------|----------|
| 0,1944 | 0,972    | 1,5552   | 1,1664   |
| 0,0389 | 0,1945   | 0,3112   | 0,2334   |
| 0,2322 | 1,3932   | 1,8576   | 1,6254   |
| 8,4684 | 0        | 0        | 0        |
| 0,5228 | 0        | 0        | 0        |
| 0      | 0        | 0        | 0        |
| 100    | 119,7763 | 222,3771 | 207,5272 |

D'après les quantités de  $CO_2$  et de  $N_2$  contenues dans le gaz combustible, donc On peut calculer les quantités des constituants des fumées comme suit :

✚ On utilise l'équation (II- 19) :

$$V_{CO_2} = 119,7763 + 0,5228 \times 100 \text{ Nm}^3/100\%$$

$$V_{CO_2} = 120,2991 \text{ Nm}^3$$

✚ On utilise l'équation (II- 21) :

$$V_{H_2O} = 207,5272 + 0,0197 \times V_{Air}$$

$$V_{H_2O} = 207,5272 + 0,0197 \times 1058,515$$

$$V_{H_2O} = 228,3799 \text{ Nm}^3$$

$$✚ V_{O_2} = V_{O_{2théorique}} = 222,3771 \text{ Nm}^3$$

✚ On utilise l'équation (II- 20) :

$$V_{N_2} = 3,76 \times 222,3771 + 8,4684 * 100 \text{ Nm}^3/100\%$$

$$V_{N_2} = 844,6063 \text{ Nm}^3$$

$$\text{La valeur totale : } Vt = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} = 1415,6624 \text{ Nm}^3$$

Un exemple de calcul des pourcentages volumiques :

$$\begin{aligned} 1415,6624 \text{ Nm}^3 &\rightarrow 100\% \\ 120,2991 \text{ Nm}^3 &\rightarrow \delta \end{aligned} \quad \delta = 8,4977\%$$

Les valeurs calculées sont notées dans le tableau suivant :

**Tableau II- 6:** Les quantités des constituants des fumées.

| Constituants     | $V \text{ (Nm}^3/100 \text{ Nm}^3 \text{ de combustible)}$ | Pourcentages volumiques |
|------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 120,2991                                                   | 8,4977                  |
| H <sub>2</sub> O | 228,3799                                                   | 16,1324                 |
| O <sub>2</sub>   | 222,3771                                                   | 15,7083                 |
| N <sub>2</sub>   | 844,6063                                                   | 59,6616                 |
| Total            | 1415,6624                                                  | 100                     |

### II.2.3.3 Composition réelle des fumées (avec excès d'air)

En considérant :

$\beta$  : Le volume d'O<sub>2</sub> dans les fumées ou bien l'excès d'air en Nm<sup>3</sup>.

$$\text{Donc : } \beta = V_{O_2(\text{théorique})} \times \text{teneur en } O_2 \text{ dans les fumées}$$

$$V_{O_2(\text{fumées})} = \beta$$

$$V_{CO_2(\text{fumées})} = V_{CO_2(\text{généré par la combustion})} + V_{CO_2(\text{combustible})} = 120,2991$$

$$V_{N_2(\text{fumées})} = 3,76 \times V_{O_2(\text{théorique})} + V_{N_2(\text{combustible})} + 3,76 \beta$$

$$V_{N_2(\text{fumées})} = 3,76 \times 222,3771 + 8,4684 \times 100 \text{ Nm}^3/100\% + 3,76 \beta$$

$$V_{N_2(\text{fumées})} = 844,6063 + 3,76 \beta$$

$$V_{H_2O \text{ Fumées}} = V_{H_2O(\text{générée par la combustion})} + V_{H_2O(\text{air de combustion réelle})}$$

$$V_{H_2O \text{ Fumées}} = V_{H_2O(\text{générée par la combustion})} + 0,0197 V_{\text{air}}$$

$$V_{H_2O \text{ Fumées}} = V_{H_2O \text{ (générée par la combustion)}} + 0,0197 \times 4,76 \times V_{O_2}$$

$$V_{H_2O \text{ Fumées}} = 228,3799 + 0,093772 \times \beta$$

$$V_{\text{air de combustion}} = 4,76 [V_{O_2(\text{théorique})} + \beta]$$

Les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle de  $100 \text{ Nm}^3$  de gaz combustible, en fonction de  $\beta$ , sont rassemblées dans le tableau suivant :

**Tableau II- 7:** Les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle.

| Constituants | $V \text{ (Nm}^3/100 \text{ Nm}^3 \text{ de combustible)}$ |
|--------------|------------------------------------------------------------|
| $CO_2$       | 120,2991                                                   |
| $H_2O$       | $228,3799 + 0,093772 \times \beta$                         |
| $O_2$        | $\beta$                                                    |
| $N_2$        | $844,6063 + 3,76 \times \beta$                             |
| Total        | $1193,2853 + 4,853772 \times \beta$                        |

Calcul de valeur de  $\beta$ :

$$\beta = V_t \times X_{O_2}$$

**Four D**

$$\beta = (1193,2853 + 4,853772 \times \beta) \times 11,9\%$$

$$\beta = 336,1756 \text{ Nm}^3$$

**Four C**

$$\beta = (1193,2853 + 4,853772 \times \beta) \times 9,4\%$$

$$\beta = 206,2892 \text{ Nm}^3$$

Les compositions réelles des fumées dans les deux fours sont données dans le tableau (II-8).

**Tableau II-8:** Les compositions réelles des fumées dans les deux Fours.

|                       | <b>Four D</b>                           |          | <b>Four C</b>                           |          |
|-----------------------|-----------------------------------------|----------|-----------------------------------------|----------|
| Constituants          | $V (Nm^3 / 100 Nm^3_{de\ combustible})$ | %vol     | $V (Nm^3 / 100 Nm^3_{de\ combustible})$ | %vol     |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | 120,2991                                | 4,259581 | 120,2991                                | 5,482915 |
| <b>H<sub>2</sub>O</b> | 259,0987                                | 9,174233 | 247,23                                  | 11,26809 |
| <b>O<sub>2</sub></b>  | 336,1756                                | 11,90339 | 206,2892                                | 9,402116 |
| <b>N<sub>2</sub></b>  | 2108,627                                | 74,66279 | 1620,254                                | 73,84688 |
| Total                 | 2824,2                                  | 100      | 2194,072                                | 100      |

Exemple de calcul du pourcentage volumique :

**Four D:**

$$2824,2 \rightarrow 100\%$$

$$120,2991 \rightarrow x$$

$$x = 4,259581 \%$$

**Four C:**

$$2194,072 \rightarrow 100\%$$

$$120,2991 \rightarrow x$$

$$x = 5,482915\%$$

#### II.2.3.4 Calcul de la chaleur spécifique de chaque constituant

A partir des valeurs de l'annexe G, on peut calculer les valeurs de la chaleur spécifique moyenne de chaque constituant en utilisant la méthode de l'interpolation pour une valeur précise

**Four D:**

200 → 7  
285 →  $cp_{N_2}$   
300 → 7,04

$$cp_{N_2} = 7,034 \text{ kcal/kmol } ^\circ\text{C}$$

200 → 7,15  
285 →  $cp_{O_2}$   
300 → 7,28

$$cp_{O_2} = 7,2605 \text{ kcal/kmol } ^\circ\text{C}$$

200 → 8,12  
285 →  $cp_{H_2O}$   
300 → 8,22

$$cp_{H_2O} = 8,205 \text{ kcal/kmol } ^\circ\text{C}$$

200 → 9,65  
285 →  $cp_{CO_2}$   
300 → 10,06

$$cp_{CO_2} = 9,9985 \text{ kcal/kmol } ^\circ\text{C}$$

#### II.2.3.4.1 Chaleur spécifique moyenne des fumées ( $Cp_{moy}$ )

Nous utilisons la formule (II- 18) pour calculer la chaleur spécifique moyenne des fumées :

Les valeurs calculées de chaleur spécifique de chaque constituant et moyenne des fumées sont reportées dans le tableau suivant :

**Tableau II-9:** Chaleurs spécifiques des fumées.

|                                   | <b>Four D</b>                  |           |                         | <b>Four C</b>                  |           |                         |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------------|
| Constituants                      | $cp_i(kcal / kmole. ^\circ C)$ | $y_i(\%)$ | $cp_i \times y_i / 100$ | $cp_i(kcal / kmole. ^\circ C)$ | $y_i(\%)$ | $cp_i \times y_i / 100$ |
| <b>CO<sub>2</sub></b>             | 9,9985                         | 4,259581  | 0,425894                | 9,9985                         | 5,482915  | 0,548209                |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>             | 8,205                          | 9,174233  | 0,752746                | 8,205                          | 11,26809  | 0,924547                |
| <b>O<sub>2</sub></b>              | 7,2605                         | 11,90339  | 0,864246                | 7,2605                         | 9,402116  | 0,682641                |
| <b>N<sub>2</sub></b>              | 7,034                          | 74,66279  | 5,251781                | 7,034                          | 73,84688  | 5,194389                |
| <b>cp<sub>moy</sub></b>           | 7,294667                       |           |                         | 7,349786                       |           |                         |
| Débit des fumées<br><b>kmol/h</b> | 1229,7422                      |           |                         | 1181,1998                      |           |                         |

### II.2.3.5 Calcul des quantités de chaleur perdues par les fumées dans les deux fours

Pour calculer la quantité de chaleur perdue par les fumées dans les deux fours, on utilise l'équation (II-17):

#### Four C

$$Q_{\text{fumées}} = 1181,1998 \times 7,349786 \times (285 - 0)$$

$$Q_{\text{fumées}} = 2,47424624 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

#### Four D

$$Q_{\text{fumées}} = 1229,7422 \times 7,294667 \times (285 - 0)$$

$$Q_{\text{fumées}} = 2,55660956 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

Nous remarquons que la quantité de chaleur perdue par les fumées dans le four D était plus grande que celles perdues par les fumées dans le four C.

## II.2.4 Quantité de chaleur perdue par les parois

La notion de rendement d'un four apparaît par le fait que le débit de chaleur libérée aux brûleurs par la combustion n'est pas intégralement transmis au fluide procédé. On constate en effet des pertes thermiques par les parois du four ( $Q_{\text{parois}}$ ) sont dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériaux réfractaires. Dans le cas des fours récents de grande puissance thermique elles représentent 1 à 2 % de chaleur libérée aux brûleurs ( $Q_{\text{entrée}}$ ). Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciens dont le réfractaire est défectueux

Pour calculer la quantité de chaleur perdue par les parois on a utilisé la formule suivante :

$$Q_{\text{parois}} = 2\% \times Q_{\text{fournie}} \left( \frac{\text{kcal}}{h} \right). \quad (II-24)$$

### Four C

$$Q_{\text{parois}} = 0,02 \times 20,05320286 \times 10^6$$

$$Q_{\text{parois}} = 0,4010640572 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

### Four D

$$Q_{\text{parois}} = 0,02 \times 20,87730722 \times 10^6$$

$$Q_{\text{parois}} = 0,4175461444 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

## II.2.5 Quantité de chaleur absorbée

En utilisant l'équation (II-1) pour calculer la chaleur absorbée :

### Four C

$$Q_{ABS} = 20,05320286 - 0,4010640572 - 2,47424624$$

$$Q_{ABS} = 17,1778926 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

#### Four D

$$Q_{ABS} = 20,87730722 - 0,4175461444 - 2,55660956$$

$$Q_{ABS} = 17,9031515 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

### II.2.6 Calcul du rendement technique

Le calcul du rendement a été effectué à partir de l'équation (II- 2)

#### Four C

$$\eta = \frac{20053202,86 - 2474246,24 - 401064,0572}{20053202,86} \times 100$$

$$\eta = 85,66\%$$

#### Four D

$$\eta = \frac{20877307,22 - 417546,1444 - 2556609,56}{20877307,22} \times 100$$

$$\eta = 85,75\%$$

### II.2.7 Quantité de chaleur absorbée et libérée Cas design

Les paramètres et les conditions de service des deux fours ; ces paramètres sont donnés pour le bon fonctionnement de four et pour éviter la dégradation d'huile ; cas design sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II- 10:**Paramètres et conditions de service des fours (cas design) (Annexe 2).

|                  | Four C          | Four D          |
|------------------|-----------------|-----------------|
| Fluide           | Huile TORADA TC | Huile TORADA TC |
| Débit (Max) Kg/h | 900.000         | 861.000         |

|                                                                       |        |          |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|----------|
| Perte de pression allouée <i>MPa</i>                                  | 0,3    | 0, 3     |
| Perte de pression calculée <i>MPa</i>                                 | 0,28   | 0,26     |
| Densité flux chaleur moyenne calculée<br><i>Kcal/h. m<sup>2</sup></i> | 32.355 | 32.000   |
| Température maximum de film<br>interne °C                             | 250    | 300      |
| Facteur d'encrassement <i>m<sup>2</sup>°C/W</i>                       | 0,0002 | 0,000215 |
| Rendement (design) %                                                  | 86     | 85,5     |
| PCI kcal/kg                                                           | 11106  | 11511.15 |
| Débit fuel gaz (design) kg/h                                          | 2800   | 2900     |

La quantité de chaleur absorbée par l'huile TORADA TC 32 est donnée par la formule suivante :

$$Q_{absorbee} = \dot{n} \times cp_{moy} \times (T_f - T_i). \quad (II- 25)$$

Avec :

- $\dot{n}$  : débit maximale d'huile en (kg/h) ;
- $cp_{moy}$  : chaleur spécifique moyenne d'huile (kcal/kmol°C) ;
- $T_f$  : température d'huile à la sortie de four (°C) ;
- $T_i$  : température sortie d'huile à l'entrée de four (°C).

**Application numérique :**

$$Q_{ABS} = 900000 \times 0,565 \times (175 - 120) = 27,967500 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

La quantité de chaleur fournie par la réaction de combustion est donnée par la formule suivante :

$$Q_{fournie} = PCI \times D_{fg} \left( \frac{kcal}{h} \right). \quad (II-26)$$

- $PCI$  : Pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz ( $kcal/kg$ ) (Voir annexe A) ;
- $D_{fg}$  : Débit du fuel gaz (max) ( $kg/h$ ).

**Application numérique :**

$$Q_L = 2800 \times 11106 = 31,096800 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

Les calculs concernant le cas de design sont résumés sur le tableau suivant :

**Tableau II- 11:** les rendements thermiques des fours.

|                   | Four 401/6201C | Four 401/6201D |
|-------------------|----------------|----------------|
| $Q_{abs}(kcal/h)$ | 27,967500      | 28,464660      |
| $Q_L(kcal/h)$     | 31,096800      | 33,382335      |
| $\eta$ (%)        | 89,93691       | 85,26863       |

## II.2.8 Quantité de chaleur maximale fournie par les deux fours

La quantité de chaleur fournie par les deux fours dans le cas de la charge maximum à 100% du traitement est représentée dans le tableau suivant :

**Tableau II- 12:** Récapitulatif des calculs chaleur fournie (max).

|                                 | Four C                  | Four D                  |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Débit fuel gaz (max) ( $kg/h$ ) | 2800                    | 2900                    |
| $PCI$ ( $Kcal/kg$ )             | 10773,62                | 10773,62                |
| $Q_L$ (max) ( $kcal/h$ )        | $30,166136 \times 10^6$ | $31,243498 \times 10^6$ |

|                          |                         |                         |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\eta(\%)$               | 85,66                   | 85,75                   |
| $Q_{abs} (max) (kcal/h)$ | $25,8403121 \cdot 10^6$ | $26,7912995 \cdot 10^6$ |

### II.2.9 Comparaison entre quantité de chaleur maximale fournie par les deux fours et quantité de chaleur des rebouilleurs

Le complexe GP2/Z comprend deux colonnes de séparation et un dééthaniseur, chacun nécessitant une quantité de chaleur spécifique pour alimenter ses rebouilleurs et assurer sa fonction. Ces valeurs sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau II- 13:** Les quantités de chaleur des Rebouilleurs (cas Design).

| Equipement                                    | La quantité de chaleur |
|-----------------------------------------------|------------------------|
| Rebouilleur du Splitter A ( <i>kcal/h</i> )   | $12,24 \cdot 10^6$     |
| Rebouilleur du Splitter B ( <i>kcal/h</i> )   | $12,24 \cdot 10^6$     |
| Rebouilleur du Dééthaniseur ( <i>kcal/h</i> ) | $0,56 \cdot 10^6$      |

Pour assurer la chauffe des deux splitters A et B et du dééthaniseur on doit fournir une quantité de chaleur :

$$Q_{Abs} = Q_{rebA} + Q_{rebB} + Q_{det} \left( \frac{kcal}{h} \right) \quad (II- 27)$$

$$Q_{ABS} = 24,48 \times 10^6 kcal/h$$

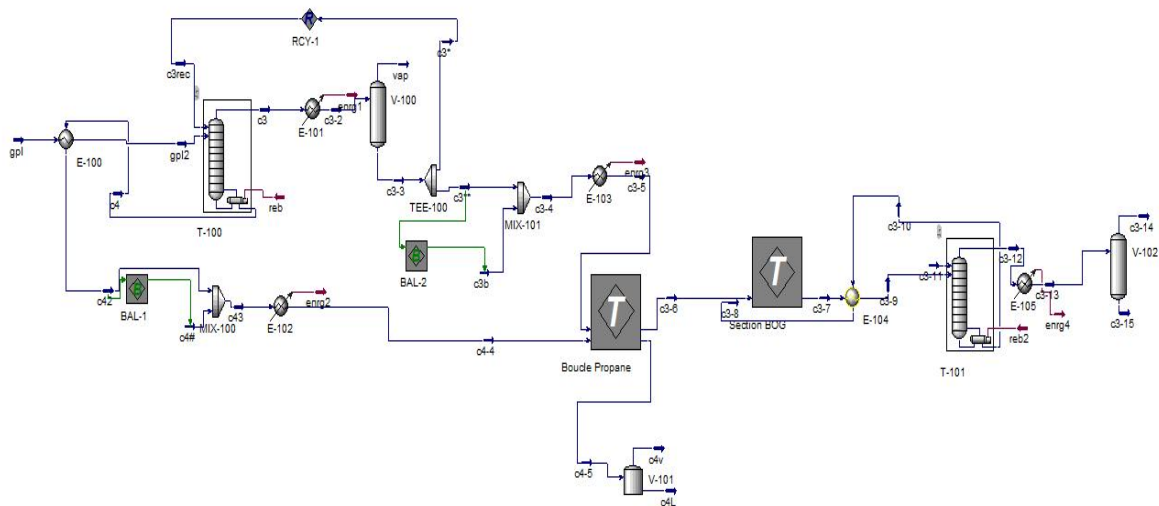
En comparant les deux quantités de chaleur calculées des fours C et D respectivement ( $25,8403121 \cdot 10^6 kcal/h$ ,  $26,7912995 \cdot 10^6 kcal/h$ ) et celle du rebouilleur, on trouve qu'elles sont nettement supérieures. Par conséquent, on peut conclure qu'un seul four peut répondre individuellement aux besoins énergétiques du complexe.

## II.3 Simulation du procédé étudié

L'étude de séparation porte principalement sur deux unités clés : l'unité de séparation et le four thermique.

### II.3.1 Schéma du procédé de séparation

Le schéma ci-dessous (**Figure II-1**) illustre l'ensemble du procédé de séparation et de liquéfaction du GPL tel qu'il a été modélisé à l'aide du simulateur Aspen HYSYS, en intégrant les principales unités opérationnelles et les conditions réelles de fonctionnement.



**Figure II-1** : Schéma de procédé de séparation par le logiciel Aspen HYSYS.

Les principales parties du procédé étudié sont développées une par une.

#### II.3.1.1 Bloc d'alimentation.

Les valeurs du débit, pression, température et composition du GPL ont été saisies manuellement (**Figure II-2**). La composition du gaz est celle définie dans (**Tableau II-2**).

| Stream Name                   | gpl         | Liquid Phase |
|-------------------------------|-------------|--------------|
| Vapour / Phase Fraction       | 0,0000      | 1,0000       |
| Temperature [C]               | 38,00       | 38,00        |
| Pressure [kPa]                | 2300        | 2300         |
| Molar Flow [kgmole/h]         | 1827        | 1827         |
| Mass Flow [kg/h]              | 9,000e+004  | 9,000e+004   |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 168,6       | 168,6        |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]    | -1,295e+005 | -1,295e+005  |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C]   | 92,86       | 92,86        |
| Heat Flow [kJ/h]              | -2,366e+008 | -2,366e+008  |
| Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 167,2       | 167,2        |
| Fluid Package                 | Basis-1     |              |
| Utility Type                  |             |              |

Figure II- 2 : Conditions d'entrée GPL.

### II.3.1.2 Préchauffeur de charge « E100 »

Le chauffage initial du gaz est simulé par échange thermique afin d'élever la température du GPL et le préparer pour l'étape suivante, et également d'abaisser la température du propane séparé (Figure II-3).

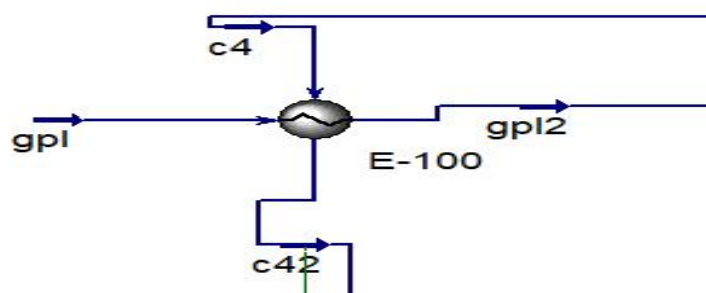


Figure II- 3 : Schéma de process du préchauffeur de charge.

### II.3.1.3 Colonne de séparation (Reboiled Absorber) « T-100 »

La spécification des courants d'alimentation (gpl2 et c3rec) ainsi que la pression (20 bars) de fonctionnement de la colonne de séparation et la spécification de débit (column flow rate) pour

le courant c3 avec une valeur de  $1,56 \text{ t/h}$  conduit à la convergence, d'où le calcul des conditions des flux de sortie vapeur (c3) et liquide (c4).

Le liquide du fond de la colonne (butane) pénètre dans le rebouilleur où il se vaporise partiellement. La partie vaporisée retourne vers la colonne en dessous du 46<sup>ème</sup> plateau comme rebouillage vapeur alors que l'autre partie du butane s'écoule vers le préchauffeur le GPL en circulant en côté calandre. (Figure II-4).

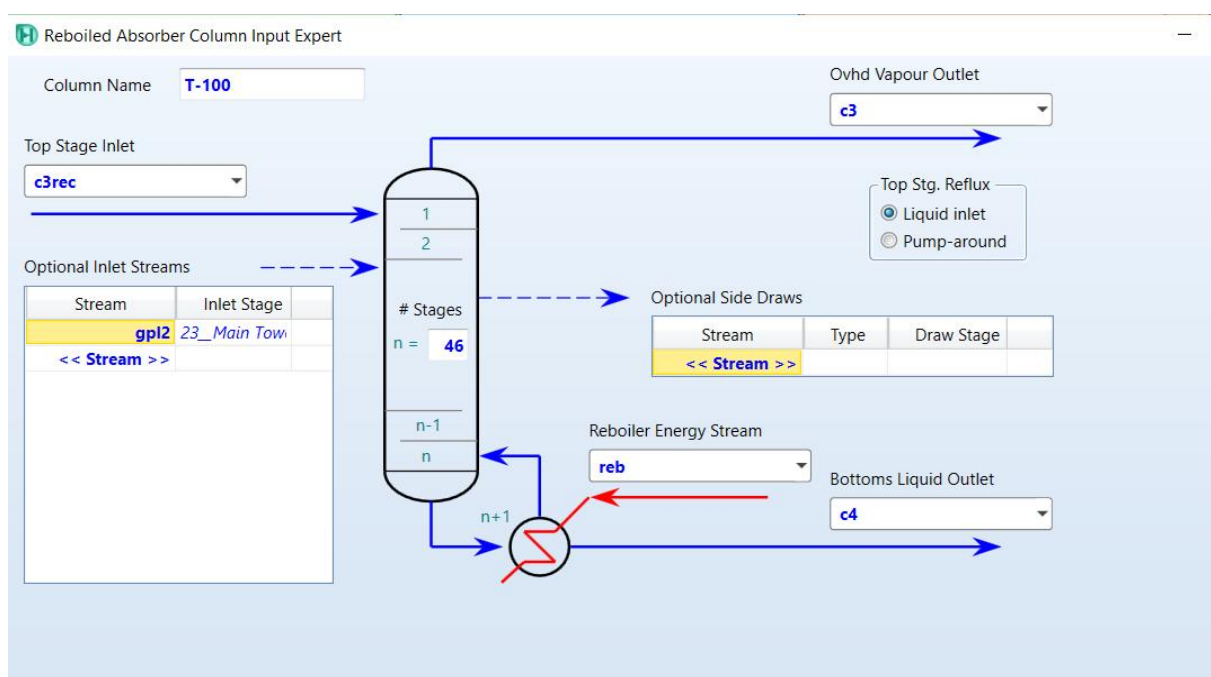
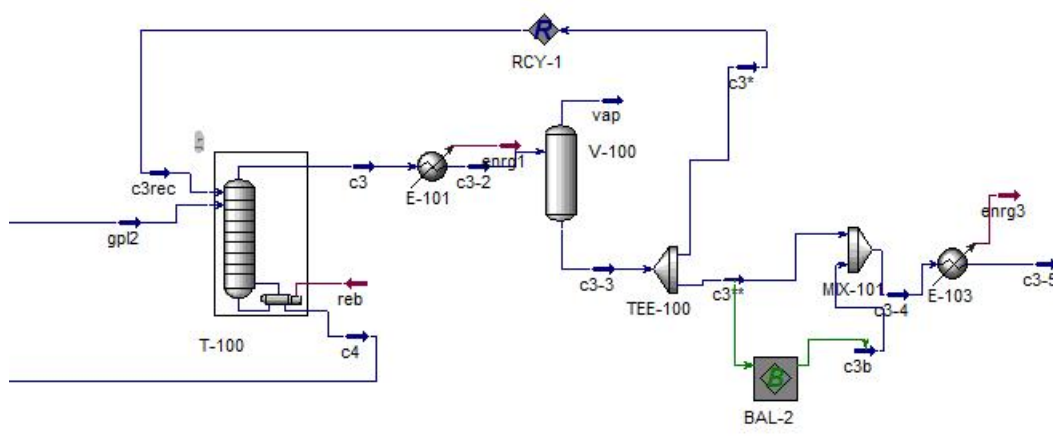


Figure II-4 : Schéma de colonne séparation (Reboiled Absorber) « T-100 ».

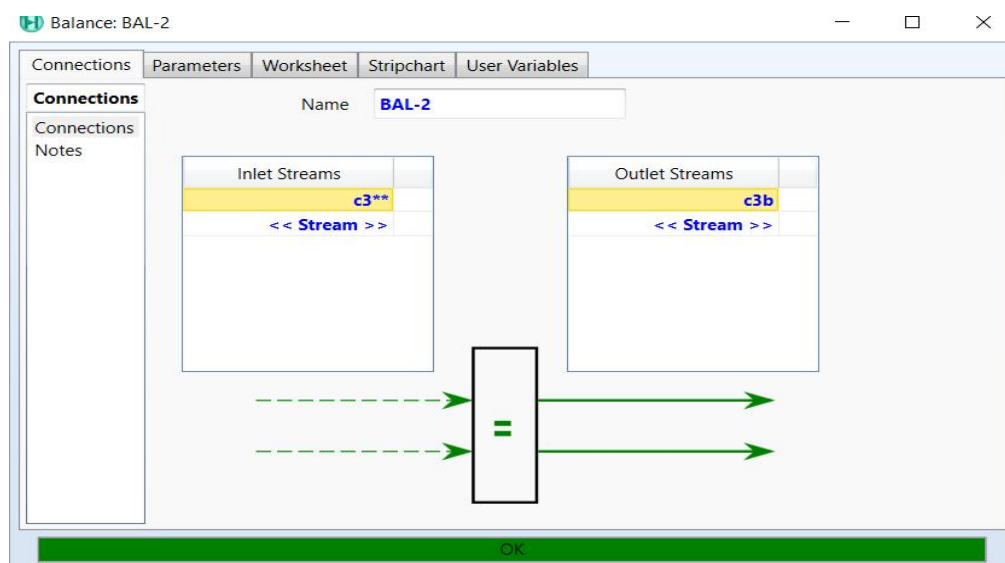
### II.3.1.4 Circuit du propane commercial

Le propane commercial extrait comme produit de tête de distillation est condensé en totalité au niveau de l'aérocondenseur (cooler E-101). Le propane (C3-2) de température  $45^{\circ}\text{C}$  et de pression 20 bar est orienté vers le ballon de reflux (V-100). La vapeur est dirigée vers la torche HP tandis que le liquide de fond est divisé en deux parties : une partie (c3\*) est réintroduite (recyclage RCY-1) en tête de colonne de séparation (c3rec) de débit  $109,8 \text{ t/h}$ , l'autre partie (c3\*\*) du propane s'écoule vers le 2<sup>ème</sup> aérocondenseurs (E-103). La sortie de ce dernier (c3-5) s'écoule vers la boucle de réfrigération avec une température de  $40^{\circ}\text{C}$  et une pression de 16 bar (Figure II-5).

L'opération Balance fournit une installation de bilan thermique et débit massique à usage général. (**Figure II-6**).



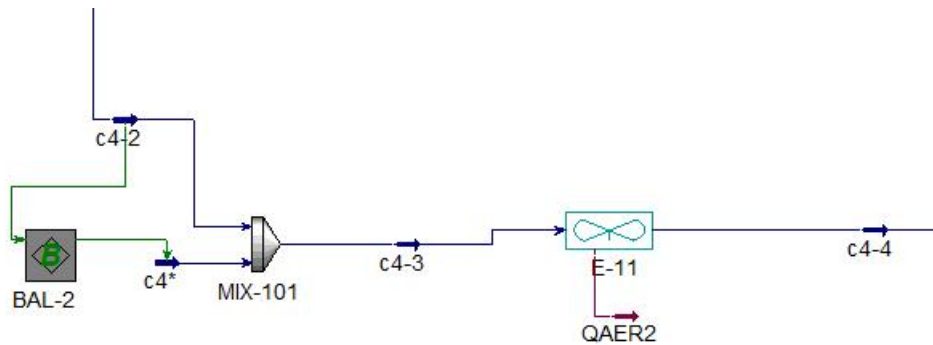
**Figure II-5** : Schéma de circuit de propane.



**Figure II-6** : Schéma de circuit de propane.

### II.3.1.5 Circuit du butane commercial

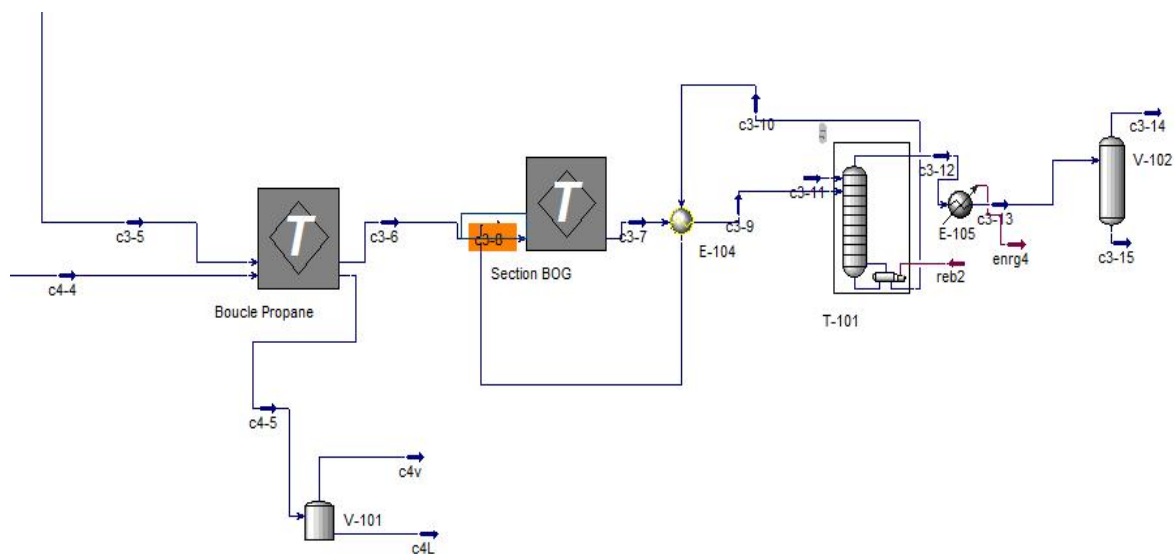
Le propane commercial extrait comme produit de fond de distillation s'écoule vers l'aérocondenseur (Cooler E-11) pour réduire la température de  $65,22^{\circ}\text{C}$  (c4-3) à  $40^{\circ}\text{C}$  (c4-4), cette dernière se dirige vers la boucle de réfrigération (**Figure II- 7**).



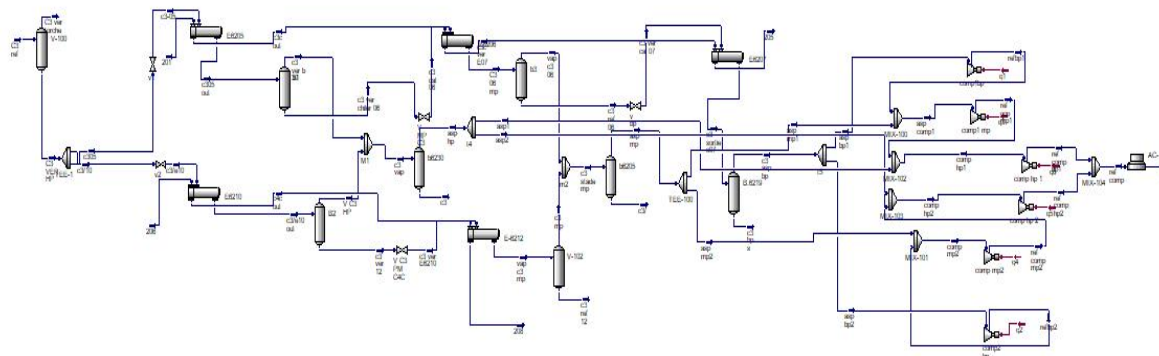
**Figure II- 7** : Schéma de circuit de butane.

### II.3.1.6 Boucle de refrigeration

La section de réfrigération a pour fonction d'abaisser la température des produits propane et butanes commerciaux jusqu'à leurs températures de stockage respectives, soit  $-42^{\circ}\text{C}$  pour le propane et  $-12^{\circ}\text{C}$  pour le butane, à pression atmosphérique (**Figure II-8**). Le système de réfrigération est de type cascade et utilise du propane pur comme fluide frigorigène. Le refroidissement s'effectue au moyen d'une boucle fermée comportant trois niveaux de température, à savoir  $11,8^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$  et  $-36^{\circ}\text{C}$ , correspondant respectivement aux niveaux de pression haute (5 bars), moyenne (1,5 bars) et basse (0,5 bars) (**Figure II-9**).



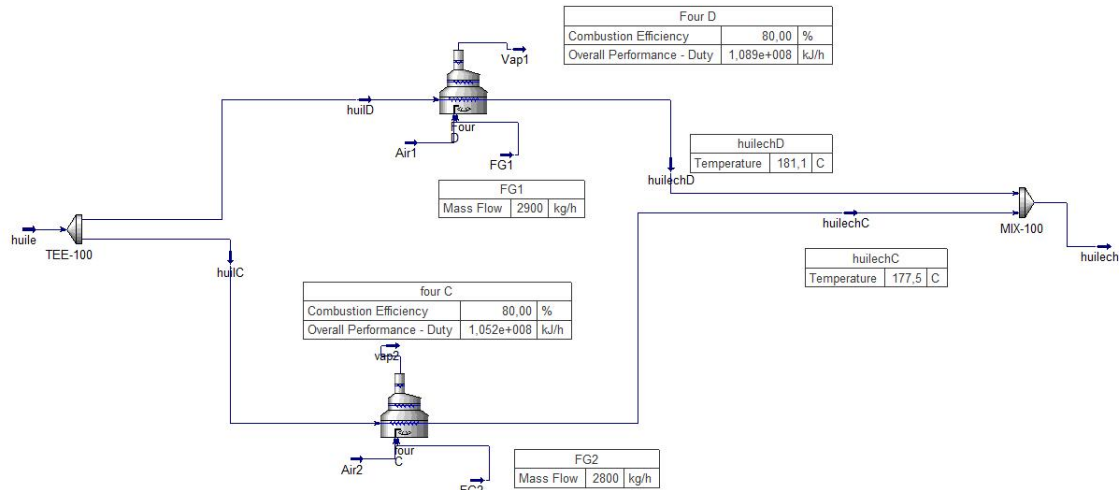
**Figure II- 8 : Schéma de réfrigération.**



**Figure II- 9 : Schéma de section BOG.**

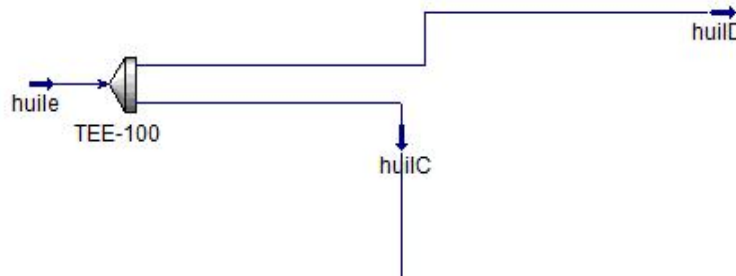
### II.3.2 Simulation des fours

La figure ci-dessous illustre le schéma de process généré par le logiciel Aspen HYSYS, représentant la configuration technique des fours C et D au sein du complexe.



**Figure II- 10 : Schéma des deux fours (D et C).**

Avant d'entamer la simulation, il est indispensable de définir les propriétés des composants et de de spécifier le modèle thermodynamique. L'huile utilisée comme fluide caloporteur est définie comme un élément hypothétique (hypothetical).



**Figure II- 11 : Schéma de courant d'entrée d'huile.**

Pour créer un composé hypothétique (huile), nous allons dans l'onglet Listes de composants, puis Hypothétiques, et ajoutons un nouveau composé, où nous entrons les valeurs du point d'ébullition normal (normal boiling point) de 300°C et la densité (Liquid Density) de 860 kg/m<sup>3</sup>, puis nous cliquons sur estimate unknown afin que le programme se charge automatiquement d'estimer le reste des propriétés physiques et thermiques du composé.

Par la palette on ajoute le four (fired heater) et on remplit les courants d'entrée (huileD, FG1 et Air1) et sortie (huilechD et vap1). L'excès d'air est fixé à 15% et l'efficacité à 80 %.

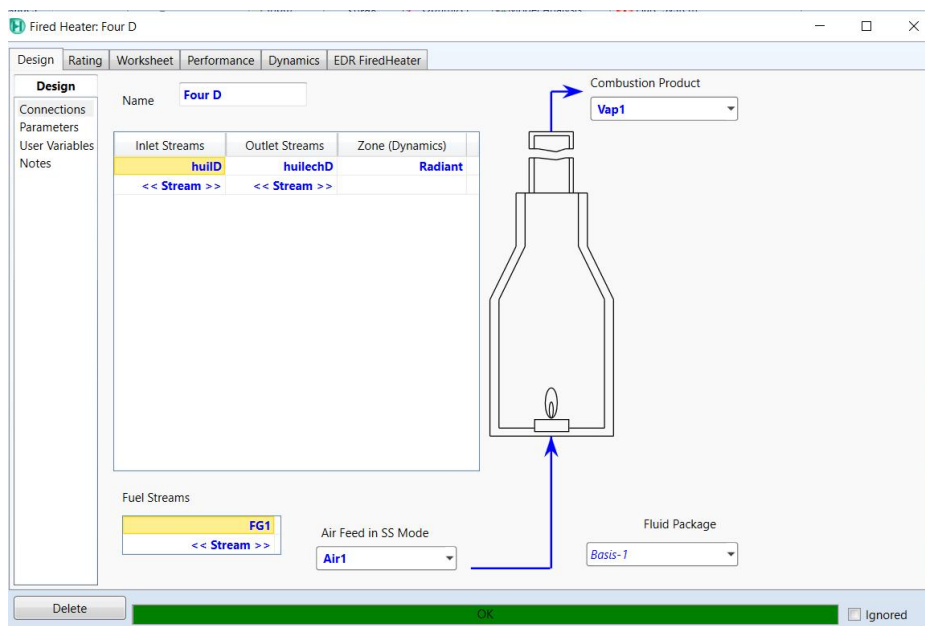


Figure II- 12 : Schéma de four D.

## II.4 Comparaison entre les résultats de calcul et de la simulation

Réalisation d'une étude comparative et d'une évaluation hydraulique et thermique intégrée entre les calculs manuels basés sur les lois thermodynamiques classiques et les équations et résultats des simulations numériques effectuées par le logiciel Aspen HYSYS pour les conditions de fonctionnement actuelles et design (Cas actuel et cas design).

### Cas actuel

Le logiciel HYSYS utilise une efficacité constante prédéfinie dans le système de simulation pour les deux fours D et C à 80%, alors que dans le calcul manuel, l'efficacité des deux fours est calculée plus précisément sur la base des pertes réelles par les parois et par la fumée (85,66 %pour le four C et 85,75 % pour le four D).

Les résultats de la simulation ont montré que la quantité de chaleur absorbée par l'huile ( $16,71 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  et  $17,38 \times 10^6 \text{ kcal/h}$ ) pour les fours C et D respectivement diffèrait

légèrement de la quantité de chaleur dans les calculs manuels ( $17,18 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  et  $17,90 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  pour les fours C et D respectivement).

### **Cas design**

Les calculs indiquent que le rendement des deux fours se situe entre 85 et 89 %, alors que la simulation l'a fixé, avec moins de précision, à 80 % pour les deux fours, par mesure de sécurité. Les valeurs de la quantité de chaleur absorbée obtenues par simulation ( $25,13 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  pour le four C et  $26,03 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  pour le four D) sont légèrement inférieures à celles issues des calculs manuels ( $27,96 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  pour le four C et  $28,46 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  pour le four D).

Les résultats ont montré une excellente convergence entre les calculs manuels et les simulations. Les légères différences observées peuvent être attribuées aux facteurs suivants :

Le logiciel Aspen HYSYS utilise un module de dynamique sophistiqué le Peng Robinson (Fluid Package) qui calcule la viscosité, la masse volumique, la capacité thermique (cp), enthalpie et entropie en temps réel et en continu en fonction de la température et de la pression. À l'inverse, les calculs manuels reposent sur des capacités thermiques moyennes issues de tables de données techniques statiques et obsolètes. De plus, le calcul manuel distingue avec précision les pertes à travers les parois du four et les pertes par les gaz de combustion, en se basant sur la composition réelle de l'air en excès dans le mélange (cas actuel), tandis que le logiciel tend à simplifier le modèle de combustion en supposant un rendement global conservateur (80%).

### **II.4.1 Conclusion**

Malgré quelques écarts entre les calculs manuels et les simulations, les résultats ont montré que la charge thermique combinée des deux fours est suffisante pour couvrir les  $24,48 \times 10^6 \text{ kcal}$  nécessaire au fonctionnement de tous les rebouilleurs de séparation du complexe. Les calculs manuels et les simulations confirment de manière cohérente qu'un seul four C ou four D possède la capacité totale de satisfaire tous les besoins thermiques du complexe,

garantissant ainsi une flexibilité opérationnelle optimale sans compromettre les spécifications de séparation ni la qualité du produit.

## Chapitre III :

### Etude des différentes situations possibles

#### III.1 Introduction

Ce chapitre vise principalement à mener une étude analytique approfondie des différents scénarios de fonctionnement possibles pour les deux fours (four D et four C). Par simulation, nous étudions l'influence des variations du débit du fuel gaz et de la température de l'huile chaude sur la quantité de chaleur absorbée. Ces résultats nous permettront d'évaluer les performances du système dans différentes conditions de fonctionnement.

#### III.2 Etude de cas 1

Dans cette situation, le débit du gaz combustible a été fixé à  $2900 \text{ kg/h}$  pour le four D et à  $2800 \text{ kg/h}$  pour le four C. Les résultats de la simulation ont permis de déterminer la température de l'huile chaude et les valeurs de la quantité de chaleur.

**Tableau III- 1:** Paramètres de fonctionnement des deux fours (débit fixe).

| Cas 1                                   |                    |                    |
|-----------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Four                                    | Four D             | Four C             |
| Température°C                           | 181,1              | 177,5              |
| Débit de fuel gaz( $\text{kg/h}$ )      | 2900               | 2800               |
| Quantité de chaleur ( $\text{kcal/h}$ ) | $2,603 \cdot 10^7$ | $2,513 \cdot 10^7$ |

Le four D a atteint une température plus élevée que le four C. De plus, les résultats montrent que la quantité de chaleur absorbée par le four D est supérieure à celle absorbée par le four C, avec des valeurs respectives de  $2,603 \times 10^7 \text{ kcal/h}$  et  $2,513 \times 10^7 \text{ kcal/h}$ .

Ces résultats démontrent que le four D offre un rendement thermique supérieur, permettant d'atteindre une température d'huile plus élevée et une plus grande quantité de chaleur.

On constate que la quantité de chaleur produite par les deux fours est largement supérieure à la quantité nécessaire pour le fonctionnement des deux splitters et du dééthaniseur. La solution adoptée par le complexe pour éviter le surplus est réduire le débit du fuel gaz pour ne produire que la puissance nécessaire.

### III.3 Etude de cas 2 et 3

Dans ce cas, nous allons étudier la possibilité de la mise en service d'un seul four. Le débit du fuel gaz est fixé à la valeur de  $5700 \text{ (kg/h)}$ .

**Tableau III- 2:** Paramètres de fonctionnement du four C.

| Cas 2                        |                     |
|------------------------------|---------------------|
| Four                         | Four C              |
| Température(°C)              | 179,2               |
| Débit de fuel gaz(kg/h)      | 5700                |
| Quantité de chaleur (kcal/h) | $5,117 \times 10^7$ |

**Tableau III- 3:** Paramètres de fonctionnement du four D avec débit fixe.

| Cas 3                        |                     |
|------------------------------|---------------------|
| Four                         | Four D              |
| Température(°C)              | 179,2               |
| Débit de fuel gaz(kg/h)      | 5700                |
| Quantité de chaleur (kcal/h) | $5,117 \times 10^7$ |

Lorsque le débit de fuel gaz est fixé à  $5700 \text{ kg/h}$  pour un seul four en service (Four C ou Four D), la température de sortie de l'huile thermique se stabilise à  $179.2^\circ\text{C}$ , avec une quantité de chaleur absorbée égale à  $5,117 \times 10^7 \text{ kcal/h}$ .

### III.4 Etude de cas 4 et 5

Dans cette étude de cas, nous allons analyser l'effet de la variation de la température de sortie de l'huile chaude, et de déterminer la quantité de fuel gaz nécessaire. Cette analyse est menée sur chacun des deux fours.

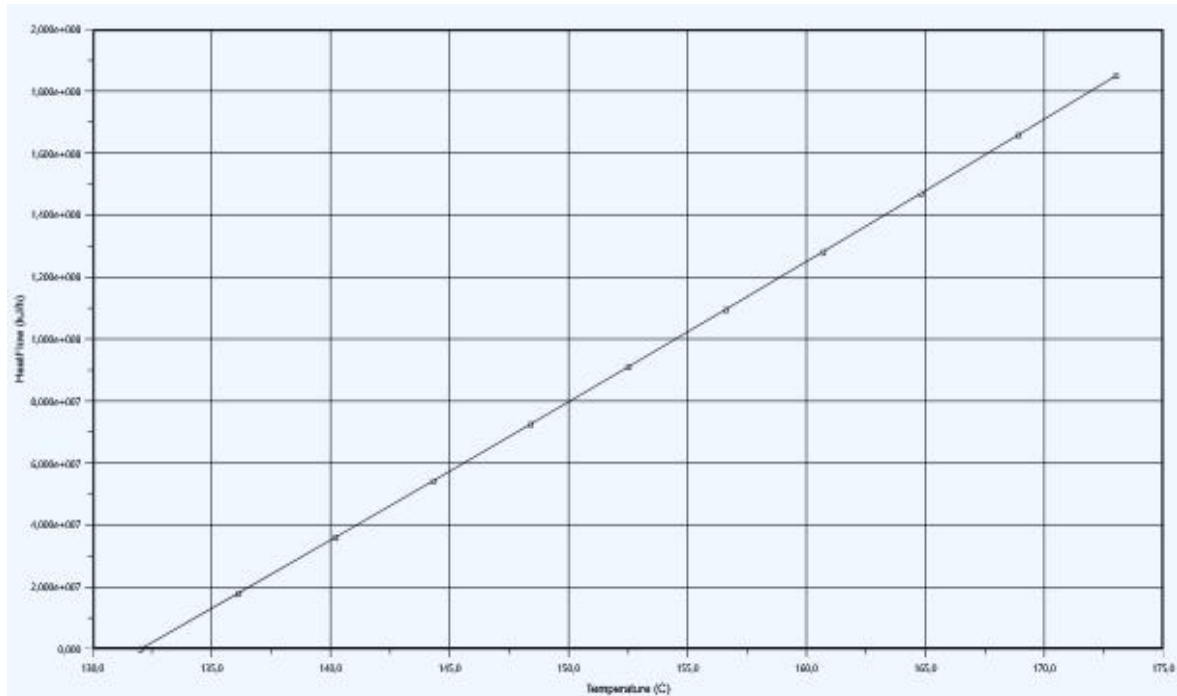
**Tableau III- 4:** Paramètres de fonctionnement du four D avec la température fixe.

| Cas 4                                   |                     |
|-----------------------------------------|---------------------|
| Four                                    | Four D              |
| Température( $^\circ\text{C}$ )         | 173                 |
| Débit de fuel gaz( $\text{kg/h}$ )      | 4923,5998           |
| Quantité de chaleur ( $\text{kcal/h}$ ) | $4,420 \times 10^7$ |

**Tableau III- 5:** Paramètres de fonctionnement du four C avec la température fixe.

| Cas 5                                   |                     |
|-----------------------------------------|---------------------|
| Four                                    | Four C              |
| Température( $^\circ\text{C}$ )         | 173                 |
| Débit de fuel gaz( $\text{kg/h}$ )      | 4924                |
| Quantité de chaleur ( $\text{kcal/h}$ ) | $4,420 \times 10^7$ |

Lorsque la température est fixée à  $173^\circ\text{C}$ , la consommation du fuel gaz se stabilise à environ  $4924 \text{ kg/h}$  pour chacun des deux fours, avec une quantité de chaleur identique de  $4,420 \times 10^7 \text{ kcal/h}$ .



**Figure III-1 :** Courbe de chaleur absorbée en fonction de température.

La (**Figure III-1**) représente la variation de la quantité de chaleur (Heat Flow) en fonction de la température. On observe une relation linéaire entre ces deux paramètres, lorsque la température de l'huile thermique augmente, la quantité de chaleur absorbée augmente proportionnellement.

### III.5 Conclusion

Les résultats obtenus via la simulation Aspen HYSYS valident la flexibilité opérationnelle des fours C et D et que chaque four possède une réserve de puissance suffisante pour compenser l'arrêt de son homologue. Cette configuration garantit la continuité du processus de production sans dégradation majeure de la température de l'huile, ce qui est crucial pour la sécurité et la stabilité des unités en aval du complexe.

## Conclusion générale et recommandations

L'objectif principal de ce travail était de déterminer les puissances optimales des splitters et du dééthaniseur au sein du complexe GP2/Z, en adéquation avec l'énergie thermique fournie par chaque four. Pour atteindre cet objectif dans le cadre de l'optimisation des performances, nous avons procédé comme suit :

Une analyse approfondie du fonctionnement de la zone de traitement concernée (zone de séparation).

Le suivi et l'analyse des données de fonctionnement des séparateurs 407/6201A et des fours 401/6201C/D ; une étude analytique complète des différents scénarios de fonctionnement possibles pour les deux fours (four D et four C) à l'aide du logiciel Aspen Hysys.

La réalisation des calculs manuels pour évaluer l'efficacité et la flexibilité opérationnelle des deux fours.

Pour assurer la chauffe des deux splitter A et B et du dééthaniseur, il est nécessaire de produire une quantité de chaleur de  $24,48 \times 10^6 \text{ kcal/h}$ . D'autre part, les deux quantités de chaleur absorbées au niveau des fours C et D sont évaluées, par calcul et par simulation, à  $(25,8403121 \times 10^6 \text{ kcal/h}, 26,7912995 \times 10^6 \text{ kcal/h})$  , respectivement. Ces résultats montrent que la puissance développée par les deux fours suffit largement. En conséquence, nous pouvons conclure que l'utilisation d'un seul four permet d'assurer pleinement les besoins énergétiques du complexe.

Comme recommandations, nous proposons le nettoyage périodique de la boucle d'huile de chauffage, le four et les rebouilleurs pour permettront d'augmenter la quantité de chaleur absorbée.

Il faut aussi envisager une étude technico-économique avec l'installation d'un nouvel échangeur, pour le préchauffage de l'air de combustion avec les gaz chaud émis par les

turbines qui permettront d'augmenter le rendement des fours et réduire la consommation de fuel gaz.

Ces actions contribueront à prolonger la durée de vie des équipements, à améliorer la performance globale du complexe et à garantir la conformité des produits aux normes de qualité.

## Bibliographie

- [1] J. L. Nogues, *Étude des fours pétroliers et pétrochimiques*, Editions TECHNIP **1974**.
- [2] "chapitre I : La combustion," [https://staff.univ-batna2.dz/chebira\\_samia/classes/licence-mri/materials/chapitre-i-la-combustion](https://staff.univ-batna2.dz/chebira_samia/classes/licence-mri/materials/chapitre-i-la-combustion) (Accessed on June 8, 2026).
- [3] "Pouvoir calorifique par énergie : définition, conversion PCI PCS," <https://selectra.info/energie/guides/comprendre/pouvoir-calorifique> (Accessed on June 9, 2026), **2019**.
- [4] "Cours de combustion - définitions et équations de combustion," [https://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/combustion\\_equation.html](https://www.azprocede.fr/Cours_GC/combustion_equation.html) (Accessed on June 9, 2026).
- [5] A.-M. Bianchi, Y. Fautrelle, J. Etay, *Transferts thermiques*, EPFL Press **2004**.

# Annexe A

## Datasheet four 401 /6201C.

|                                                                                                              |  |                      |  |                  |  |                           |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------|--|------------------|--|---------------------------|--|
| <br><b>Kvaerner Heurtey</b> |  | Acheteur             |  | Sonatrach        |  | Document 0401-FJ-001      |  |
|                                                                                                              |  | Lieu                 |  | Arzew, Algérie   |  | Service gasoil            |  |
|                                                                                                              |  | Unité                |  | gasoil           |  |                           |  |
|                                                                                                              |  | Projet               |  |                  |  | Type vertical cylindrique |  |
|                                                                                                              |  | Repère               |  | 401/6201.C       |  | Puissance 26,5 Gcal/h     |  |
|                                                                                                              |  | Equipement           |  | - Four           |  | Nb de fours 1             |  |
| dsHTRFR-rev2                                                                                                 |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| Conditions d'étude de procédé                                                                                |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 1 Cas opératoire                                                                                             |  | design               |  |                  |  |                           |  |
| 2 Zone du four                                                                                               |  | radiation convection |  |                  |  |                           |  |
| 3 *Service                                                                                                   |  | gasoil               |  | gaz naturel      |  |                           |  |
| 4 *Chaleur absorbée Gcal/h                                                                                   |  | 26                   |  | 0,5              |  |                           |  |
| 5 *Fluide                                                                                                    |  | gasoil               |  | gaz naturel      |  |                           |  |
| 6 *Débit massique kg/h                                                                                       |  | 900000               |  | 2800             |  |                           |  |
| 7 *Perte de pression allouée bar                                                                             |  | 3                    |  | 0,7              |  |                           |  |
| 8 Perte de pression calculée bar                                                                             |  | 2,8                  |  | 0,3              |  |                           |  |
| 9 *Densité flux chaleur moyen (allouée) kcal/h.m²                                                            |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 10 Densité flux chaleur moyen (calculée) kcal/h.m²                                                           |  | 32355                |  |                  |  |                           |  |
| 11 *Densité flux chaleur max. (allouée) kcal/h.m²                                                            |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 12 Densité flux chaleur max. (calculée) kcal/h.m²                                                            |  | 58239                |  |                  |  |                           |  |
| 13 *Vitesse minimale du fluide m/s                                                                           |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 14 *Vitesse minimale massique du fluide kg/m².s                                                              |  | 2235                 |  | 3228             |  |                           |  |
| 15 *Température. max. film interne (allouée) °C                                                              |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 16 *Température. max. film interne (calculée) °C                                                             |  | 250                  |  | 387              |  |                           |  |
| 17 *Facteur d'encrassement m².h.°C/kcal                                                                      |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 18 *Caractéristique de corrosion mm                                                                          |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| Conditions à l'entrée                                                                                        |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 19 *Débit de liquide kg/h                                                                                    |  | 900000               |  | -                |  |                           |  |
| 20 *Débit de vapeur kg/h                                                                                     |  | -                    |  | 2800             |  |                           |  |
| 21 Température °C                                                                                            |  | 120                  |  | 20               |  |                           |  |
| 22 *Pression bar abs                                                                                         |  | 14                   |  | 14               |  |                           |  |
| 23 *Densité liquide kg/m³                                                                                    |  | 785                  |  | -                |  |                           |  |
| 24 *Poids moléculaire vapeur                                                                                 |  | -                    |  | 18,9             |  |                           |  |
| 25 *Viscosité liquide / vapeur cP                                                                            |  | 1,1/-                |  | -0,01            |  |                           |  |
| 26 *Chaleur spécifique liquide / vapeur kcal/kg°C                                                            |  | 0,54/-               |  | -0,5             |  |                           |  |
| 27 *Conductivité thermique liquide / vapeur kcal/h.m.°C                                                      |  | 0,1/-                |  | -0,027           |  |                           |  |
| Conditions à la sortie                                                                                       |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 28 *Débit de liquide kg/h                                                                                    |  | 900000               |  | -                |  |                           |  |
| 29 *Débit de vapeur kg/h                                                                                     |  | -                    |  | 2800             |  |                           |  |
| 30 *Température °C                                                                                           |  | 175                  |  | 320              |  |                           |  |
| 31 *Pression bar abs                                                                                         |  | 11,2                 |  | 13,7             |  |                           |  |
| 32 *Densité de liquide kg/m³                                                                                 |  | 745                  |  | -                |  |                           |  |
| 33 *Poids moléculaire de vapeur                                                                              |  | -                    |  | 18,9             |  |                           |  |
| 34 *Viscosité liquide / vapeur cP                                                                            |  | 0,65/-               |  | -0,02            |  |                           |  |
| 35 *Chaleur spécifique liquide / vapeur kcal/kg°C                                                            |  | 0,59/-               |  | -0,72            |  |                           |  |
| 36 *Conductivité thermique liquide / vapeur kcal/h.m.°C                                                      |  | 0,09/-               |  | -0,067           |  |                           |  |
| Remarques                                                                                                    |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 37 *Décockage requis                                                                                         |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 38 *Courbe de distillation                                                                                   |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 39 *Flexibilité                                                                                              |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 40                                                                                                           |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 41                                                                                                           |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| Conditions d'étude de la combustion                                                                          |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 42 Type de combustible                                                                                       |  | fuel gaz             |  |                  |  |                           |  |
| 43 Section                                                                                                   |  | radiation convection |  |                  |  |                           |  |
| 44 Cas opératoire                                                                                            |  | design               |  |                  |  |                           |  |
| 45 Excès d'air %                                                                                             |  | 15                   |  |                  |  |                           |  |
| 46 Chaleur libérée calculée Gcal/h                                                                           |  | 30,814               |  |                  |  |                           |  |
| 47 Rendement sur PCI calculé %                                                                               |  | 86                   |  |                  |  |                           |  |
| 48 Rendement sur PCI garanti %                                                                               |  | 85                   |  |                  |  |                           |  |
| 49 Perte thermique %                                                                                         |  | 2                    |  |                  |  |                           |  |
| 50 Température de fumée sortie de section °C                                                                 |  | 810                  |  | 265              |  |                           |  |
| Emission                                                                                                     |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 5                                                                                                            |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 4                                                                                                            |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 3                                                                                                            |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 2                                                                                                            |  |                      |  |                  |  |                           |  |
| 1                                                                                                            |  | 14/06/01             |  | AHs              |  | Mise à jour               |  |
| 0                                                                                                            |  | 21/03/01             |  | CHG              |  | Vérif. après commande     |  |
| Rev                                                                                                          |  | date                 |  | Par              |  | Information               |  |
| SPECIFICATION DE FOUR                                                                                        |  |                      |  | Système métrique |  | page 1/7                  |  |
| dsHTRFR-rev1.xls                                                                                             |  |                      |  |                  |  |                           |  |

| Kvaerner Heurtey                                                 |                                                             | Document 401/6201 |                 |                 | Repère 401/6201.C |          |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------|
| Conditions d'étude mécanique                                     |                                                             |                   |                 |                 |                   |          |
| 1                                                                | Section                                                     | radiation         | convection      | convection      |                   |          |
| 2                                                                | Service                                                     | gasoil            | gaz naturel (1) |                 |                   |          |
| Calcul du faisceau                                               |                                                             |                   |                 |                 |                   |          |
| 3                                                                | Base de calcul d'épaisseur des tubes (code or spec.)        | API 530           |                 |                 |                   |          |
| 4                                                                | Résistance à la rupture (mini ou moy) / durée de vie        | 100000            |                 |                 |                   |          |
| 5                                                                | Pression d'étude                                            | bar               | 20              | 20              |                   |          |
| 6                                                                | Température de fluide d'étude                               | °C                | 250             | 350             |                   |          |
| 7                                                                | Tolérance de température du fluide                          | °C                | 15              |                 |                   |          |
| 8                                                                | Surépaisseur de corrosion                                   | mm                | 3               | 3               |                   | 1        |
| 9                                                                | Pression d'épreuve hydrostatique                            | bar               |                 |                 |                   |          |
| 10                                                               | Traitement thermique des soudures                           | no                |                 |                 |                   |          |
| 11                                                               | Radiographies des soudures                                  | %                 | 10%             | 100%            |                   |          |
| 12                                                               | Température maxi métal tubes (propres)                      | °C                | 260             | 370             |                   | 1        |
| 13                                                               | Température d'étude du métal des tubes                      | °C                | 359             | 420 ("no flow") |                   | 1        |
| 14                                                               | Coefficient interne du film                                 | kcal/h.m².°C      |                 |                 |                   |          |
| Configuration du faisceau                                        |                                                             |                   |                 |                 |                   |          |
| 15                                                               | Orientation du tube (verticale, horizontale ou hélicoïdale) | verticale         | horizontale     | horizontale     |                   |          |
| 16                                                               | Co-courant, Contre-courant, Courants-croisés                | -                 | contre-cour.    | contre-cour.    |                   |          |
| 17                                                               | Matière                                                     | CS                | CS              | CS              |                   | 1        |
| 18                                                               | Spécification du matériau                                   | A 106 B           | A 106 B         | A 106 B         |                   | 1        |
| 19                                                               | Diamètre extérieur                                          | mm                | 168.3           | 141.3           | 114.3             |          |
| 20                                                               | Épaisseur tubes (minimum) (moyenne)                         | mm                | 7.11            | 6.55            | 6.02              | 1        |
| 21                                                               | Nombre de passes                                            |                   | 6               | 1               |                   |          |
| 22                                                               | Nombre de tubes par rangée                                  |                   | 12              | 14              |                   |          |
| 23                                                               | Longueur droite des tubes                                   | mm                | 13211           | 7193            | 7193              |          |
| 24                                                               | Longueur effective des tubes                                | mm                | 13690           | 6719            | 6719              |          |
| 25                                                               | Tubes nus : nombre                                          |                   | 72              | 36              | -                 | 1        |
| 26                                                               | Tubes nus : surface totale exposée                          | m²                | 521.0           | 107.4           | -                 |          |
| 27                                                               | Tubes à surface étendue : nombre                            |                   | -               | 48              | 14                | 1        |
| 28                                                               | Tubes à surface étendue : surface exposée                   | m²                | -               | 1449.5          | 147.7             | 1        |
| 29                                                               | Arrangement (maille carrée ou triangulaire)                 |                   | -               | triangulaire    | -                 |          |
| 30                                                               | Entraxe tubes adjacents                                     | mm                | 304.8           | 254             | 203.2             |          |
| 31                                                               | Entraxe tubes liés                                          | mm                | 304.8           | 254             | 203.2             |          |
| 32                                                               | Distance axe tube à paroi réfractaire                       | mm                | 226.6           | 127             | 203.2             |          |
| 33                                                               | Nb de soudures intermédiaires par tube                      |                   |                 |                 |                   |          |
| Description de la surface étendue                                |                                                             |                   |                 |                 |                   |          |
| 34                                                               | Type (picots, ailettes segmentées ou continues)             | -                 | ailettes        | ailettes        |                   | 1        |
| 35                                                               | Matière                                                     |                   | CS              | CS              |                   | 1        |
| 36                                                               | Hauteur                                                     | mm                |                 | 25.4            | 12.5              | 1        |
| 37                                                               | Diamètre (picots) ou épaisseur (ailettes)                   | mm                |                 | 1.5             | 1.5               | 1        |
| 38                                                               | Nb de picots/plans (pour 63 pl/m) ou ail./m ou ail./ft      |                   |                 | 150             | 118               | 1        |
| 39                                                               | Température maxi. d'extrémité                               | °C                |                 | 313             | 347               | 1        |
| 40                                                               | Rapport surface (total / lisse)                             |                   |                 | 10.12           | 4.373             | 1        |
| Coudes ou boîtes de retour                                       |                                                             |                   |                 |                 |                   |          |
| 41                                                               | Type : Coude ou boîte (Soudé ou dudgeonné)                  | coude             | coude           | coude           |                   |          |
| 42                                                               | Emplacement (caisson ou foyer)                              | foyer             | caisson         | caisson         |                   |          |
| 43                                                               | Quantité (un ou deux côtés ou nombre)                       | deux côtés        | deux côtés      | deux côtés      |                   |          |
| 44                                                               | Matière                                                     | WP B              | WP B            | WP B            |                   | 1        |
| 45                                                               | Spécification du matériau                                   | A 234             | A 234           | A234            |                   | 1        |
| 46                                                               | Série (pour boîtes)                                         | sch 40            | sch 40          | sch 40          |                   | 1        |
| Raccordements                                                    |                                                             |                   |                 |                 |                   |          |
| 47                                                               | Type (soudé ou à bride)                                     | soudé             | soudé           | soudé           |                   |          |
| 48                                                               | Type de bride                                               |                   |                 |                 |                   |          |
| 49                                                               | Face de bride (RM ou RMS ou autre)                          |                   |                 |                 |                   |          |
| 50                                                               | Entrée : Matière                                            |                   |                 |                 |                   |          |
| 51                                                               | - Dimensions (nominales)                                    | inch              | 14              | 4               |                   | 1        |
| 52                                                               | - Série (lb)                                                |                   |                 |                 |                   |          |
| 53                                                               | - nombre                                                    |                   | 1               | 1               |                   |          |
| 54                                                               | Sortie : Matière                                            |                   |                 |                 |                   |          |
| 55                                                               | - Dimensions (nominales)                                    | inch              | 16              | 4               |                   | 1        |
| 56                                                               | - Série (lb)                                                |                   |                 |                 |                   |          |
| 57                                                               | - nombre                                                    |                   | 1               | 1               |                   |          |
| (1) : faisceau placé à la 6ème rangée à partir des tubes de choc |                                                             |                   |                 |                 |                   |          |
| SPECIFICATION DE FOUR                                            |                                                             | Système métrique  |                 | Rev             | 1                 | page 3/7 |

| Kvaerner Heurtey                              |                                                    | Document U401-HJ-U01<br>Repère 401/6201.C |                                        |            |                  |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|------------|------------------|
| <b>Conditions d'étude mécanique ( suite )</b> |                                                    |                                           |                                        |            |                  |
| 1                                             | Section                                            | radiation                                 | convection                             | convection |                  |
| 2                                             | Service                                            | gasoil                                    | gaz naturel                            |            |                  |
| <b>Collecteurs</b>                            |                                                    |                                           |                                        |            |                  |
| 3                                             | Entrée Matière collecteur                          |                                           | A106B                                  |            |                  |
| 4                                             | Diamètre extérieur du collecteur                   | inch                                      | 14                                     |            |                  |
| 5                                             | Epaisseur du collecteur                            | mm                                        | 11.125                                 |            |                  |
| 6                                             | Connexion aux tubes (soudé à brides)               |                                           | soudé                                  |            |                  |
| 7                                             | Type de brides                                     |                                           |                                        |            |                  |
| 8                                             | Face de bride ( RM ou RMS ou autre )               |                                           |                                        |            |                  |
| 9                                             | Matière des brides                                 |                                           |                                        |            |                  |
| 10                                            | Série des brides                                   |                                           |                                        |            |                  |
| 11                                            | Sortie Matière collecteur                          |                                           | A106B                                  |            |                  |
| 12                                            | Diamètre extérieur du collecteur                   | inch                                      | 16                                     |            |                  |
| 13                                            | Epaisseur du collecteur                            | mm                                        | 12.7                                   |            |                  |
| 14                                            | Raccordement aux tubes (soudé à brides)            |                                           | soudé                                  |            |                  |
| 15                                            | Type de brides                                     |                                           |                                        |            |                  |
| 16                                            | Face de bride ( RM ou RMS ou autre )               |                                           |                                        |            |                  |
| 17                                            | Matière des brides                                 |                                           |                                        |            |                  |
| 18                                            | Série des brides                                   |                                           |                                        |            |                  |
| <b>Raccords de liaison</b>                    |                                                    |                                           |                                        |            |                  |
| 19                                            | Emplacement (interne ou externe)                   | externe                                   |                                        |            |                  |
| 20                                            | Matière des tubes                                  | CS                                        |                                        |            |                  |
| 21                                            | Diamètre extérieur des tubes                       | mm                                        | 141.3                                  |            |                  |
| 22                                            | Epaisseur des tubes                                | mm                                        | 6.55                                   |            |                  |
| 23                                            | Matière des brides                                 | -                                         |                                        |            |                  |
| 24                                            | Type de brides                                     | -                                         |                                        |            |                  |
| 25                                            | Face de bride ( RM ou RMS ou autre )               | -                                         |                                        |            |                  |
| <b>Support des tubes</b>                      |                                                    |                                           |                                        |            |                  |
| 26                                            | Section                                            |                                           | radiation                              | convection | convection       |
| 27                                            | Extrémité, haut, bas, intermédiaire                |                                           | haut                                   | extrémités | interm.          |
| 28                                            | Matière                                            |                                           | 25/20 Cr/Ni                            | CS         | 25/20 Cr/Ni      |
| 29                                            | Type ou épaisseur mini.                            | mm                                        | crochet                                | 12         | plaque tubulaire |
| 30                                            | Nombre                                             |                                           | 1 pour 2 tubes                         | 2          | 1                |
| 31                                            | Type de réfractaire matière                        |                                           | -                                      | LHV 124    | -                |
| 32                                            | Température de service                             | °C                                        | -                                      | 1038       | -                |
| 33                                            | Epaisseur réfractaire                              | mm                                        | -                                      | 75         | -                |
| 34                                            | Densité réfractaire                                | kg/m3                                     | -                                      | 950        | -                |
| <b>Guides des tubes ( tubes verticaux )</b>   |                                                    |                                           |                                        |            |                  |
| 35                                            | Emplacement (haut, bas, intermédiaire)             | intermédiaire/bas                         |                                        |            |                  |
| 36                                            | Matière (ASTM specification ou grade )             | 25/20 Cr/Ni                               |                                        |            |                  |
| 37                                            | Type                                               | guide                                     |                                        |            |                  |
| 38                                            | Nombre par tube                                    |                                           | 1 pour 2 tubes                         |            |                  |
| <b>Brûleurs</b>                               |                                                    |                                           |                                        |            |                  |
| 39                                            | Emplacement                                        | sol                                       |                                        |            |                  |
| 40                                            | Type                                               | tirage naturel, bas Nox                   |                                        |            |                  |
| 41                                            | Constructeur et modèle                             |                                           |                                        |            |                  |
| 42                                            | Type de combustible                                | fuel gaz                                  |                                        |            |                  |
| 43                                            | Nombre                                             | 10                                        |                                        |            |                  |
| 44                                            | Chaleur libérée par brûleur                        | Gcal/h                                    |                                        |            |                  |
| 45                                            | Maximum                                            | 3.59                                      |                                        |            |                  |
| 46                                            | Normal                                             | 3.12                                      |                                        |            |                  |
| 47                                            | Minimum                                            | 0.896                                     |                                        |            |                  |
| 48                                            | Température d'air de combustion                    | °C                                        | 4                                      |            |                  |
| 49                                            | Type de pilote et chaleur libérée                  |                                           | air induit, 25000 kcal/h               |            |                  |
| 50                                            | Allumeur (type, portable/fixe/retractable, nombre) |                                           | électrique, 10 + 2 allumeurs portables |            |                  |
| 51                                            | Détecteur de flamme (type et nombre)               |                                           | UV, 4                                  |            |                  |
| 52                                            | Tolérance émission Nox sec à 3%O2                  | mg/Nm3                                    | < 200                                  |            |                  |
| 53                                            | Tolérance émission CO sec à 3%O2                   | mg/Nm3                                    | < 50                                   |            |                  |
| 54                                            | Tolérance émission particule sec à 3%O2            |                                           |                                        |            |                  |
| 55                                            | Niveau de bruit dB(A) @ 1m                         |                                           | 85                                     |            |                  |
| 56                                            | Puissance sonore dB(A)                             |                                           |                                        |            |                  |
| 57                                            | Perte de charge de l'air dans les brûleurs         | mmH2O                                     | 15.7                                   |            |                  |
| 58                                            | Entraxe mini requis brûleur - tube                 | mm                                        | 1541                                   |            |                  |
| 59                                            | Entraxe mini, requis brûleur - réfractaire         | mm                                        | 9945                                   |            |                  |
| 60                                            | Entraxe mini, requis brûleurs opposés              |                                           | -                                      |            |                  |
| SPECIFICATION DE FOUR                         |                                                    | Système métrique                          |                                        | Rev        | 1                |
|                                               |                                                    |                                           |                                        | page       | 4/7              |

# Annexe B

Datasheet four 401 /6201D.

| DIRECT FIRED HEATER DATA SHEET (2/9)                                                                                                           |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1                                                                                                                                              | CUSTOMER                                                         | SONATRACH                                                                                                           | ITEM NO.                 |
| 2                                                                                                                                              | LOCATION                                                         | Arzew Industrial Area, Algeria (Sea Front)                                                                          | 401/G201D                |
| 3                                                                                                                                              | SERVICE                                                          | Four d'Huile Chaude D (Hot Oil Heater D)                                                                            |                          |
| 4                                                                                                                                              | NUMBER REQUIRED                                                  | 1 Unit                                                                                                              |                          |
| 5                                                                                                                                              | TOTAL DUTY PER HEATER                                            |                                                                                                                     |                          |
| 6                                                                                                                                              | TYPE                                                             | VERTICAL CYLINDRICAL                                                                                                |                          |
| 7                                                                                                                                              | MANUFACTURE                                                      |                                                                                                                     |                          |
| 8                                                                                                                                              | CASE                                                             | GOVERNING CASE (100% NORMAL OPERATION (Winter))                                                                     |                          |
| 9                                                                                                                                              | PROCESS DESIGN CONDITIONS                                        |                                                                                                                     |                          |
| 10                                                                                                                                             | HEATER SECTION                                                   | -                                                                                                                   | Radiation/Convection     |
| 11                                                                                                                                             | SERVICE                                                          | -                                                                                                                   | Hot Oil Heating          |
| 12                                                                                                                                             | HEAT ABSORPTION                                                  | GJ/h                                                                                                                | 130 (*1)                 |
| 13                                                                                                                                             | FLUID                                                            | -                                                                                                                   | TORADA-TC Oil (*2)       |
| 14                                                                                                                                             | FLOW RATE (Maximum)                                              | kg/h                                                                                                                | 861 000                  |
| 15                                                                                                                                             | FLOW RATE BPD                                                    | BPD                                                                                                                 |                          |
| 16                                                                                                                                             | PRESSURE DROP (ALLOWABLE)                                        | MPa                                                                                                                 | 0.3                      |
| 17                                                                                                                                             | PRESSURE DROP (CALCULATED)                                       | MPa                                                                                                                 | 0.26                     |
| 18                                                                                                                                             | AVERAGE FLUX DENSITY (ALLOWABLE)                                 | kW/m <sup>2</sup>                                                                                                   |                          |
| 19                                                                                                                                             | AVERAGE FLUX DENSITY (CALCULATED)                                | kW/m <sup>2</sup>                                                                                                   | 37.2                     |
| 20                                                                                                                                             | MAXIMUM FLUX DENSITY                                             | kW/m <sup>2</sup>                                                                                                   |                          |
| 21                                                                                                                                             | VELOCITY LIMITATION                                              | m/s                                                                                                                 | -                        |
| 22                                                                                                                                             | MAXIMUM ALLOWABLE INSIDE FILM TEMPERATURE                        | °C                                                                                                                  | 300                      |
| 23                                                                                                                                             | FOULING FACTOR                                                   | m <sup>2</sup> °C / W                                                                                               | 0.000215                 |
| 24                                                                                                                                             | CORROSION OR EROSION CHARACTERISTICS                             | -                                                                                                                   | Organic Sulfur (0.45wt%) |
| 25                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 26                                                                                                                                             | INLET CONDITIONS :                                               |                                                                                                                     |                          |
| 27                                                                                                                                             | TEMPERATURE                                                      | °C                                                                                                                  | 132.0                    |
| 28                                                                                                                                             | PRESSURE                                                         | MPaG                                                                                                                | 1.4                      |
| 29                                                                                                                                             | LIQUID FLOW                                                      | kg/h                                                                                                                | 861 000                  |
| 30                                                                                                                                             | VAPOR FLOW                                                       | kg/h                                                                                                                | -                        |
| 31                                                                                                                                             | LIQUID DENSITY                                                   | kg/m <sup>3</sup>                                                                                                   | 800                      |
| 32                                                                                                                                             | VAPOR MOLECULAR WEIGHT                                           | -                                                                                                                   | -                        |
| 33                                                                                                                                             | VISCOSITY (LIQUID/VAPOR)                                         | mN·s/m <sup>2</sup>                                                                                                 | 2.57                     |
| 34                                                                                                                                             | SPECIFIC HEAT (LIQUID/VAPOR)                                     | kJ/Kg·°C                                                                                                            | 2.25                     |
| 35                                                                                                                                             | THERMAL CONDUCTIVITY (LIQUID/VAPOR)                              | W/m·°C                                                                                                              | 0.125                    |
| 36                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 37                                                                                                                                             | OUTLET CONDITIONS :                                              |                                                                                                                     |                          |
| 38                                                                                                                                             | TEMPERATURE                                                      | °C                                                                                                                  | 190.9                    |
| 39                                                                                                                                             | PRESSURE                                                         | MPaG                                                                                                                | 1.14                     |
| 40                                                                                                                                             | LIQUID FLOW                                                      | kg/h                                                                                                                | 861 000                  |
| 41                                                                                                                                             | VAPOR FLOW                                                       | kg/h                                                                                                                | -                        |
| 42                                                                                                                                             | LIQUID DENSITY                                                   | kg/m <sup>3</sup>                                                                                                   | 762                      |
| 43                                                                                                                                             | VAPOR MOLECULAR WEIGHT                                           | -                                                                                                                   | -                        |
| 44                                                                                                                                             | VISCOSITY (LIQUID/VAPOR)                                         | mN·s/m <sup>2</sup>                                                                                                 | 1.16                     |
| 45                                                                                                                                             | SPECIFIC HEAT (LIQUID/VAPOR)                                     | kJ/Kg·°C                                                                                                            | 2.51                     |
| 46                                                                                                                                             | THERMAL CONDUCTIVITY (LIQUID/VAPOR)                              | W/m·°C                                                                                                              | 0.121                    |
| 47                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 48                                                                                                                                             | Remarks                                                          |                                                                                                                     |                          |
| 49                                                                                                                                             | 1. (*1) 20-100% (26GJ/h ~130GJ/h) Operation shall be considered. |                                                                                                                     |                          |
| 50                                                                                                                                             | 2. (*2) Refer to Sheet-9                                         |                                                                                                                     |                          |
| 51                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 52                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 53                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 54                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 55                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 56                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 57                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 58                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 59                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
| 60                                                                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                     |                          |
|  <b>Engineering Dept.</b><br><b>Environment &amp; Plant</b> |                                                                  | JOB NAME:<br>Projet de Sécurisation et de Fiabilisation du Complexe GP2.2<br>JOB NO. 5011-112<br>DWG NO. B0200-2502 |                          |
|                                                                                                                                                |                                                                  | REV.                                                                                                                | 3                        |

| DIRECT FIRED HEATER DATA SHEET (3/9)                                                           |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>COMBUSTION DESIGN CONDITIONS</b>                                                            |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>*TYPE OF FUEL</b>                                                                           |  |                         | Natural Gas                                                                      | Off Gas(Case-1) | Off Gas(Case-2) | Off Gas(Case-3) |
| <b>*EXCESS AIR</b>                                                                             |  | %                       |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>GUARANTEED EFFICIENCY</b>                                                                   |  | % (LHV)                 | 84%                                                                              |                 |                 |                 |
| <b>CALCULATED EFFICIENCY</b>                                                                   |  | % (LHV)                 | 85.5%                                                                            |                 |                 |                 |
| <b>RADIATION LOSS</b>                                                                          |  | % OF HEAT RELEASE (LHV) | 2.5%                                                                             |                 |                 |                 |
| <b>FLUE GAS TEMPERATURE (LEAVING RADIANT SECTION)</b>                                          |  | °C                      | 800                                                                              |                 |                 |                 |
| <b>FLUE GAS TEMPERATURE (LEAVING CONVECTION SECTION)</b>                                       |  | °C                      | 240                                                                              |                 |                 |                 |
| <b>FLUE GAS MASS VELOCITY THROUGH CONVECTION SECTION</b>                                       |  | kg/m <sup>2</sup> -s    |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>DRAFT AT BRIDGE WALL</b>                                                                    |  | mmH <sub>2</sub> O      | -2                                                                               |                 |                 |                 |
| <b>DRAFT AT BURNERS</b>                                                                        |  | mmH <sub>2</sub> O      | -12                                                                              |                 |                 |                 |
| <b>*AMBIENT AIR TEMPERATURE</b>                                                                |  | °C                      | 4 ~ 38                                                                           |                 |                 |                 |
| <b>*ALTITUDE (ABOVE SEA LEVEL)</b>                                                             |  | m                       | 10                                                                               |                 |                 |                 |
| <b>CALCULATED HEAT RELEASE</b>                                                                 |  | J/hr (LHV)              | 152                                                                              |                 |                 |                 |
| <b>VOLUMETRIC HEAT RELEASE</b>                                                                 |  | J/hr m <sup>3</sup>     |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>FUEL CHARACTERISTICS</b>                                                                    |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>*TYPE OF FUEL</b>                                                                           |  |                         | Natural Gas                                                                      | Off Gas(Case-1) | Off Gas(Case-2) | Off Gas(Case-3) |
| <b>FLOW RATE</b>                                                                               |  | kg/hr (Min./Max.)       | (*)1                                                                             | 0 / 1,100(*)2   | 0 / 1,550(*)2   | 0 / 830(*)2     |
| <b>*HEATING VALUE HHV</b>                                                                      |  | kJ/Nm <sup>3</sup>      | 45,600                                                                           | 66,200          | 68,700          | 64,000          |
| <b>LHV</b>                                                                                     |  | kJ/Nm <sup>3</sup>      | 41,600                                                                           | 61,100          | 63,500          | 59,000          |
| <b>*SPECIFIC GRAVITY</b>                                                                       |  | -                       | 0.67                                                                             | 0.971           | 1.012           | 0.937           |
| <b>*H/C RATIO (by Weight)</b>                                                                  |  | -                       |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>*TEMPERATURE AT BURNER</b>                                                                  |  | °C (Min./Max.)          | 4/38                                                                             | 4/40            | 4/40            | 4/40            |
| <b>*VISCOSITY@ 25 °C</b>                                                                       |  | mPa-s                   | 0.011                                                                            | 0.010           | 0.009           | 0.010           |
| <b>@ 40 °C</b>                                                                                 |  | mPa-s                   | 0.011                                                                            | 0.010           | 0.010           | 0.010           |
| <b>*FUEL PRESSURE AVAILABLE AT BURNER</b>                                                      |  | MPaG                    | 0.3                                                                              | 0.3             | 0.3             | 0.3             |
| <b>*ATOMIZING STEAM PRESSURE</b>                                                               |  | MPaG                    | None                                                                             | None            | None            | None            |
| <b>*VANADIUM CONTENT (FOR LIQUID FUELS)</b>                                                    |  | ppm                     | None                                                                             | None            | None            | None            |
| <b>*SODIUM CONTENT (FOR LIQUID FUELS)</b>                                                      |  | ppm                     | None                                                                             | None            | None            | None            |
| <b>*SULFUR CONTENT</b>                                                                         |  | wt %                    | None                                                                             | None            | None            | None            |
| <b>*GAS MOLECULAR WEIGHT</b>                                                                   |  | -                       | 19.40                                                                            | 28.14           | 29.31           | 27.15           |
| <b>COMPOSITION</b>                                                                             |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
|                                                                                                |  | C1 [mol %]              | 84.21                                                                            | 24.13           | 17.34           | 30.05           |
|                                                                                                |  | C2 [mol %]              | 9.07                                                                             | 65.53           | 70.76           | 60.73           |
|                                                                                                |  | C3 [mol %]              | 3.36                                                                             | 10.34           | 11.90           | 9.22            |
|                                                                                                |  | iC4 [mol %]             | 0.76                                                                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
|                                                                                                |  | nC4 [mol %]             | 0.82                                                                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
|                                                                                                |  | iC5 [mol %]             | 0.20                                                                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
|                                                                                                |  | nC5 [mol %]             | 0.11                                                                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
|                                                                                                |  | C6+ [mol %]             | 0.05                                                                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
|                                                                                                |  | CO2 [mol %]             | 0.61                                                                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
|                                                                                                |  | N2 [mol %]              | 0.81                                                                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
|                                                                                                |  |                         | 100.00                                                                           | 100.00          | 100.00          | 100.00          |
| <b>MECHANICAL DESIGN CONDITIONS</b>                                                            |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>GENERAL</b>                                                                                 |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>*PLOT LIMITATIONS</b>                                                                       |  |                         | <b>*STACK LIMITATIONS</b>                                                        |                 |                 |                 |
| <b>*TUBE LIMITATIONS</b>                                                                       |  |                         | <b>OTHER LIMITATIONS</b>                                                         |                 |                 |                 |
| <b>*REQUIRED DRAWINGS</b>                                                                      |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>*STRUCTURAL DESIGN DATA WIND LOAD</b>                                                       |  |                         | <b>SEISMIC FACTOR</b>                                                            |                 |                 |                 |
| <b>*LIST OF APPLICABLE STANDARDS OR SPECIFICATIONS:</b>                                        |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| Notes                                                                                          |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| 1. (*)1 Fuel Gas shall be used for short of Off Gas Duty.                                      |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| Required flow rate of natural gas and required pressure at burner shall be specified by vender |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| 2. (*)2 Flow rate of Off Gas changes from Minimum to Maximum Flow Rate.                        |  |                         |                                                                                  |                 |                 |                 |
| <b>IHI</b>                                                                                     |  |                         | <b>Engineering Dept.</b><br><b>Environment &amp; Plant</b>                       |                 |                 |                 |
|                                                                                                |  |                         | <b>JOB NAME:</b><br>Projet de Sécurisation et de Fiabilisation du Complexe GP2.Z |                 |                 |                 |
|                                                                                                |  |                         | <b>JOB NO.</b> 5011-112                                                          |                 | <b>REV.</b>     |                 |
|                                                                                                |  |                         | <b>DRAWING NO.</b> B0200-2502                                                    |                 | 2               |                 |

| DIRECT FIRED HEATER DATA SHEET (4/9)                                                                                                     |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------|--|
| <b>COIL DESIGN</b>                                                                                                                       |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| *HEATER SECTION                                                                                                                          |                   | Radiant                                                                                                                 | Convection    |           |  |
| SERVICE                                                                                                                                  |                   | TORADA                                                                                                                  | TORADA        |           |  |
| *DESIGN PRESSURE                                                                                                                         | MPaG              | 2                                                                                                                       | 2             |           |  |
| *DESIGN FLUID TEMPERATURE                                                                                                                | °C                | 250                                                                                                                     | 250           |           |  |
| *CORROSION ALLOWANCE                                                                                                                     | TUBES             | mm                                                                                                                      | 1.6           | 1.6       |  |
|                                                                                                                                          | FITTINGS          | mm                                                                                                                      |               |           |  |
| HYDROSTATIC TEST PRESSURE                                                                                                                | MPaG              | Per Code                                                                                                                | Per Code      |           |  |
| NUMBER OF PASSES                                                                                                                         | -                 | 6                                                                                                                       | 6             |           |  |
| OVERALL TUBE LENGTH,(m)                                                                                                                  | m                 |                                                                                                                         |               |           |  |
| EFFECTIVE TUBE LENGTH (m)                                                                                                                | m                 | 15                                                                                                                      | 7.5           |           |  |
| BARE TUBES: NUMBER                                                                                                                       | -                 | 84                                                                                                                      | 36            |           |  |
| TOTAL EXPOSED SURFACE                                                                                                                    | m <sup>2</sup>    |                                                                                                                         |               |           |  |
| EXTENDED SURFACE TUBES: NUMBER                                                                                                           | -                 |                                                                                                                         | 48            |           |  |
| TOTAL EXPOSED SURFACE                                                                                                                    | m <sup>2</sup>    |                                                                                                                         |               |           |  |
| TUBE SPACING, CENTER TO CENTER, (STAGGERED)(IN LINE)                                                                                     | mm                | 304.8                                                                                                                   | 304.8         |           |  |
| TUBE CENTER TO FURNACE WALL, MIN.                                                                                                        | mm                |                                                                                                                         |               |           |  |
| *STRESS RELIEF                                                                                                                           |                   | No                                                                                                                      | No            |           |  |
| *WELD INSPECTION REQUIREMENTS, X-RAY OR OTHER                                                                                            |                   | 100%                                                                                                                    | 100%          |           |  |
| <b>TUBES</b>                                                                                                                             |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| *VERTICAL OR HORIZONTAL                                                                                                                  |                   | Vertical                                                                                                                | Horizontal    |           |  |
| *TUBE MATERIAL(ASTM SPECIFICATION AND GRADE)(JIS)                                                                                        |                   | C.S.                                                                                                                    | C.S.          |           |  |
| OUTSIDE DIAMETER                                                                                                                         | mm                | 168.3                                                                                                                   | 168.3         |           |  |
| WALL THICKNESS                                                                                                                           | MINIMUM-/ AVERAGE | mm                                                                                                                      | 7.1           | 7.1       |  |
| MAXIMUM TUBE WALL TEMPERATURE (CALCULATED)                                                                                               | °C                |                                                                                                                         |               |           |  |
| INSIDE FILM COEFFICIENT(CALCULATED)                                                                                                      |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| MAXIMUM TUBE WALL TEMPERATURE (DESIGN)                                                                                                   | °C                | 400                                                                                                                     | 400           |           |  |
| DESIGN BASIS FOR TUBE WALL THICKNESS                                                                                                     |                   | API 530                                                                                                                 | API 530       |           |  |
| <b>DESCRIPTION OF EXTENDED SURFACE:</b>                                                                                                  |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| TYPE                                                                                                                                     |                   |                                                                                                                         | Fin           |           |  |
| FIN OR STUD MATERIAL                                                                                                                     |                   |                                                                                                                         | CS            |           |  |
| FIN OR STUD DIMENSION                                                                                                                    |                   |                                                                                                                         | 1.3t x 30H    |           |  |
| FIN OR STUD SPACING                                                                                                                      |                   |                                                                                                                         | 5 fins/25.4mm |           |  |
| MAXIMUM FIN OR STUD TEMPERATURE                                                                                                          |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| EXTENDED RATIO                                                                                                                           |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| <b>PLUG-TYPE HEADERS</b>                                                                                                                 |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| MANUFACTURER AND TYPE                                                                                                                    |                   | NA                                                                                                                      | NA            |           |  |
| *MATERIAL(ASTM SPECIFICATION AND GRADE)(JIS)                                                                                             |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| NOMINAL RATING                                                                                                                           |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| *LOCATION                                                                                                                                |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| *WELDED OR ROLLED                                                                                                                        |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| <b>RETURN BENDS</b>                                                                                                                      |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| MANUFACTURER AND TYPE                                                                                                                    |                   | U-bend                                                                                                                  | U-bend        |           |  |
| *MATERIAL(ASTM SPECIFICATION AND GRADE)(JIS)                                                                                             |                   | CS                                                                                                                      | CS            |           |  |
| NOMINAL RATING OR SCHEDULE                                                                                                               |                   | sch40                                                                                                                   | sch40         |           |  |
| *LOCATION (F.B. = FIRE BOX, H.B. = HEADER BOX)                                                                                           |                   | F.B.                                                                                                                    | H.B.          |           |  |
| <b>Remarks</b>                                                                                                                           |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
| 1. Hydraulic test pressure shall be corrected in accordance with the ambient temperature at testing.                                     |                   |                                                                                                                         |               |           |  |
|  <b>Engineering Dept.<br/>Environment &amp; Plant</b> |                   | JOB NAME:<br>Projet de Sécurisation et de Fiabilisation du Complexe GP2.Z<br>JOB NO. 5011-112<br>DRAWING NO. B0200-2502 |               |           |  |
|                                                                                                                                          |                   |                                                                                                                         |               | REV.<br>2 |  |

# Annexe C

Datasheet rebouilleur 405/6212.

| TUBULURES |      |        | FACE DE JOINT |      |         |          | 125 AARH (microinch) |                         |
|-----------|------|--------|---------------|------|---------|----------|----------------------|-------------------------|
| REP.      | NBRE | TAILLE | CLASSE        | FACE | TYPE    | SCH. EP. | RENFORT              | SERVICE                 |
| T1        | 1    | 12"    | 300#          | RF   | ANSI-WN | X3       | -                    | ENTREE TORADA           |
| T2        | 1    | 12"    | 300#          | RF   | ANSI-WN | X3       | -                    | SORTIE TORADA           |
| S1        | 1    | 14"    | 300#          | RF   | ANSI-WN | X3       | 143x25               | ENTREE BUTANE           |
| S2 A/B    | 2    | 18"    | 300#          | RF   | ANSI-WN | X3       | 192x25               | SORTIE BUTANE (VAPEUR)  |
| S3        | 1    | 10"    | 300#          | RF   | ANSI-WN | X3       | 114x25               | SORTIE BUTANE (LIQUIDE) |
| ST1/2     | 2    | 2"     | 300#          | RF   | ANSI-WN | X3       | -                    | LI. LT. LSL             |
| LS1/2     | 2    | 2"     | 300#          | RF   | ANSI-WN | X3       | -                    | LSH                     |

| DONNEE GENERALES                                          |          | COTE CORP                                          | COTE TUBE |
|-----------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------|-----------|
| FLUIDE                                                    |          | BUTANE (COMMERCIAL)                                | TORADA    |
| PRESSION DE TRAVAIL                                       | [BARabs] | 20.7                                               | 10        |
| PRESSION DE CALCUL                                        | [BARg]   | 23.2 + FV                                          | 23.2 + FV |
| PRESSION DE TEST                                          | [BARg]   | 34.8                                               | 34.8      |
| TEMPERATURE DE TRAVAIL ENTREE/SORTIE                      | [°C]     | 106/108                                            | 200/150   |
| TEMPERATURE DE CALCUL                                     | [°C]     | 130                                                | 225       |
| TEMPERATURE MOYENNE DE METAL                              | [°C]     | -                                                  | -         |
| RADIOGRAPHIE                                              |          | COMPLETE                                           | COMPLETE  |
| TRAITEMENT THERMIQUE                                      |          | NON                                                | NON (1)   |
| CORROSION                                                 |          | [mm]                                               | 3         |
| EFFICACITE DE JOINT                                       |          | 1                                                  | 1         |
| NOMBRE DE PASSES                                          |          | 1                                                  | 4         |
| ISOLATION                                                 |          | NON                                                | NON       |
| CAPACITE                                                  | [LITRES] | 26770                                              | 3270      |
| SURFACE                                                   |          | [m²]                                               | 468       |
| POIDS ESTIME: - FAISCEAU                                  |          | [KG]                                               | 8800      |
| - ECHANGEUR VIDE                                          |          | [KG]                                               | 25500     |
| - ECHANGEUR PLEIN                                         |          | [KG]                                               | 55540     |
| INSPECTION                                                |          | AFFAIRE 019201 GROUPE 42 DOCUMENT 007 TYPE DOC SPC |           |
| PROTECTION TEMPORAIRE                                     |          | PREPARATION SUIVANT SIS 055900                     |           |
| CODE                                                      |          | ASME VIII DIV 1 - TEMA R - API 660                 |           |
| REMARQUE (1) LES TUBES "U" SERONT RECUIIT APRES CINTRAGE. |          |                                                    |           |

| REV. | DATE     | PAR | VISA | PAR | VISA | DESCRIPTION DES REVISIONS |
|------|----------|-----|------|-----|------|---------------------------|
| 1    | 03/01/95 | JML |      | JML |      | REVISED AS NOTED          |
| 0    | 30/11/94 | JML |      | ESN |      | ORIGINE                   |

| REVISION | DESSINE | VERIFIE | APPROUVE | DESCRIPTION DES REVISIONS |
|----------|---------|---------|----------|---------------------------|
|          |         |         |          |                           |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                              |                                                                                                                 |                                   |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------|
|  <b>D'Heudt S.A.</b><br><small>LIÈGE - SOCIÉTÉ EN SOCIÉTÉ PAR ACTIONS</small><br><small>Parc Industriel, Chaussée de Namur, 66, 1400 Nivelles Belgique</small><br><small>Téléphone: (32) 67.28.42.11 - Télécopieur: (32) 67.21.06.02</small> |                              | <h2>PLAN D'ENSEMBLE</h2> <p>DEPROPANISER (EX-SPLITTER) REBOILER</p> <p>TYPE : AKU      DIM : 1150/2250x6000</p> |                                   |            |
| CLIENT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | SONATRACH GP2Z               |                                                                                                                 | REPÈRE                            | 405/6224 B |
| FABRIQUE POUR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | SONATRACH GP2Z ARZEW ALGERIE |                                                                                                                 | NOMBRE                            | 1          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                              |                                                                                                                 | ECHELLE                           | NONE       |
| CE PLAN RESTE NOTRE PROPRIÉTÉ ET NE PEUT ÊTRE COMMUNIQUÉ À DES TIERS SANS AUTORISATION ÉCRITE PRÉALABLE.                                                                                                                                                                                                                        |                              | NUMERO DE COMMANDE                                                                                              | 31595                             |            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                              | NUMERO DU CLIENT                                                                                                | GP2Z/JUR/BB/as/F N° 2032/BOG 1787 |            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                              | NUMERO DE REQUISITION                                                                                           | -                                 |            |
| 10 -01- 1995.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                              | N° 31595-2/2                                                                                                    |                                   | REV. 1     |



|                        |          | Separation A             |                                     |                                       |                                       |                                        |                                       |                                       |                                      |                                        |                                        |                                       |                                      | Separation B                          |                                         |                                         |                                         |                                        |                                          |                                         |                                         |                                        |                                         |  |  |
|------------------------|----------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|--|--|
|                        |          | 101                      | 102                                 | 103                                   | 104                                   | 105                                    | 111                                   | 112                                   | 113                                  | 114                                    | 115                                    | 116                                   | 117                                  | 118                                   | 119                                     | 121                                     | 122                                     | 123                                    | 124                                      | 125                                     | 126                                     | 127                                    | 128                                     |  |  |
| Stream No.             |          | 101                      | 102                                 | 103                                   | 104                                   | 105                                    | 111                                   | 112                                   | 113                                  | 114                                    | 115                                    | 116                                   | 117                                  | 118                                   | 119                                     | 121                                     | 122                                     | 123                                    | 124                                      | 125                                     | 126                                     | 127                                    | 128                                     |  |  |
| Description            |          | 400/105A<br>Liquid Inlet | (400/105B) 440/823C<br>Liquid Inlet | (440/823D) 440/823E-2<br>Liquid Inlet | (440/823F) 440/823G-2<br>Liquid Inlet | (440/823H) 440/823I-2<br>Outlet Liquid | (440/823J) 440/823K-2<br>Liquid Inlet | (440/823L) 440/823M-2<br>Liquid Inlet | (440/823N) 440/823O-2<br>Vapor Inlet | (440/823P) 440/823Q-2<br>Liquid Outlet | (440/823R) 440/823S-2<br>Liquid Outlet | (440/823T) 440/823U-2<br>Liquid Inlet | (440/823V) 440/823W-2<br>Vapor Inlet | (440/823X) 440/823Y-2<br>Liquid Inlet | (440/823Z) 440/823AA-2<br>Outlet Liquid | (440/823AB) 440/823AC-2<br>Liquid Inlet | (440/823AD) 440/823AE-2<br>Liquid Inlet | (440/823AF) 440/823AG-2<br>Vapor Inlet | (440/823AH) 440/823AI-2<br>Liquid Outlet | (440/823AJ) 440/823AK-2<br>Liquid Inlet | (440/823AL) 440/823AM-2<br>Liquid Inlet | (440/823AN) 440/823AO-2<br>Vapor Inlet | (440/823AP) 440/823AQ-2<br>Liquid Inlet |  |  |
| Total Flow Rate        | [kg/hr]  | 250.000                  | 175.000                             | 175.000                               | 175.000                               | 175.000                                | 87.500                                | 87.500                                | 156.000                              | (109.800)                              | 46.200                                 | 263.000                               | (221.700)                            | 41.300                                | 41.300                                  | 87.500                                  | 87.500                                  | 156.000                                | (109.800)                                | 46.200                                  | 263.000                                 | (221.700)                              | 41.300                                  |  |  |
| Temperature            | [°C]     | 38.0                     | 38.0                                | 38.0                                  | 38.0                                  | 38.0                                   | 38.0                                  | 80.8                                  | 57.4                                 | 49.5                                   | 49.5                                   | 106.3                                 | 106.3                                | 106.3                                 | 65.8                                    | (39.0)                                  | 60.8                                    | 57.4                                   | 49.5                                     | 49.5                                    | 106.3                                   | 106.3                                  | 106.3                                   |  |  |
| Pressure               | [MPa(g)] | 2.00                     | (0.07)                              | 2.50                                  | 2.40                                  | 2.25                                   | 2.25                                  | 2.25                                  | 1.98                                 | 1.98                                   | 1.98                                   | 1.98                                  | 1.98                                 | 1.98                                  | 1.98                                    | 2.25                                    | 2.25                                    | 1.98                                   | 1.98                                     | 1.98                                    | 1.98                                    | 1.98                                   | 1.98                                    |  |  |
| Total Molecular Weight |          | 49.27                    | 49.27                               | 49.27                                 | 49.27                                 | 49.27                                  | 49.27                                 | 49.27                                 | 43.65                                | 43.65                                  | 43.65                                  | 57.17                                 | 57.10                                | 57.56                                 | 57.56                                   | 49.27                                   | 49.27                                   | 43.65                                  | 43.65                                    | 43.65                                   | 57.17                                   | 57.10                                  | 57.56                                   |  |  |
| Vapor Flow Rate        | [kg/hr]  | n/a                      | n/a                                 | n/a                                   | n/a                                   | n/a                                    | n/a                                   | n/a                                   | 156.000                              | n/a                                    | n/a                                    | (221.700)                             | n/a                                  | n/a                                   | n/a                                     | n/a                                     | n/a                                     | 156.000                                | n/a                                      | n/a                                     | (221.700)                               | n/a                                    | n/a                                     |  |  |
| Vapor Density          | [kg/m³]  | n/a                      | n/a                                 | n/a                                   | n/a                                   | n/a                                    | n/a                                   | n/a                                   | 47.2                                 | n/a                                    | n/a                                    | n/a                                   | 55.9                                 | n/a                                   | n/a                                     | n/a                                     | n/a                                     | 47.2                                   | n/a                                      | n/a                                     | n/a                                     | 55.9                                   | n/a                                     |  |  |
| Vapor Viscosity        | [mPa·s]  | n/a                      | n/a                                 | n/a                                   | n/a                                   | n/a                                    | n/a                                   | n/a                                   | 0.009                                | n/a                                    | n/a                                    | 0.010                                 | n/a                                  | n/a                                   | n/a                                     | n/a                                     | n/a                                     | 0.009                                  | n/a                                      | n/a                                     | 0.010                                   | n/a                                    | n/a                                     |  |  |
| Liquid Flow Rate       | [kg/hr]  | 250.000                  | 175.000                             | 175.000                               | 175.000                               | 175.000                                | 87.500                                | 87.500                                | n/a                                  | (109.800)                              | 46.200                                 | 263.000                               | n/a                                  | 41.300                                | 41.300                                  | 87.500                                  | 87.500                                  | n/a                                    | (109.800)                                | 46.200                                  | 263.000                                 | n/a                                    | 41.300                                  |  |  |
| Liquid Density         | [kg/m³]  | 594.7                    | (516.6)                             | 528.8                                 | 528.8                                 | 528.8                                  | 528.8                                 | 466.8                                 | n/a                                  | 446.9                                  | 446.9                                  | 436.6                                 | n/a                                  | 426.4                                 | 510.1                                   | (528.8)                                 | 466.8                                   | n/a                                    | 446.9                                    | 446.9                                   | 436.6                                   | n/a                                    | 426.4                                   |  |  |
| Liquid Viscosity       | [mPa·s]  | 0.104                    | 0.113                               | 0.123                                 | 0.123                                 | 0.123                                  | 0.123                                 | 0.079                                 | n/a                                  | 0.074                                  | 0.066                                  | n/a                                   | 0.088                                | 0.102                                 | (0.123)                                 | 0.079                                   | n/a                                     | 0.074                                  | 0.074                                    | 0.088                                   | n/a                                     | 0.088                                  | n/a                                     |  |  |
| Surface Tension        | [N/m]    | 0.007                    | (0.008)                             | 0.009                                 | 0.009                                 | 0.009                                  | 0.009                                 | 0.005                                 | n/a                                  | 0.004                                  | 0.003                                  | n/a                                   | 0.003                                | 0.007                                 | (0.009)                                 | 0.005                                   | n/a                                     | 0.004                                  | 0.004                                    | 0.003                                   | n/a                                     | 0.003                                  | n/a                                     |  |  |
| Composition            |          |                          |                                     |                                       |                                       |                                        |                                       |                                       |                                      |                                        |                                        |                                       |                                      |                                       |                                         |                                         |                                         |                                        |                                          |                                         |                                         |                                        |                                         |  |  |
| C1 [mol%]              |          | 0.23                     | 0.23                                | 0.23                                  | 0.23                                  | 0.23                                   | 0.23                                  | 0.23                                  | 0.39                                 | 0.39                                   | 0.39                                   | 0.00                                  | 0.00                                 | 0.00                                  | 0.00                                    | 0.23                                    | 0.23                                    | 0.39                                   | 0.39                                     | 0.39                                    | 0.00                                    | 0.00                                   | 0.00                                    |  |  |
| C2 [mol%]              |          | 1.76                     | 1.76                                | 1.76                                  | 1.76                                  | 1.76                                   | 1.76                                  | 1.76                                  | 2.95                                 | 2.95                                   | 2.95                                   | 0.00                                  | 0.00                                 | 0.00                                  | 0.00                                    | 1.76                                    | 1.76                                    | 2.95                                   | 2.95                                     | 2.95                                    | 0.00                                    | 0.00                                   | 0.00                                    |  |  |
| C3 [mol%]              |          | 59.19                    | 59.19                               | 59.19                                 | 59.19                                 | 59.19                                  | 59.19                                 | 59.19                                 | 96.09                                | 96.09                                  | 96.09                                  | 7.31                                  | 7.77                                 | 4.79                                  | 4.79                                    | 59.19                                   | 59.19                                   | 96.09                                  | 96.09                                    | 96.09                                   | 7.31                                    | 7.77                                   | 4.79                                    |  |  |
| C4 [mol%]              |          | 12.11                    | 12.11                               | 12.11                                 | 12.11                                 | 12.11                                  | 12.11                                 | 12.11                                 | 0.44                                 | 0.44                                   | 0.44                                   | 31.08                                 | 31.41                                | 29.31                                 | 29.31                                   | 12.11                                   | 12.11                                   | 0.44                                   | 0.44                                     | 31.08                                   | 31.41                                   | 29.31                                  | 29.31                                   |  |  |
| C5 [mol%]              |          | 28.41                    | 28.41                               | 28.41                                 | 28.41                                 | 28.41                                  | 28.41                                 | 28.41                                 | 0.13                                 | 0.13                                   | 0.13                                   | 61.12                                 | 60.38                                | 65.16                                 | 65.16                                   | 28.41                                   | 28.41                                   | 0.13                                   | 0.13                                     | 61.12                                   | 60.38                                   | 65.16                                  | 65.16                                   |  |  |
| C6 [mol%]              |          | 0.23                     | 0.23                                | 0.23                                  | 0.23                                  | 0.23                                   | 0.23                                  | 0.23                                  | 0.00                                 | 0.00                                   | 0.00                                   | 0.38                                  | 0.34                                 | 0.57                                  | 0.57                                    | 0.23                                    | 0.23                                    | 0.00                                   | 0.00                                     | 0.38                                    | 0.34                                    | 0.57                                   | 0.57                                    |  |  |
| nC5 [mol%]             |          | 0.07                     | 0.07                                | 0.07                                  | 0.07                                  | 0.07                                   | 0.07                                  | 0.07                                  | 0.00                                 | 0.00                                   | 0.00                                   | 0.11                                  | 0.10                                 | 0.17                                  | 0.17                                    | 0.07                                    | 0.07                                    | 0.00                                   | 0.00                                     | 0.11                                    | 0.10                                    | 0.17                                   | 0.17                                    |  |  |

## Annexe F

### Caractéristiques de l'huile TORADA.TC

|                                          |                       | Four C          | Four D   |
|------------------------------------------|-----------------------|-----------------|----------|
| Fluide                                   | Unité                 | Huile TORADA TC |          |
| Débit (Max)                              | Kg/h                  | 900.000         | 861.000  |
| Perte de pression allouée                | MPa                   | 0,3             | 0, 3     |
| Perte de pression calculée               | MPa                   | 0,28            | 0,26     |
| Densité flux chaleur<br>moyenne calculée | Kcal/h.m <sup>2</sup> | 32.355          | 32.000   |
| Température maximum de<br>film interne   | °C                    | 250             | 300      |
| Facteur d'encrassement                   | m <sup>2</sup> °C/W   | 0,0002          | 0,000215 |
| Rendement (design)                       | %                     | 86              | 85,5     |
| PCI (design)                             | Kcal/kg               | 11106           | 11511.15 |
| Débit fuel gaz                           | Kg/h                  | 2800            | 2900     |

## Annexe G

### Chaleur spécifique moyenne des fumées

CHALEUR SPÉCIFIQUE MOYENNE ENTRE 0°C ET t°C en kcal (°C)<sup>-1</sup> (k.mole)<sup>-1</sup>

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

D'après E. Justi et H. Lüder. *Forsch. Gebiete Ingenieur*, 6, 211, 1935.

**$\Delta H^\circ_{\text{formation}}$**  Des éléments chimiques commun

| Composé chimique                   | Masse molaire (g/mol) | $\Delta H^\circ_{f(298)}$ (kJ/mol) | $S^\circ_{298}$ (J/(mol·K)) |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| CO <sub>2</sub> (g)                | 44,010                | -393,52                            | 213,75                      |
| CO(g)                              | 28,011                | -110,58                            | 197,6                       |
| NO(g)                              | 30,008                | 90,32                              | 210,7                       |
| NH <sub>3</sub> (g)                | 17,031                | -45,91                             | 192,66                      |
| CH <sub>4</sub> (g)                | 16,043                | -74,9                              | 186,17                      |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)  | 30,068                | -84,7                              | 229,57                      |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)  | 44,094                | -103,88                            | 270,01                      |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g) | 58,12                 | -124,78                            | 310,15                      |
| C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g) | 72,146                | -146,50                            | 349,49                      |
| C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (g) | 86,172                | -167,25                            | 386,95                      |
| C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> (g) | 100,21                | -187,89                            | 425,41                      |
| C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g) | 114,224               | -208,52                            | 463,84                      |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)  | 28,054                | 52,49                              | 219,30                      |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)  | 42,078                | 20,42                              | 267,03                      |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)  | 26,038                | 226,81                             | 200,92                      |
| C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)  | 78,108                | 82,96                              | 269,30                      |
| H <sub>2</sub> (g)                 | 2,016                 | 0                                  | 130,46                      |
| H(g)                               | 1,008                 | 218,06                             | 114,65                      |
| N <sub>2</sub> (g)                 | 28,016                | 0                                  | 191,32                      |
| N(g)                               | 14,008                | 472,96                             | 153,23                      |
| O(g)                               | 16,000                | 249,28                             | 161,02                      |
| O <sub>2</sub> (g)                 | 32,000                | 0                                  | 204,82                      |
| O <sub>3</sub> (g)                 | 48,000                | 142,12                             | 237,42                      |
| C (graphite)                       | 12,011                | 0                                  | 5,68                        |
| C (diamant)                        | 12,011                | 1,92                               | 2,45                        |
| H <sub>2</sub> O (liquide)         | 18,01528              | -285,10                            | 69,96                       |
| H <sub>2</sub> O (gaz)             | 18,01528              | -241,8                             | 188,74                      |
| HF (liquide)                       | 20,00634              | -299,8                             |                             |
| HF (gaz)                           | 20,00634              | -271,1                             | 173,7                       |
| HCl (gaz)                          | 36,461                | -92,31                             | 186,90                      |