



# Dédicace

**Au nom d'Allah, le Tout-Puissant, le Tout-Miséricordieux,**

Avant toute chose, louange à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a comblé de force, de sagesse et de persévérance pour mener à bien ce travail.

**À mes parents bien-aimés,**

Pour leurs sacrifices infinis, leurs prières silencieuses et leur confiance indéfectible. Vous avez toujours cru en moi, même quand les obstacles paraissaient insurmontables. Cette réussite est avant tout la vôtre.

**À ma famille et mes proches,**

Pour leur présence réconfortante, leurs encouragements constants et leur soutien moral, qui m'ont porté dans chaque moment de doute ou de fatigue.

**À mes professeurs et encadrants,**

Pour la qualité de leur enseignement, leur accompagnement exigeant et leur passion transmissible. Vos conseils avisés ont enrichi ma démarche scientifique et affiné ma réflexion.

**À mes amis et collègues,**

Pour les échanges stimulants, les partages d'idées et l'émulation constructive. Vos remarques et votre camaraderie ont contribué à faire de ce mémoire un travail complet et rigoureux.

**À tous ceux qui, de près ou de loin, ont croisé mon chemin,**

Je dédie ce mémoire en signe de profonde reconnaissance.

**BELALIA Abdelillah**

# Dédicace

**Au nom d'Allah, le Tout-Puissant, le Tout-Miséricordieux,**

Avant toute chose, louange à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a comblé de force, de sagesse et de persévérance pour mener à bien ce travail.

**À mes parents bien-aimés,**

Pour leurs sacrifices infinis, leurs prières silencieuses et leur confiance indéfectible. Vous avez toujours cru en moi, même quand les obstacles paraissaient insurmontables. Cette réussite est avant tout la vôtre.

**À ma famille et mes proches,**

Pour leur présence réconfortante, leurs encouragements constants et leur soutien moral, qui m'ont porté dans chaque moment de doute ou de fatigue.

**À mes professeurs et encadrants,**

Pour la qualité de leur enseignement, leur accompagnement exigeant et leur passion transmissible. Vos conseils avisés ont enrichi ma démarche scientifique et affiné ma réflexion.

**À mes amis et collègues,**

Pour les échanges stimulants, les partages d'idées et l'émulation constructive. Vos remarques et votre camaraderie ont contribué à faire de ce mémoire un travail complet et rigoureux.

**À tous ceux qui, de près ou de loin, ont croisé mon chemin,**

Je dédie ce mémoire en signe de profonde reconnaissance.

**BELARBI Abderrahmane Mohamed Anis**

# Remerciement

Nous tenons à remercier **Dieu Tout-Puissant** de nous avoir donné la force et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudeux aux membres du jury.

Le président **Mr** BESTANI Benaouda, l'examinatrice **Ms** SALAA Fahima et **Mr** SMAIL Bentaiba notre encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils pertinents, et son accompagnement tout au long de ce projet.

Nous remercions également le personnel du complexe GP1/Z pour leur accueil, leur assistance technique, et les informations précieuses qu'ils nous ont fournies et particulièrement les personnes du service de MCR, auprès duquel nous avons trouvé l'accueil et l'assistance dont on avait besoin.

On associe à ces remerciements à **Mr** LARIBI Nadir pour son énorme et inestimable aide et de sa générosité.

Enfin, nos pensées vont à nos familles, nos amis, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce mémoire.

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude du rendement thermique du four du complexe GP1/Z. Une approche complète a été adoptée : calculs analytiques, simulations sous Aspen HYSYS et vérification par Aspen EDR. L'objectif est d'optimiser la consommation énergétique en ajustant les paramètres d'entrée (température et débit de l'huile TORADA TC 32). Les résultats montrent que des ajustements précis permettent de réduire la consommation de gaz naturel et d'améliorer l'efficacité du système. Cette démarche contribue à la fois à la rentabilité économique et à la réduction de l'impact environnemental.

**Mots-clés :** Four industriel, rendement thermique, fluide caloporteur, TORADA TC 32, Aspen HYSYS, Aspen EDR, simulation des procédés, gaz naturel, transfert de chaleur, efficacité énergétique, hydrocarbures, déshydratation, séparation GPL.

## Abstract

This thesis focuses on the thermal efficiency analysis of the furnace at GP1/Z complex. The study combines analytical calculations with process simulations using Aspen HYSYS and verification using Aspen EDR. The main goal is to optimize energy consumption by adjusting input parameters such as the temperature and flow rate of TORADA TC 32 oil. The results demonstrate that improving these parameters significantly reduces natural gas consumption and enhances system efficiency, contributing to both environmental protection and economic profitability.

**Keywords:** Industrial furnace, thermal efficiency, heat transfer fluid, TORADA TC 32, Aspen HYSYS, Aspen EDR, process simulation, natural gas, heat transfer, energy efficiency, hydrocarbons, dehydration, LPG separation.

## ملخص

يتناول هذا العمل دراسة مردودية الفرن الحراري في مجمع GP1/Z، حيث تم اتباع منهجية متكاملة شملت الحسابات التحليلية والمحاكاة بواسطة برنامجي Aspen HYSYS و Aspen EDR. يهدف هذا البحث إلى تحسين استهلاك الطاقة الحرارية من خلال تعديل معاملات التشغيل مثل درجة حرارة ومدى تدفق زيت TORADA TC 32. بينت النتائج أنّ تحسين هذه المعاملات يساهم في تقليل استهلاك الغاز الطبيعي وتحسين كفاءة النظام، مما ينعكس إيجاباً على الأداء البيئي والاقتصادي للوحدة الصناعية.

**الكلمات المفتاحية:** الفرن الصناعي، الكفاءة الحرارية، المائع الناقل للحرارة، تورادا TC 32، أسبن هايسيس، أسبن EDR، محاكاة العمليات، الغاز الطبيعي، انتقال الحرارة، كفاءة الطاقة، الهيدروكربونات، نزع الماء، فصل الغاز البترولي المسال.

# Table de matière

<b>INTRODUCTION GÉNÉRAL</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE I : PRÉSENTATION DU COMPLEXE ET GÉNÉRALITÉS SUR LE FLUIDE CALORPORTEUR</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Présentation du complexe :</b>	<b>4</b>
I.1.1 Fiche technique du complexe	4
I.1.2 Capacité de production et Capacité totale de stockage	4
I.1.3 Principales installations du complexe	5
I.1.4 Alimentation du complexe :	5
I.1.4.1 Section de Démercurisation	5
I.1.4.2 Section de stockage de GPL	6
I.1.4.3 Section des utilités	6
I.1.4.4 Section déshydratation	7
I.1.4.5 Section de séparation	8
I.1.4.6 Section de réfrigération	9
I.1.4.7 Section d'huile chaude	10
I.1.4.8 Stockage à basse température	12
I.1.4.9 Stockage à température ambiante	12
I.1.4.10 Section chargement navires	13
I.1.4.11 Section chargement camions	13
I.1.4.12 Section torche HP et BP :	13
I.1.4.13 Section de transfert :	14
<b>I.2 GÉNÉRALITÉS SUR LE FLUIDE CALORPORTEUR :..</b>	<b>14</b>
I.2.1 Définition générale d'un fluide calorporteur	14
I.2.2 C'est quoi TORADA TC 32	15
I.2.3 Propriétés du fluide caloporteur	15
I.2.4 Avantages et Inconvénients du fluide TORADA TC	15
I.2.5 Pourquoi utilisé TORADA TC 32	16
I.2.6 Description du circuit de fluide caloporteur	16

## **CHAPITRE II : DESCRIPTION GÉNÉRALE DES FOURS** 19

### **II.1 Introduction..... 20**

### **II.2 Description des fours industriels ..... 21**

II.2.1 Description des fours..... 21

II.2.2 Classification suivant la manutention des produits traités ..... 22

### **II.3 Les différents types de fours ..... 22**

II.3.1 Les fours cylindriques verticaux ..... 22

II.3.2 Les fours dits (boîtes) à tubes verticaux..... 23

II.3.3 Les fours dits (cabines) à tubes horizontaux ..... 23

II.3.4 Les fours à chauffage par murs radiants..... 24

### **II.4 Constitution des fours..... 24**

II.4.1 Zone de radiation..... 24

II.4.2 Zone de convection ..... 24

### **II.5 Les fours du complexe GP1/Z..... 24**

## **CHAPITRE III : ÉTUDE DE L'OPTIMISATION DU RENDEMENT DU FOUR** 26

### **III.1 Introduction ..... 27**

### **III.2 Calcul du rendement du four dans les conditions du complexe GP1/Z ..... 29**

III.2.1 Rendement thermique d'un four ..... 29

III.2.2 Simulation par Aspen HYSYS..... 33

III.2.2.1 Etapes de la simulation par HYSYS..... 33

III.2.2.2 Schéma général du simulateur Aspen HYSYS..... 37

III.2.2.3 Résultats obtenus par la simulation ..... 38

III.2.2.4 Effet de la température d'entrée d'huile et de son débit  
volumique sur le rendement du four ..... 39

III.2.2.5 Calcul du rendement par simulation ..... 42

<b>III.3 Simulation par Aspen EDR .....</b>	<b>44</b>
III.3.1 Etapes de la simulation par EDR .....	44
III.3.2 Effet de la température d'entrée et le débit sur les rendements .....	48
 <b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	 <b>52</b>
 <b>REFERENCES</b>	 <b>53</b>

# Liste de Figures

<b>Figure I. 1:</b> Sphère de Charge.....	6
<b>Figure I. 2:</b> Schéma de la Section de déshydratation .....	8
<b>Figure I. 3:</b> Schéma de la Section de séparation .....	9
<b>Figure I. 4:</b> Schéma de la Section de réfrigération .....	10
<b>Figure I. 5:</b> Schéma de la Section d'huile chaude.....	11
<b>Figure I. 6:</b> Bac de Stockage .....	12
<b>Figure I. 7:</b> Sphère de Stockage .....	12
<b>Figure I. 8:</b> Section chargement navires.....	13
<b>Figure I. 9:</b> Section chargement camions .....	13
<b>Figure I. 10:</b> Torche .....	13
<b>Figure I. 11:</b> Schéma de Procédé.....	14
<b>Figure I. 12:</b> Schéma du circuit de l'huile chaude .....	18
<b>Figure II. 1:</b> Schéma du fours dits (cabines) à tubes horizontaux.....	23
<b>Figure III. 1:</b> Schéma général du simulateur Aspen HYSYS .....	37
<b>Figure III. 2:</b> Résultats obtenus par HYSYS "WorkSheet" .....	38
<b>Figure III. 3:</b> Effet de la Température d'entrée sur la puissance utile pour chaque débit ..	40
<b>Figure III. 4:</b> Effet de la Température d'entrée sur la puissance fournie pour chaque débit ..	41
<b>Figure III. 5:</b> Effet de la température d'entrée et le débit sur le rendement de la zone de convection.....	48
<b>Figure III. 6:</b> Effet de la température d'entrée et le débit sur le rendement de la zone de radiation.....	49
<b>Figure III. 7:</b> Effet de la température d'entrée et le débit sur le rendement global.....	50

# Liste des Tableaux

<b>Tableau I. 1:</b> Propriétés du fluide caloporteur .....	15
<b>Tableau III. 1 :</b> Valeurs de $C_p$ en fonction de la température .....	30
<b>Tableau III. 2:</b> Valeurs de $\rho$ en fonction de la température .....	31
<b>Tableau III. 3:</b> Les pouvoirs calorifiques inférieurs pour chaque constituant du GN.....	32
<b>Tableau III. 4:</b> Variation du rendement thermique en fonction du débit volumique et de la température d'entrée.....	39
<b>Tableau III. 5:</b> Résultats de la simulation par Aspen HYSYS .....	43
<b>Tableau III. 6:</b> Résultats obtenus par Aspen EDR .....	48

# Liste des Abréviations

<b>SONATRACH</b>	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures.
<b>GP1/Z</b>	Complexe de séparation du gaz pétrolier liquéfié.
<b>GPL</b>	Gaz de Pétrole Liquéfié.
<b>GN</b>	Gaz Naturel.
<b>RTO</b>	Region Transport Ouest.
<b>PPM</b>	Partie Par Million.
<b>T100</b>	Four du 1 <sup>er</sup> train.
<b>BP</b>	Basse Pression.
<b>MP</b>	Moyenne Pression.
<b>HP</b>	Haute Pression.
<b>D1</b>	Jetée pour les petits navires.
<b>M6</b>	Jetée pour les grands navires.
<b>BOG</b>	Boil-Off-Gas.
<b>PCI</b>	Pouvoir Calorifique Inférieur.
<b>TEMA</b>	Tubular Exchanger Manufacturers Association.
<b>ASME</b>	American Society of Mechanical Engineers.

# **INTRODUCTION GÉNÉRAL**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'histoire du développement industriel et technologique de l'humanité est intimement liée à la maîtrise de l'énergie. Grâce aux avancées technologiques, l'homme a su identifier, exploiter et valoriser diverses sources d'énergie, allant du charbon au pétrole, en passant par le gaz naturel. Parmi ces ressources, le pétrole et le gaz représentent les richesses stratégiques les plus significatives de l'économie algérienne, tant pour la consommation nationale que pour l'exportation.

Aujourd'hui, face à l'augmentation du coût de l'énergie et à la prise de conscience environnementale mondiale, l'optimisation énergétique est devenue un enjeu central pour les industries. Les entreprises cherchent non seulement à améliorer la rentabilité de leurs procédés, mais aussi à réduire leur empreinte carbone, à renforcer la sécurité et à améliorer la durabilité de leurs équipements. Dans ce contexte, le complexe GP1/Z, spécialisé dans le traitement et la liquéfaction du GPL, accorde une attention particulière à l'efficacité énergétique de ses installations, en particulier celle des fours industriels.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette démarche d'optimisation énergétique. Il a pour objectif l'étude et l'amélioration du rendement thermique du four de la phase I du complexe GP1/Z, en s'appuyant sur des simulations rigoureuses à l'aide des logiciels Aspen HYSYS et Aspen EDR. L'analyse se concentre sur l'influence des paramètres opératoires tels que le débit et la température d'entrée du fluide caloporteur (huile TORADA TC 32) sur la performance énergétique globale du four.

Le document est structuré en trois chapitres :

- Le premier présente le complexe industriel GP1/Z.
- Le second décrit les fours industriels et leur fonctionnement.
- Le troisième est dédié à l'étude de l'optimisation du rendement thermique du four.

**CHAPITRE I :**  
**PRÉSENTATION DU**  
**COMPLEX ET**  
**GÉNÉRALITÉS SUR**  
**LE FLUIDE**  
**CALORPORTEUR**

## CHAPITRE I :

# PRÉSENTATION DU COMPLEXE ET GÉNÉRALITÉS SUR LE FLUIDE CALORPORTEUR

### I.1 Présentation du complexe :

#### I.1.1 Fiche technique du complexe

- **Nom du complexe** : GP1/Z (JUMBO).
- **Localisation** : Mers el Hadjadj (ARZEW).
- **Superficie** : 120 hectares.
- **Objet** : Séparation et Liquéfaction du GPL.
- **Produits Fini** : BUTANE, PROPANE.
- **Procédé utilisé** : Distillation sous pression.
- **N° des trains** : 09 Trains.
- **Constructeur** : consortium Japonais IHI (Ishikawajima Arima Heavy Industries) - ITOCHU.
- **12/12/1983** : Mise en production de la phase 1.
- **24/02/1983** : Mise en production de la phase 2.
- **12/02/2010** : Mise en production de la phase 3.

#### I.1.2 Capacité de production et Capacité totale de stockage

- **Capacité de production** : 9 Millions de tonnes par an.
- **Capacité totale de stockage** :
  - Stockage de la charge : 22000 m<sup>3</sup> (22 Sphères).
  - Stockage des produits Réfrigérés : 560000 m<sup>3</sup> (8 Bacs).
  - Stockage des produits ambiants : 2000 m<sup>3</sup>.

### I.1.3 Principales installations du complexe

- 22 sphères de stockage de la charge d'alimentation.
  - 9 Trains de traitement du GPL (capacité contractuelle de 1 million de tonne par an).
  - 4 Unités de liquéfaction des BOILOFF (2 pour le BUTANE et 2 pour le PROPANE).
  - 4 Bacs de stockage de PROPANE à basse température (capacité de chaque bac est 70000 m<sup>3</sup>).
  - 4 Bacs de stockage de BUTANE à basse température (capacité de chaque bac est 70000 m<sup>3</sup>).
  - 4 Sphères de stockage de produits ambiants (PROPANE, BUTANE).
  - 1 Sphère de stockage de la GAZOLINE (capacité de 500 m<sup>3</sup>).
  - 4 Salles de contrôle + 2 Salles de supervision.
  - 2 Stations électriques alimentées par SONELGAZ.
  - 6 Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe (2 pour chaque phase).
  - 2 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité de chargement variant entre 4000 m<sup>3</sup>/h et 10000 m<sup>3</sup>/h (D1, M6).
  - 1 Rampe de chargement par camions (6 camions).
  - 1 Station pompière d'eau de mer.
  - 1 Système de télésurveillance.
  - 2 Unités de traitement des eaux usées.
- **Destination de la production** : les produits finis sont destinés à l'exportation et au marché national.
- **Source d'approvisionnement** : champs Gaziers et Pétrolier du Sud.<sup>1</sup>

### I.1.4 Alimentation du complexe :

#### I.1.4.1 Section de Démercurisation

Le GPL est livré par RTO à notre complexe à l'aide de pipe-line en passant par la section démercurisation ensuite acheminé vers les sphères de charge sous les conditions de pression (50 kg/cm<sup>2</sup>) et température ambiante.

Cette section se compose de deux filtres GPL, deux coalesceurs et six démercuriseurs.

Le filtres GPL, le coalesceur et les démercuriseurs sont installés afin d'enlever les particules solides, l'eau libre et le mercure contenus dans la charge d'alimentation GPL avant les sphères de stockage de la charge d'alimentation.

#### **I.1.4.2 Section de stockage de GPL**

Après l'opération précédente (la démercurisation), on passe au stockage du produit (GPL).

Pour cette étape, on utilise pour le stockage du GPL les sphères de charge de capacité de 1000 m<sup>3</sup> chacun (22 sphères = 22000 m<sup>3</sup>).

Ce dernier est stocké en température ambiante et une pression de 100 ppm.



**Figure I. 1:** Sphère de Charge

#### **I.1.4.3 Section des utilités**

Elle alimente les diverses zones de production en :

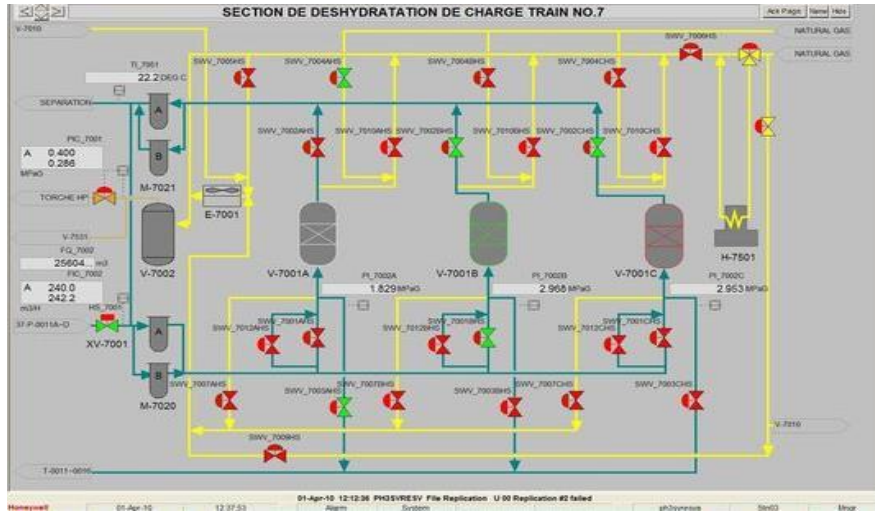
- Fuel (gaz naturel) : utilisé comme combustible.
- Air : elle est divisée en deux :
- Air instrument : C'est de l'air séché après enlèvement de l'humidité, cet air aide pour ouvrir les vannes et la manipulation des boucles de régulation (vanne pneumatique).
- Air service : C'est du l'air qui sert pour le nettoyage et l'entretien.
- Vapeur : On utilise le dessaleur pour avoir l'eau distillée et à partir de la chaudière on produit de la vapeur.

- Eau : elle est divisée en trois :
  - ✓ Eau distillée ;
  - ✓ Eau de refroidissement ;
  - ✓ Eau potable ;
- Méthanol : Il est utilisé pour le dégivrage.
- Gasoil : Il est utilisé pour les générateurs de secours.
- Azote : Ballon d'azote, il y'a deux circuits
- Circuit Gazeuse (HELIOS) ;
- Circuit l'azote liquide (COGIZ) : On le transforme en vapeur pour l'inertage des équipements.
- Générateur électrique de secours d'une capacité de 25.617 kW.
- Système de sécurité vide-vite (blow-down).
- Torches : trois hautes pressions et deux basses pressions sert à brûler la quantité de gaz provoquée par un dysfonctionnement des trains.

#### **I.1.4.4 Section déshydratation**

L'objectif de cette section est de réduire la teneur d'eau de 100 ppm à 5 ppm dans le déshydrateur de charge, et de 5 ppm à environ 1 ppm dans le déshydrateur de garde (dans la section réfrigération), et cela pour éviter la formation du givre au niveau des équipements de la section réfrigération.

Cette section comprend trois colonnes d'adsorption à tamis moléculaires, on a la première colonne en ligne pour l'adsorption, et la deuxième est en régénération, et la troisième en attente Le GPL passe dans le sécheur du bas vers le haut, l'humidité est extraite lors du passage du GPL à travers les tamis moléculaires pendant 36 heures, une fois cette durée est dépassée, la colonne en réserve est mise en ligne, et la colonne qui était en service passe en régénération avec un temps de 19 heures. A ce moment-là, la troisième colonne a achevé son cycle de régénération et passe en réserve.<sup>2</sup>



**Figure I. 2: Schéma de la Section de déshydratation**

### **I.1.4.5 Section de séparation**

C'est la section qui assure la séparation du GPL en deux produits finis, propane (C<sub>3</sub>) et butane (C<sub>4</sub>) en plus de très faibles quantités d'éthane (C<sub>2</sub>) et de pentane (C<sub>5</sub>).

Le GPL déshydraté doit être porté à sa température d'ébullition de 71°C.

Cette section est divisée en trois séparateurs :

#### **1- Fractionnateur :**

La colonne du fractionnateur est une colonne de fractionnement aussi nommé le splitter, contient de 55 plateaux à clapets, C'est là où le GPL est séparé en (propane + éthane) (C<sub>3</sub>+C<sub>4</sub>) en tête de colonne et en (butane + pentane) au fond de la colonne. Les produits de tête de colonne sont condensés et récupérés au niveau du ballon de reflux, Les produit sortant du fond de la colonne est dirigé soit vers la section de réfrigération.

#### **2- Dé-éthaniseur :**

La colonne de dé-éthanisation est une colonne de fractionnement équipée de 25 plateaux à clapets, pour élimination du l'éthane contenue dans le propane, L'éthane sort en tête de colonne passant par les condenseurs, après accumulé dans ballon de reflux, et le propane sort du fond de la colonne puis est dirigé vers la section réfrigération.

#### **3- Dé-pentaniseur :**

La colonne de dé-pentanisation est une colonne de fractionnement équipée de 50 plateaux à clapets, utilisée pour séparation du pentane (C<sub>5</sub>) contenu dans le butane (C<sub>4</sub>), rarement on l'utilise seulement si la teneur de butane dans la charge dépasse 10%.<sup>3</sup>

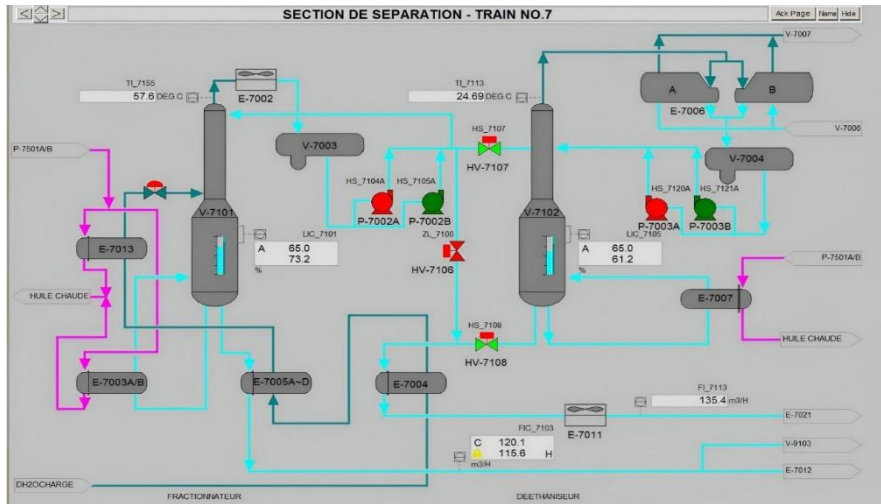


Figure I. 3: Schéma de la Section de séparation

### I.1.4.6 Section de réfrigération

Dans cette section qu'on reçoit le propane et le butane de la section séparation, les réfrigère jusqu'aux basses températures correspondantes aux points de saturation liquide au voisinage de la pression atmosphérique ( $-38 \sim -42^{\circ}\text{C}$  pour le propane et  $-8 \sim -10^{\circ}\text{C}$  pour le butane), et les dirigés vers les bacs de stockage à basse température, Les produits seront réfrigérés par trois (3) échangeurs (schillers) suivant un cycle fermé formant une boucle de réfrigération.

Le fluide utilisé comme réfrigérant est le propane pur. Ce dernier est évaporé dans les échangeurs de chaleur. Cette évaporation provoque l'abaissement de température du produit à réfrigérer.

Les vapeurs résultantes de l'évaporation du propane réfrigérant dans les schillers, les condenseurs de têtes du dé-éthaniseur sont collectées dans les trois ballons d'aspiration HP, MP et BP pour être aspirées par le compresseur centrifuge entraîné par une turbine à gaz dans la phase I et par un moteur électrique dans la phase II et phase III, puis elles sont condensées dans les condenseurs de type aéro-réfrigérant (E-X027).

Les produits finis sont ensuite canalisés vers les bacs de stockage.

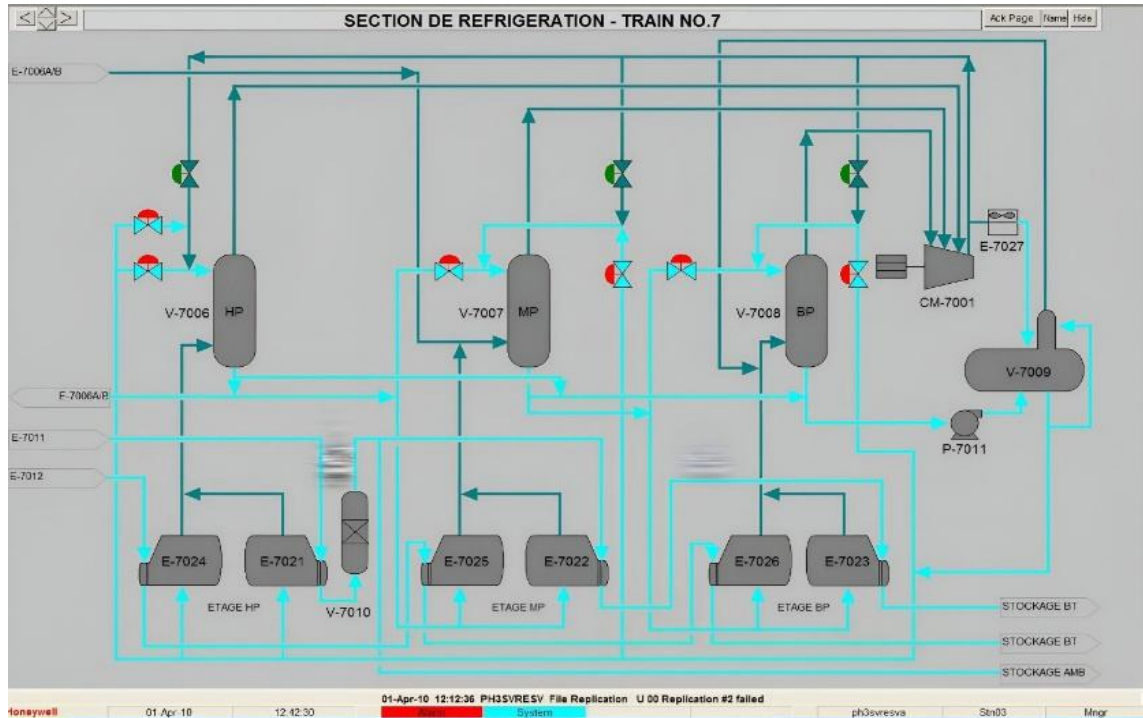


Figure I. 4: Schéma de la Section de réfrigération

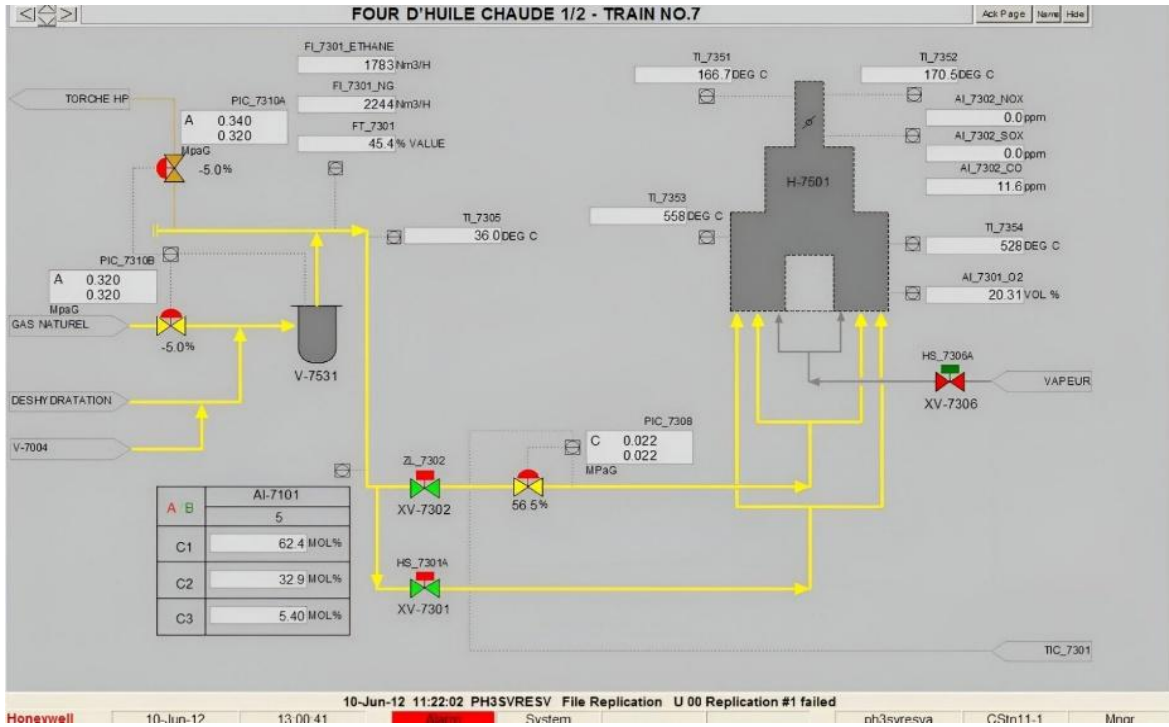
### I.1.4.7 Section d'huile chaude

La section du fluide caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour les rebouilleurs des colonnes de fractionnement et pour le préchauffeur final de la charge GPL.

Le fluide caloporteur circulant dans la boucle est l'huile TORADA TC 32, chauffé par le four.

La température du fluide caloporteur à la sortie du four représente la température d'entrée pour chaque utilisation, est maintenue à 180°C.

Le four (H-N501) fournit également la chaleur nécessaire au gaz naturel pour la régénération des tamis moléculaire de la section déshydratation tout en chauffant ce dernier dans un petit serpentin par convection à une température constante de 280°C à un débit de 2000 m<sup>3</sup>/h.



**Figure I. 5: Schéma de la Section d'huile chaude**

### I.1.4.8 Stockage à basse température

Elle contient huit bacs de stockage à basse température, quatre pour le propane et quatre autres pour le butane d'une capacité de stockage de 70000 m<sup>3</sup> chacun. Les bacs sont en doubles parois qui permettent de maintenir les deux produits à une température de -40°C pour le propane (C<sub>3</sub>), et de -6°C pour le butane (C<sub>4</sub>).

Ceux de la phase III sont en béton Armé à la place de la double paroi.

Chaque bac est muni de system de sécurité des soupapes, des casses vides et des lignes de gaz naturel (GN) en cas de chute de pression à l'intérieur des bacs. De 5 pompes immergées dont 3 pour chargement navires, 1 pour la circulation froide du fluide tout au long de la ligne jusqu'à la jetée ,1 pompe inter parois pour vider le liquide présent entre les parois du bac.



Figure I. 6: Bac de Stockage

### I.1.4.9 Stockage à température ambiante

Prévu pour la commercialisation du gaz à l'échelle nationale.

Le procédé du chargement des camions se fait à partir des 5 sphères ayant une capacité de 500 m<sup>3</sup> chacune dans lesquelles sont stockés le propane et le butane à une température ambiante.



Figure I. 7: Sphère de Stockage

#### I.1.4.10 Section chargement navires

C'est une section d'expédition de C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> pour le marché international, elle contient deux quais de chargement navires D1 et M6.

Les opérateurs doivent suivre toutes les instructions du chef de quart sur :

- ✓ La quantité de chargement.
- ✓ Mesure de sécurité du navire.
- ✓ Début et fin de l'opération.
- ✓ Compte Rendus à sa hiérarchie
- ✓ La capacité des navires variant

entre 4 000 et 45 000 tonnes de GPL.



Figure I. 8: Section chargement navires

#### I.1.4.11 Section chargement camions

C'est une section d'expédition de C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> pour le marché national, elle contient une salle de contrôle, deux balances électroniques et 06 rampes de chargement de camions dont 02 rampes pour C<sub>3</sub> à température ambiante et une pression de 7 bars, 3 rampes pour C<sub>4</sub> à température ambiante et 1 rampe pour C<sub>5</sub> elle est isolée pour le moment.



Figure I. 9: Section chargement camions

#### I.1.4.12 Section torche HP et BP :

Par mesure de sécurité, et afin d'éviter les incendies, tous les gaz non brûlés passe dans des ballons qu'on les appelle BLOWDOWN.

Les gaz échappés ou crachés par les soupapes de sécurité passent dans des ballons pour les préchauffer et diriger soit vers les 2 torche HP (Haute Pression) ou vers la torche BP (Basse Pression).

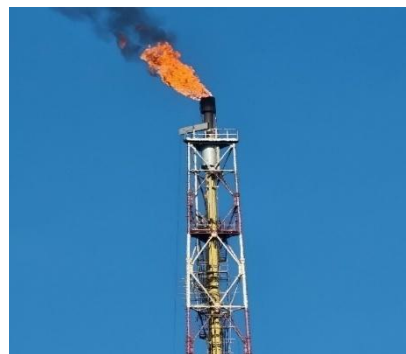
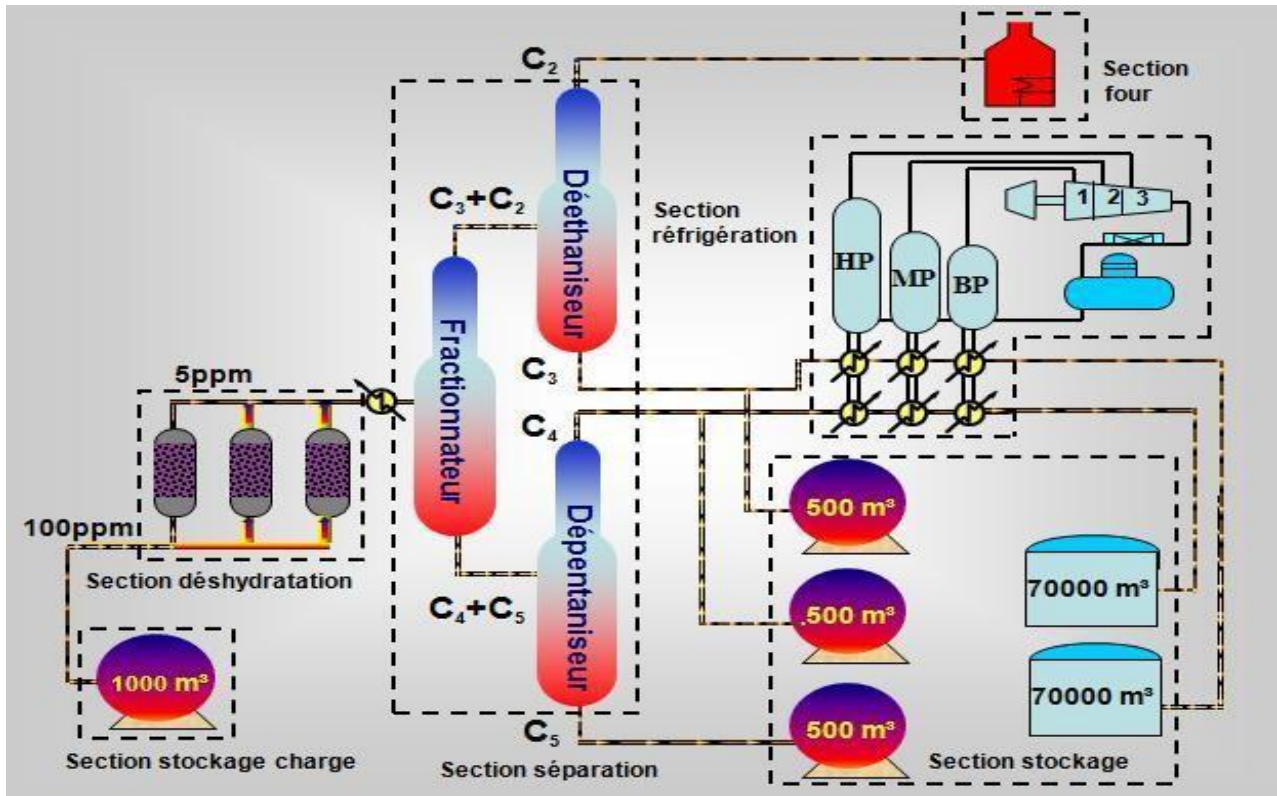


Figure I. 10: Torche

### **I.1.4.13 Section de transfert :**

Quand un produit est hors spécification ou contaminé, le propane ou le butane réfrigéré à basse température est dirigé vers la section de stockage à température ambiante pour assurer le chargement des camions.



**Figure I. 11: Schéma de Procédé**

## **I.2 GÉNÉRALITÉS SUR LE FLUIDE CALORPORTEUR :**

La section du fluide caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour les rebouilleurs et les préchauffeurs finaux de la section séparation. L'huile circule selon une boucle fermée entre le four et les utilisateurs via un ballon tampon, chaque train dispose de son propre circuit d'huile chaude. Rappelons que le fluide caloporteur circulant dans le système est de l'huile type « TORADA TC ».

### **I.2.1 Définition générale d'un fluide caloporteur**

Un fluide caloporteur est un liquide ou un gaz utilisé pour transférer de la chaleur d'un système à un autre. Ces fluides sont choisis pour leur capacité à absorber, transporter et restituer la chaleur efficacement dans des conditions de température et de pression variées. Ils sont couramment utilisés dans les systèmes de chauffage, les échangeurs de chaleur, les centrales solaires thermiques et les procédés industriels. <sup>4</sup>

## **I.2.2 C'est quoi TORADA TC 32**

TORADA TC 32 est un fluide caloporteur synthétique à base d'huiles hautement thermostables, spécialement formulé pour les applications industrielles à haute température. Il est conçu pour offrir une stabilité thermique élevée, une oxydation réduite et une longue durée de vie dans les systèmes de chauffage indirect, notamment les fours industriels, les circuits de refroidissement et les échangeurs thermiques. <sup>5</sup>

## **I.2.3 Propriétés du fluide caloporteur**

**Tableau I. 1:** Propriétés du fluide caloporteur

<b>Propriété</b>	<b>Valeur / Caractéristique</b>
<b>Densité (à 20°C)</b>	~0,88 g/cm <sup>3</sup>
<b>Viscosité (à 40°C)</b>	32 mm <sup>2</sup> /s
<b>Point d'éclair</b>	> 200°C
<b>Point de congélation</b>	< -20°C
<b>Temp. max d'utilisation</b>	320°C (court terme) / 300°C (continu)
<b>Stabilité thermique</b>	Excellente résistance à la dégradation

## **I.2.4 Avantages et Inconvénients du fluide TORADA TC**

### **Avantages :**

- ✓ Excellente stabilité thermique à haute température.
- ✓ Faible volatilité, réduisant les pertes par évaporation.
- ✓ Compatibilité avec les joints et matériaux courants (acier, cuivre, élastomères standards).
- ✓ Longue durée de vie avec une maintenance réduite.

### **Inconvénients :**

- ✗ Coût plus élevé que les huiles minérales standards.
- ✗ Nécessite un système étanche pour éviter l'oxydation en présence d'air à haute température.

## I.2.5 Pourquoi utilisé TORADA TC 32

Le choix de **TORADA TC 32** pour un four industriel s'explique par :

- **Haute résistance thermique** : Supporte des températures jusqu'à **300-320°C** sans se dégrader rapidement.
- **Sécurité améliorée** : Point d'éclair élevé ( $> 200^{\circ}\text{C}$ ), réduisant les risques d'inflammation.
- **Efficacité énergétique** : Faible viscosité à haute température, permettant un meilleur transfert de chaleur.
- **Durabilité** : Réduit la fréquence de remplacement du fluide, optimisant les coûts de maintenance. <sup>6</sup>

## I.2.6 Description du circuit de fluide caloporteur

Chaque train dispose de son propre circuit d'huile chaude circulant en boucle fermée, le fluide caloporteur est repris par la pompe dans le ballon d'expansion, il est ensuite distribué dans les huit passes parallèles du four.

La température du fluide à la sortie du four est maintenue à  $180^{\circ}\text{C}$  par un régulateur de température qui contrôle la pression du fuel gaz aux brûleurs.

A la sortie du four, le fluide caloporteur thermique entre dans le collecteur d'alimentation qui alimente les différents utilisateurs.

Pour la stabilité de la section de séparation, un débit supplémentaire passe à travers le four et gèrer recyclé à travers la vanne F U N° 302 actuellement, ce débit de recyclage à travers la F U N° 302 dépasse les 10% de la somme des débits vers les utilisateurs.

Le design prévoit un débit de recyclage seulement de 10% du débit fourni aux utilisateurs.

Le débit dans le collecteur d'alimentation est maintenu constant par le réglage du débit recyclé de fluide caloporteur vers le premier utilisateur le rebouilleur du dé-éthaniseur et contrôlé par asservissement à la température de fond du dé-éthaniseur.

Le débit du fluide caloporteur vers le deuxième utilisateur ou le préchauffeur n°3 de la charge se fait en parallèle et sous contrôle de la température du GPL préchauffé à la sortie de ce préchauffeur.

Le débit vers le troisième utilisateur, le rebouilleur du fractionnateur (A et B) se fait également en parallèle directement depuis le collecteur d'alimentation sous contrôle débit.

Le débit vers ce rebouilleur est contrôlé en cascade par la température de fond du dé-pentaniseur qui pilote le contrôleur de débit du fluide caloporteur.

Ainsi, il peut être pris et retourné vers l'un des 4 trains en fonctionnement. Le rebouilleur est mis en ligne avec la section du fluide caloporteur qui sort des quatre utilisateurs à la même température de 130°C et entre dans le collecteur de retour qui le ramène au ballon d'expansion où il est dégagé puis repris par la pompe de circulation.

Le fuel gaz fourni au four venant du ballon de détente du gaz combustible est un mélange de gaz de purge du dé-éthaniseur, venant de la section de séparation de gaz usé de la section de déshydratation et de gaz naturel. Venant de système de gaz naturel, ou de l'un des quelconques des gaz cités.

- les échappements de la turbine dirigés vers la zone de convection combinée du four en prévenance de la section de réfrigération peuvent être dirigés vers la cheminée. Au besoin cette même cheminée est utilisée pour le décodage à la vapeur des tubes du four.

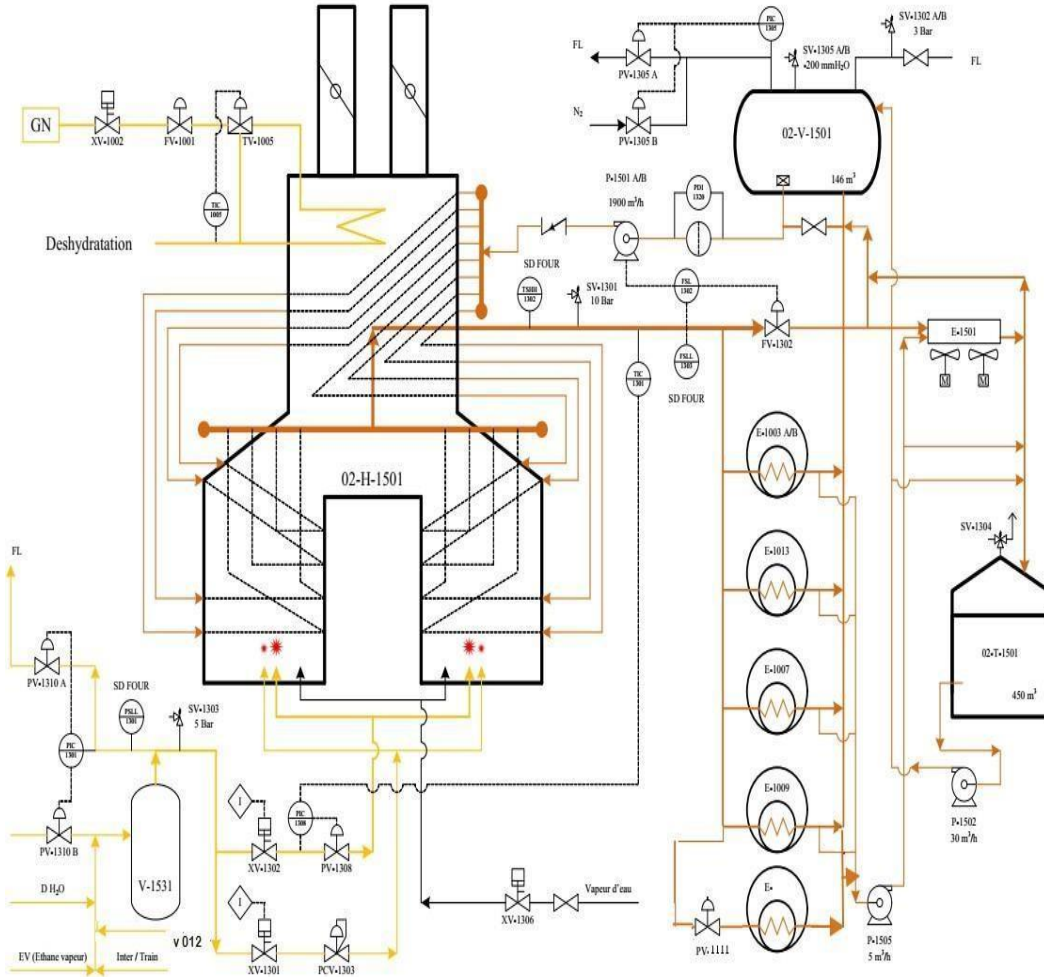


Figure I. 12: Schéma du circuit de l'huile chaude

**CHAPITRE II :  
DÉSCRIPTION  
GÉNÉRALE DES  
FOURS**

## CHAPITRE II :

# DÉSCRIPTION GÉNÉRALE DES FOURS

### II.1 Introduction

Les fours sont des appareils dans lesquels le chauffage des fluides s'effectue à travers les fumées produites par la combustion d'un combustible liquide ou gazeux. Ils sont dits à chauffage direct lorsque la chaleur des fumées est cédée directement au fluide froid qui circule dans un serpentin tubulaire. Ces fours sont distincts des fours à chauffage indirect, dans lesquels le fluide à réchauffer circule dans un faisceau tubulaire baignant dans un fluide chaud, lui-même chauffé directement par les fumées de combustion.

Les fours à chauffage direct doivent aussi être distingués des fours à chauffage par mélange (tels que les régénérateurs de catalyseur) dans lesquels le fluide à réchauffer est porté à température par mélange avec les fumées d'un combustible.

Un four tubulaire est constitué d'une enveloppe métallique de formes diverses, souvent parallélépipède ou cylindrique. Le four comporte une zone, dite « zone radiation » qui est celle où les tubes sont directement exposés à la flamme et reçoivent la chaleur principalement par radiation des produits de la combustion. En fait, cette zone est à proprement parler, la chambre de combustion où se développe la flamme. C'est en général, devant les parois de cette zone que sont placés les tubes. La plupart du temps en une rangée, parfois en deux rangées. La zone de convection si elle existe, est installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion. Elle est constituée d'un faisceau de tubes placé en quinconce, perpendiculairement ou parallèlement à la direction des fumées. Dans les deux cas, on cherche à obtenir une vitesse assez grande pour les fumées, de façon à augmenter, le coefficient d'échange. Les tubes placés en zone de convection ont quelque fois leur surface extérieure, dans la partie en contact avec les fumées, recouverte d'ailettes ou d'aiguilles (studs) qui augmentent considérablement la surface d'échange. L'enveloppe métallique du four doit être suffisamment renforcée pour résister aux actions du vent et supporter l'ensemble du faisceau tubulaire et de tôles boulonnées ou soudées sur cette charpente. Comme en générale, la chambre de combustion est en dépression par rapport à l'atmosphère du fait du tirage de la cheminée, cette enveloppe doit être suffisamment étanche pour éviter des entrées d'air parasite qui aurait un effet préjudiciable sur le rendement du four. Les parois

intérieures du four sont protégées contre les effets de la température par un garnissage réfractaire et isolant dans un but de réduire les pertes calorifiques à l'extérieur. Le plancher de la zone de combustion constitue la tôle du four, elle est recouverte d'une couche de produits réfractaires et isolants. La cheminée de forme cylindre peut être située directement sur le four ou sur une fondation séparée. Pour un rôle de conduire les fumées. Dans l'atmosphère à une hauteur telle qu'elles ne risquent pas de gêner le voisinage, mettre la chambre de combustion en dépression et provoque ainsi l'entrée de l'air nécessaire à la combustion par les volets d'air des brûleurs. La cheminée est protégée dans sa partie base par une couche de béton réfractaire. Ce qui permet de la construire en acier ordinaire.<sup>7</sup>

## II.2 Description des fours industriels

### II.2.1 Description des fours

Un four permet d'obtenir une chaleur intense, obtenue grâce à de l'énergie thermique ou électrique c'est un outil utilisé pour élever la température d'un produit. Il peut être soit :

- Un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation).
- Un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie).

Il s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est un des éléments. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui rend une approche globale assez délicate. Le présent article traite les fours dans leurs généralités, on s'efforce d'y dégager des caractéristiques communes à l'ensemble des fours. Il introduit une série d'articles portant chacun sur les fours spécifiques à une industrie notamment :

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

## II.2.2 Classification suivant la manutention des produits traités

C'est la manutention et la circulation du produit qui est ici le critère.

- ❖ **Dans un four continu** : le produit à chauffer entre à une des extrémités et en ressort à l'autre. C'est le cas :
  - Des fours de réchauffage de semi-produits (fours à longerons et fours poussants) de la sidérurgie ;
  - Des fours de l'industrie chimique et du raffinage ;
  - Des fours rotatifs de l'industrie cimentière.
- ❖ **Dans un four discontinu** : le produit à chauffer est immobile dans le four. Il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit. C'est le cas :
  - Des fours à sole mobile de forge ;
  - Des fours à soles fixes de traitement thermique ;
  - Des fours à cloches mobiles et élévateurs ;

Cette différence dans la manutention entraîne des différences notables du point de vue thermique. Dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température ; dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit.

## II.3 Les différents types de fours

Il existe de nombreuses dispositions des tubes, dans la zone de radiation et de convection, et d'une zone par rapport à l'autre. Il en résulte de nombreux types de fours. On peut, toutefois, distinguer les différentes catégories suivantes :

### II.3.1 Les fours cylindriques verticaux

Ce type de four peut être utilisé pour toutes les capacités, des plus faibles jusqu'aux plus importantes, et il est adapté aussi bien à la combustion du fuel que du gaz.

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

### II.3.2 Les fours dits (boîtes) à tubes verticaux

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

### II.3.3 Les fours dits (cabines) à tubes horizontaux

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

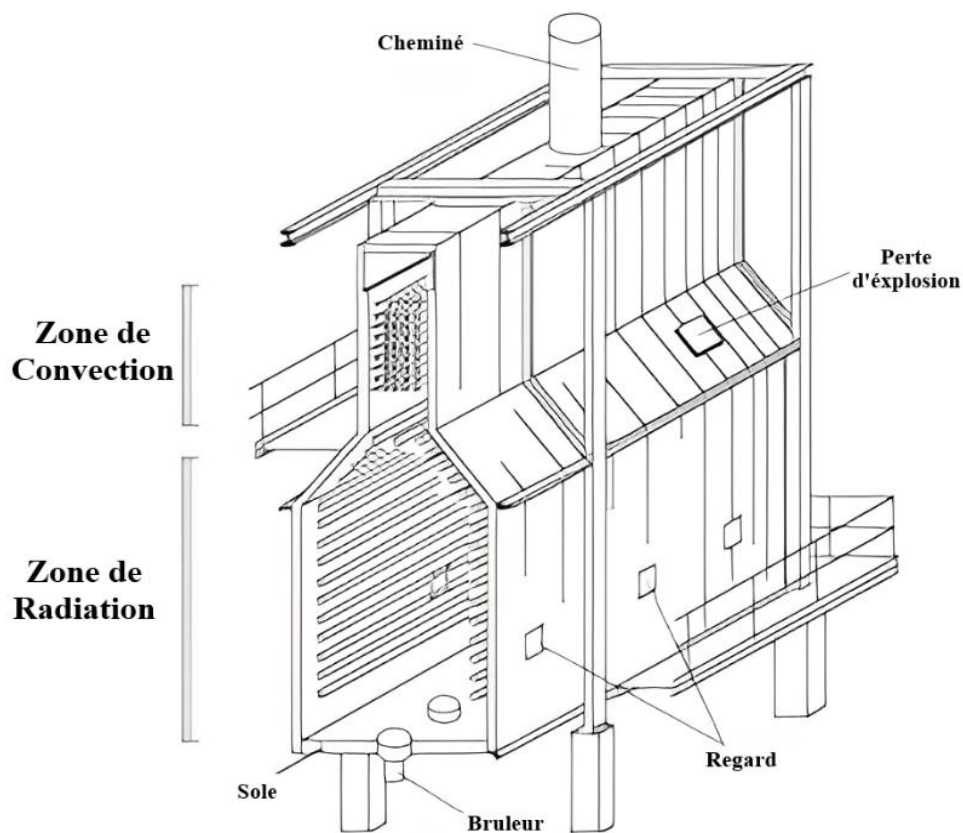


Figure II. 1: Schéma du fours dits (cabines) à tubes horizontaux

### **II.3.4 Les fours à chauffage par murs radiants**

La surface d'échange est placée dans le plan médian de la chambre de combustion. Les brûleurs sont répartis sur les parois latérales longitudinales. <sup>8</sup>

## **II.4 Constitution des fours**

Un four tubulaire est constitué d'une enveloppe métallique de formes diverses, souvent parallélépipède ou cylindrique. Les fours en général se composent de deux principales zones:

### **II.4.1 Zone de radiation**

Cette zone est constituée principalement d'une chambre de combustion où se développe la flamme, et des tubes sont directement exposés à cette flamme et ils sont placés devant les parois de cette zone en une rangée et parfois fois en deux rangées. Le fluide à chauffer circule à l'intérieur de ce faisceau de tubes. La transmission de chaleur s'effectue principalement par radiation. Une fraction de l'échange se fait également par convection entre les fumées et les tubes.

### **II.4.2 Zone de convection**

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

## **II.5 Les fours du complexe GP1/Z**

Les fours du complexe GP1/Z (phase I et phase III) sont de types « Lummus, Anderson», ces fours se fonctionnent à avec un taux de transfert élevé et régulier et ils sont adaptés pour des capacités moyenne et importantes. Le four utilisé dans le complexe GP1/Z est à huit passes, il comprend deux chambres de combustion là où le fluide caloporteur passe, une zone de radiation transfert de chaleur par rayonnement équipée par 15 pilotes et 15 brûleurs utilisant comme gaz combustible un mélange entre le gaz naturel et l'éthane récupéré au niveau du dé-éthaniseur du train. Une deuxième chambre dite zone de convection elle est alimentée par les gaz brûlés de la zone de radiation. Les deux fours des deux phases (I et III) sont utilisés pour Le chauffage du fluide caloporteur qui est l'huile utilisée comme source de chaleur pour les rebouilleurs les colonnes de la section de séparation où on sépare le C<sub>4</sub>,

C<sub>3</sub> et C<sub>2</sub>, Le chauffage du gaz naturel utilisé pour la régénération des déshydrateurs, Le gaz naturel récupéré de la section de déshydratation et l'éthane extrait de la section de séparation sont utilisés comme combustible pour le four ; en cas de besoin supplémentaire de carburant ; le gaz naturel frais est automatiquement injecté au four.

**CHAPITRE III :**  
**ÉTUDE DE**  
**L'OPTIMISATION DU**  
**RENDEMENT DU**  
**FOUR**

## CHAPITRE III :

# ÉTUDE DE L'OPTIMISATION DU RENDEMENT DU FOUR

### III.1 Introduction

La conception d'une unité de production chimique est une opération complexe qui demande des moyens financiers et humains très importants. Ainsi, lorsqu'un nouveau procédé est développé, le rôle de l'ingénieur consiste à trouver le système le plus adapté non seulement en termes d'efficacité et de sécurité, mais aussi de coût et de rentabilité pour fabriquer le produit. A ce titre, la simulation peut être d'une aide très précieuse en prenant en charge et en traitant ces problèmes. Surtout lorsque de nombreuses variables sont en jeu (diversité des composantes, complexité des interactions, non linéarité des phénomènes, ...).

Le simulateur HYSYS est l'un des plus performants logiciels de simulation. Il peut être utilisé lors de la conception d'un procédé industriel afin d'établir des bilans de matière et d'énergie d'un procédé industriel et de dimensionner les équipements de ce procédé ou bien dans le suivi des procédés qui sont déjà installés afin de réajuster les paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de compositions de l'alimentation ou des conditions de fonctionnement de certains.

Le but de ce travail est de simuler un procédé composé de plusieurs équipements tels que : “le séparateur, le four, la pompe”.

La simulation a pour but de maîtriser la création d'un procédé complet par le simulateur HYSYS.

Le logiciel Aspen EDR est un outil performant de conception et de vérification des échangeurs de chaleur. Il peut être utilisé lors de la phase de conception d'un procédé industriel afin de dimensionner précisément les échangeurs de chaleur en tenant compte des contraintes thermiques, hydrauliques et mécaniques. Aspen EDR permet également de vérifier les performances d'équipements déjà installés, afin d'évaluer leur efficacité réelle et d'apporter des modifications ou optimisations en cas de variations des conditions opératoires ou de la nature des fluides. Grâce à ses calculs détaillés et conformes aux normes

industrielles (TEMA, ASME), il garantit une conception fiable, sûre et économiquement optimisée des échangeurs.

L'objectif de ce travail est d'utiliser Aspen EDR pour concevoir et évaluer un échangeur de chaleur dans le cadre d'un procédé industriel, en maîtrisant les étapes clés tels que : "débits, températures, les pressions".

L'optimisation du rendement du four est un élément clé pour améliorer l'efficacité énergétique globale du procédé. Un rendement insuffisant affecte négativement les performances de l'installation, en particulier la durabilité des garnitures mécaniques de la pompe, soumises à des contraintes thermiques et hydrauliques excessives.

La démarche proposée vise à :

- Préserver la pompe en assurant un fonctionnement plus stable, proche de son régime optimal.
- Réduire la consommation de gaz naturel, ce qui permet non seulement une économie d'énergie, mais aussi une réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Diminuer la température des gaz rejetés dans l'atmosphère, réduisant ainsi l'impact environnemental du procédé.

Pour atteindre cet objectif, les étapes suivantes sont nécessaires :

1. **Contrôle du circuit d'huile** : Vérifier l'intégrité et le bon fonctionnement du circuit d'huile chaude, ainsi que du circuit de réchauffage au gaz naturel (GN). Il est essentiel de s'assurer que le circuit est bien fermé et opérationnel.

2. **Vérification des trajets des fluides** : Analyser les chemins parcourus par les deux fluides (huile et gaz naturel) afin de détecter d'éventuelles restrictions ou anomalies dans le circuit. En cas d'obstacles ou de pertes de charge excessives, des solutions correctives doivent être envisagées.

3. **Contrôle de la pompe à huile** : S'assurer que la pompe est capable de faire circuler efficacement l'huile étudiée, en maintenant un débit et une pression adaptés au fonctionnement du four.

4. **Inspection du four** : Vérifier que le four est en mesure de fournir la quantité de chaleur requise, en maintenant une bonne stabilité thermique et un rendement optimal.

5. **Vérification du circuit de réchauffage GN** : S'assurer que le flux de gaz naturel réchauffé est suffisant pour régénérer les tamis moléculaires et sécher les particules sans perturbation, garantissant ainsi un fonctionnement fiable du système de traitement.

### III.2 Calcul du rendement du four dans les conditions du complexe

#### GP1/Z

#### III.2.1 Rendement thermique d'un four

Le rendement thermique d'un four est une mesure de l'efficacité avec laquelle le four convertit l'énergie fournie (sous forme de combustible ou d'électricité) en chaleur utile pour le processus de chauffage ou de cuisson. Il est généralement exprimé en pourcentage et se calcule comme suit :

$$\eta = \left( \frac{\dot{Q}_{utile}}{\dot{Q}_{fournie}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (III.1)$$

$\eta$  : le rendement thermique (%).

$\dot{Q}_{utile}$  : Le débit de chaleur transmis efficacement à la charge.

$\dot{Q}_{fournie}$  : Le débit de chaleur de combustion.

Sachant que :

$$\dot{Q}_{utile} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \dots\dots\dots (III.2)$$

$$\dot{Q}_{fournie} = \dot{m}_{comb} \times PCI_{comb} \dots\dots\dots (III.3)$$

Avec :

$\dot{m}$  : Débit massique ( $kg/h$ ).

$C_p$  : Capacité calorifique ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ ).

$\Delta T$  : La différence des températures ( $T_{sortie} - T_{entrée}$ ).

$\dot{m}_{comb}$  : Débit massique du combustible GN ( $kg/h$ ).

$PCI_{comb}$  : Pouvoir calorifique inférieur du combustible ( $kJ/kg$ ).

**a. Calcul de la puissance utile :**

Dans le cadre de l'estimation de la puissance utile  $\dot{Q}_{utile}$  absorbée par l'huile thermique TORADA TC 32, la formule classique repose sur la relation (III.2) :

Le tableau des propriétés thermiques de l'huile TORADA TC 32 montre que les valeurs de  $C_p$  varie de manière significative avec la température. Par conséquent, on ne peut pas utiliser une valeur fixe de  $C_p$ .

D'où :

$$\dot{Q}_{utile} = \dot{m} \times \int_{T_e}^{T_s} C_p dT \dots\dots\dots (III.4)$$

Pour remédier à cela, nous avons recours à la **méthode des trapèzes**, qui permet de calculer cette intégrale. Cette méthode numérique repose sur la discrétisation de l'intervalle de température en sous-intervalles, sur lesquels on approxime la fonction  $C_p(T)$  par des segments linéaires. Elle est définie par la formule :

$$\int_{T_e}^{T_s} C_p dT = \frac{1}{T_s - T_e} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{C_p(T_i) + C_p(T_{i+1})}{2} \times (T_{i+1} - T_i) \dots\dots\dots (III.5)$$

On donne dans le tableau (III.1) les valeurs de  $C_p$  en fonction de la température sur l'intervalle [135 ÷ 180]°.

**Tableau III. 1 :** Valeurs de  $C_p$  en fonction de la température

Température (°C)	Chaleur Spécifique (kJ/kg × °C)
135	2.28925
140	2.307
160	2.382
180	2.453

L'intégrale devient :

$$\int_{135}^{180} C_p dT = \frac{1}{180-135} \left[ \frac{2.28925+2.307}{2} \times (140 - 135) + \frac{2.307+2.382}{2} \times (160 - 140) + \frac{2.382+2.453}{2} \times (180 - 160) \right]$$

$$\int_{135}^{180} C_p dT = 2.427 \text{ kJ/kg} \times \text{°C}$$

Nous avons également besoin, pour calculer  $\dot{Q}_{utile}$ , du débit massique  $\dot{m}$ . Celui-ci est calculé à partir du débit volumique  $\dot{V}$ :

$$\dot{m} = \rho \times \dot{V}$$

Avec  $\rho$  la masse volumique de l'huile à la température d'entrée.

Nous donnons dans le tableau (III.2) les valeurs de  $\rho$  en fonction de la température<sup>10</sup>.

**Tableau III. 2:** Valeurs de  $\rho$  en fonction de la température

Température (°C)	Masse Volumique (kg/m <sup>3</sup> )
120	808
140	795
160	783
180	770

Par un calcul d'interpolation linéaire, on trouve  $\rho(135^\circ C) = 798.25 \text{ kg/m}^3$

La puissance utile obtenue pour un débit volumique  $\dot{V} = 1100 \text{ m}^3/\text{h}$  :

$$\dot{Q}_{\text{utile}} = 798.25 \times 1100 \times 2.427 \times (180 - 135)$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{\text{utile}} = 9.59 \times 10^7 \text{ KJ/h} \equiv \boxed{2.29 \times 10^7 \text{ kcal/h}}$$

**b. Calcul de  $\dot{Q}_{\text{fournie}}$  :**

La puissance fournie  $\dot{Q}_{\text{fournie}}$  correspond à l'énergie thermique apportée au système par la combustion du gaz naturel dans le four. Cette puissance peut être estimée à partir des  $PCI_i$  des constituants du GN, par la relation :

$$\dot{Q}_{\text{fournie}} = \dot{m}_{\text{comb}} \times PCI_{\text{comb}}$$

Avec :

$$PCI_{\text{comb}} = \sum w_i \times PCI_i \dots \dots \dots \text{ (III.6)}$$

Sachant que :

$w_i$  : la fraction massique pour chaque constituant présent dans le combustible (GN).

$PCI_i$  : Pouvoir Calorifique Inférieur Massique pour chaque constituant (kcal/kg).

• **Calcul du  $PCI_{comb}$  :**

Pour déterminer le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz naturel, une analyse détaillée de sa composition est nécessaire. Le tableau (III.3) présente les différents constituants du mélange, accompagnés de leurs fractions massiques et de leurs PCI respectifs<sup>11</sup>.

**Tableau III. 3:** Les pouvoirs calorifiques inférieurs pour chaque constituant du GN

<b>Composant</b>	<b>Fraction massique</b>	<b>PCI (<i>kcal/kg</i>)</b>
CH <sub>4</sub>	0.6972	8331.74
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.1118	1269.24
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.0520	576.67
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.0122	133.55
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.0183	199.88
iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.0045	48.29
nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.0057	61.03
nC <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.0081	85.18
N <sub>2</sub>	0.0851	0
CO <sub>2</sub>	0.0048	0
He	0.0004	0

Donc :

$$PCI_{comb} = (0.6972 \times 8331.74) + (0.1118 \times 1269.24) + (0.0520 \times 576.67) + (0.0122 \times 133.55) + (0.0183 \times 199.88) + (0.0045 \times 48.29) + (0.0057 \times 61.03) + (0.0081 \times 85.18) + (0.0851 \times 0) + (0.0048 \times 0) + (0.0004 \times 0)$$

On obtient :

$$PCI_{comb} = 10705.59 \text{ kcal/kg}$$

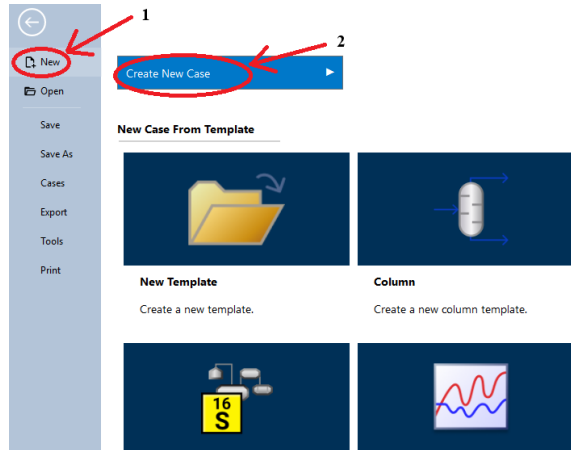
Le calcul de la puissance fournie nécessite la connaissance du débit massique du gaz naturel. Au niveau de l'unité GP1/Z, cette donnée n'est pas directement disponible.

Face à cette problématique, on a fait appel à Aspen HYSYS afin d'accéder à cette donnée par un calcul approprié. Le simulateur, intégrant des bases de données thermodynamiques complètes, permet d'obtenir ce genre de paramètres opératoires.

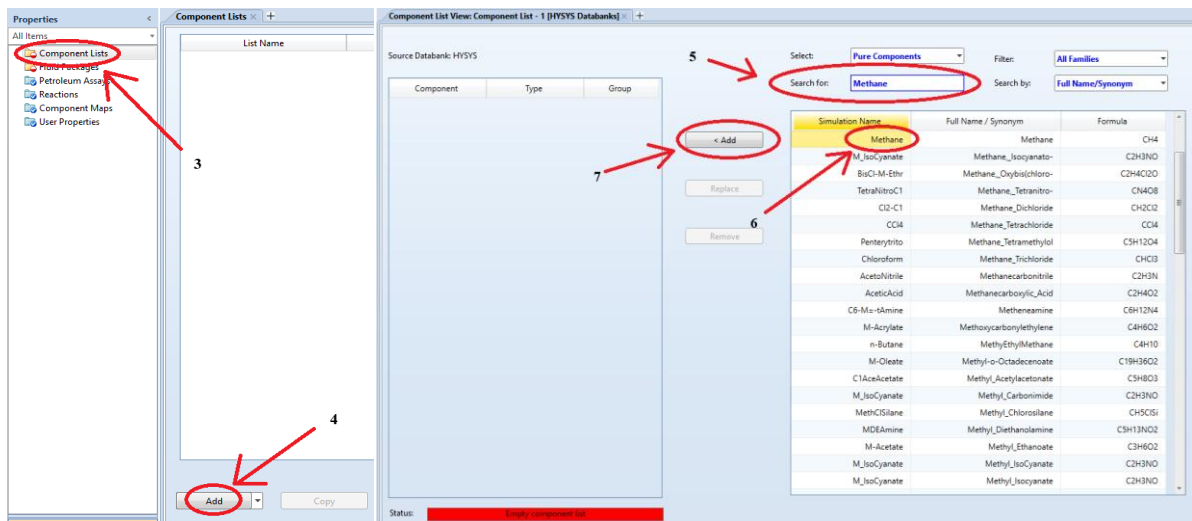
## III.2.2 Simulation par Aspen HYSYS

### III.2.2.1 Etapes de la simulation par HYSYS

1. Accéder à HYSYS. Puis, Crée un nouveau cas en suivant ces étapes : File → New → Case



2. Ensuite, Ajouter les composants comme suit : Add → Composants



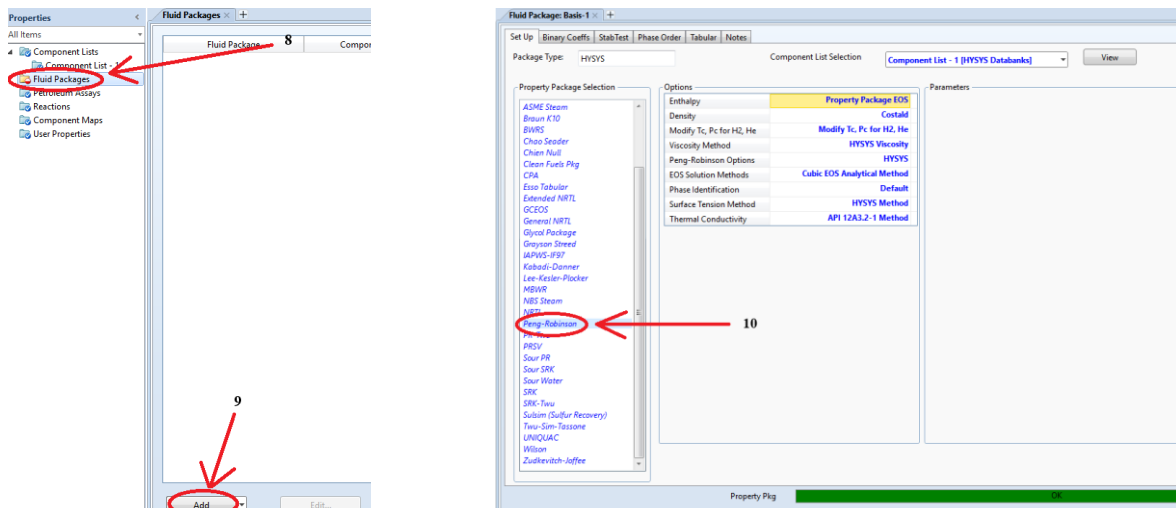
# ÉTUDE DE L'OPTIMISATION DU RENDEMENT DU FOUR

Source Databank: HYSYS			Source Databank: HYSYS			Source Databank: HYSYS		
Component	Type	Group	Component	Type	Group	Component	Type	Group
130-140C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	350-360C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	440-450C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
140-150C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	360-370C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	450-460C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
150-160C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	370-380C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	460-480C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
160-170C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	380-390C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	480-500C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
170-180C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	390-400C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	500-520C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
180-190C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	400-410C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	520-540C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
190-200C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	410-420C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	540-560C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
200-210C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	420-430C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	560-580C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
210-220C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	430-440C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	580-600C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
220-230C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	440-450C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	600-625C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
230-240C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	450-460C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	625-650C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
240-250C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	460-480C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	650-675C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
250-260C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	480-500C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	675-700C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
260-270C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	500-520C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	700-725C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
270-280C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	520-540C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	725-750C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
280-290C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	540-560C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	750-775C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
290-300C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	560-580C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	775-800C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
300-310C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	580-600C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	800-825C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
310-320C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	600-625C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	825-850C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
320-330C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	625-650C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	850-C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
330-340C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	650-675C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	Helium	Pure Component	
340-350C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	675-700C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	n-Hexane	Pure Component	

Source Databank: HYSYS			Source Databank: HYSYS			Source Databank: HYSYS		
Component	Type	Group	Component	Type	Group	Component	Type	Group
Hydrogen	Pure Component		n-Pentane	Pure Component		130-140C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
Nitrogen	Pure Component		3M-1-butene	Pure Component		140-150C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
CO	Pure Component		2M-2-butene	Pure Component		150-160C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
Oxygen	Pure Component		2M-13-C4=	Pure Component		160-170C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
Methane	Pure Component		tr2-Pentene	Pure Component		170-180C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
Ethylene	Pure Component		cis2-Pentene	Pure Component		180-190C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
Ethane	Pure Component		Cyclopentane	Pure Component		190-200C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
CO2	Pure Component		Cyclopentene	Pure Component		200-210C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
H2S	Pure Component		22-Mpropane	Pure Component		210-220C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
Propene	Pure Component		33M-1-butene	Pure Component		220-230C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
Propane	Pure Component		H2O	Pure Component		230-240C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
i-Butane	Pure Component		36-40C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	240-250C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
i-Butene	Pure Component		40-50C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	250-260C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
1-Butene	Pure Component		50-60C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	260-270C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
13-Butadiene	Pure Component		60-70C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	270-280C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
n-Butane	Pure Component		70-80C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	280-290C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
cis2-Butene	Pure Component		80-90C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	290-300C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
tr2-Butene	Pure Component		90-100C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	300-310C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
i-Pentane	Pure Component		100-110C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	310-320C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
1-Pentene	Pure Component		110-120C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	320-330C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
2M-1-butene	Pure Component		120-130C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	330-340C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos
n-Pentane	Pure Component		130-140C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos	340-350C*	User Defined Hypothe...	Assay Hypos

### 3. Après, Ajouter le modèle thermodynamique approprié :



4. Pour la partie simulation, Prendre de la palette d'objet un Stream Bleu (Material Stream) → Conditions (Température – Pression – Débit Massique) → Compositions

The image shows the Aspen Plus software interface. The 'Simulation' tab is highlighted with a red circle and arrow labeled '11'. The 'Model Palette' shows the 'Stream' icon circled in red with an arrow labeled '12'. A separate icon of a blue stream with the number '1' is circled in red with an arrow labeled '13'.

**Material Stream: Huile recycler**

Worksheet	Stream Name	Huile recycler	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	140,0	140,0
Composition	Pressure [kg/cm <sup>2</sup> ]	1,000	1,000
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	3,590	3,590
Petroleum Assay	Mass Flow [tonne/h]	1,400	1,400
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m <sup>3</sup> /h]	1,818	1,818
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-7,556e+005	-7,556e+005
Cost Parameters	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	2918	2918
Normalized Yields	Heat Flow [kcal/h]	-6,483e+005	-6,483e+005
Emissions	Liq Vol Flow @Std Cond [m <sup>3</sup> /h]	1,806	1,806
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

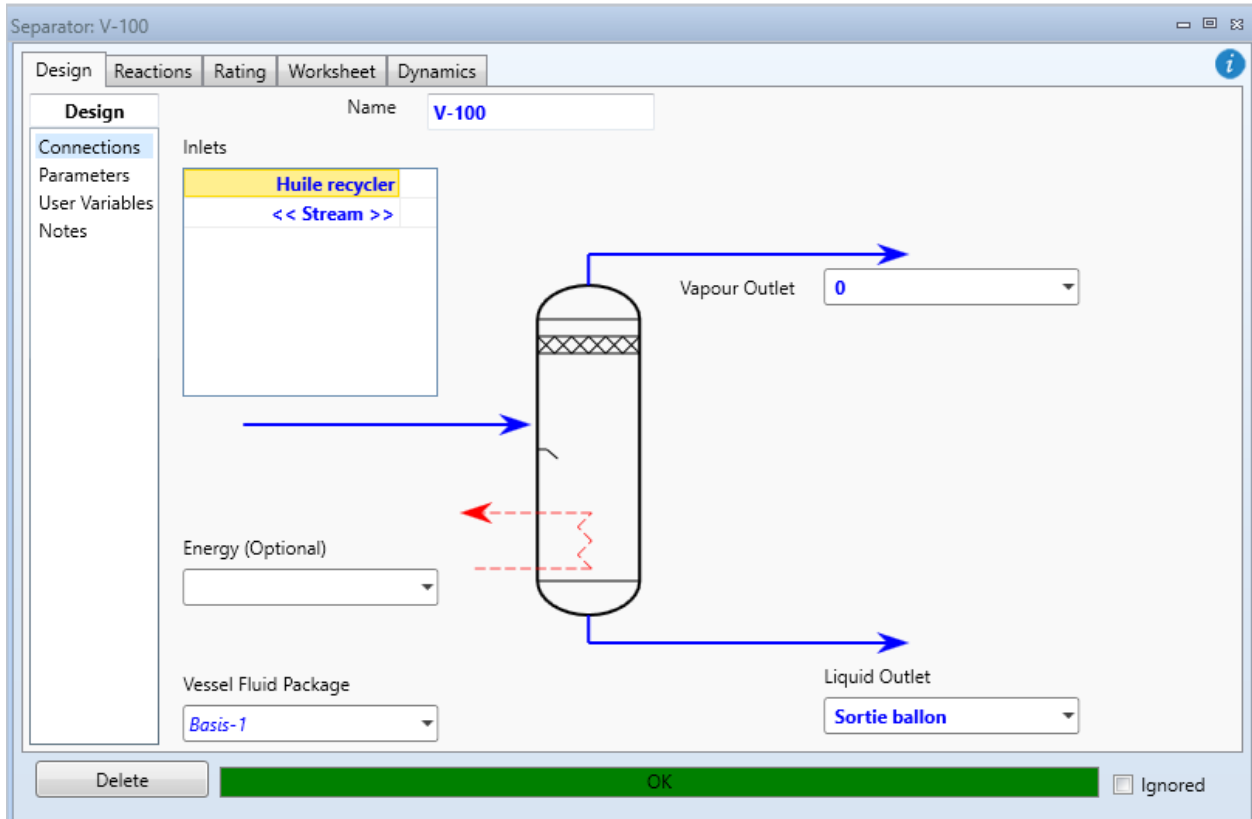
**Input Composition for Stream: Material Stream: Huile recycler**

	Mole Fraction
Hydrogen	0,0000
Nitrogen	0,0000
CO	0,0000
Oxygen	0,0000
Methane	0,0002
Ethylene	0,0000
Ethane	0,0003
CO <sub>2</sub>	0,0000
H <sub>2</sub> S	0,0000
Propene	0,0000
Propane	0,0004
i-Butane	0,0004
i-Butene	0,0000
1-Butene	0,0000
13-Butadiene	0,0000
n-Butane	0,0002
cis2-Butene	0,0000
tr2-Butene	0,0000
i-Pentane	0,0018
1-Pentene	0,0000

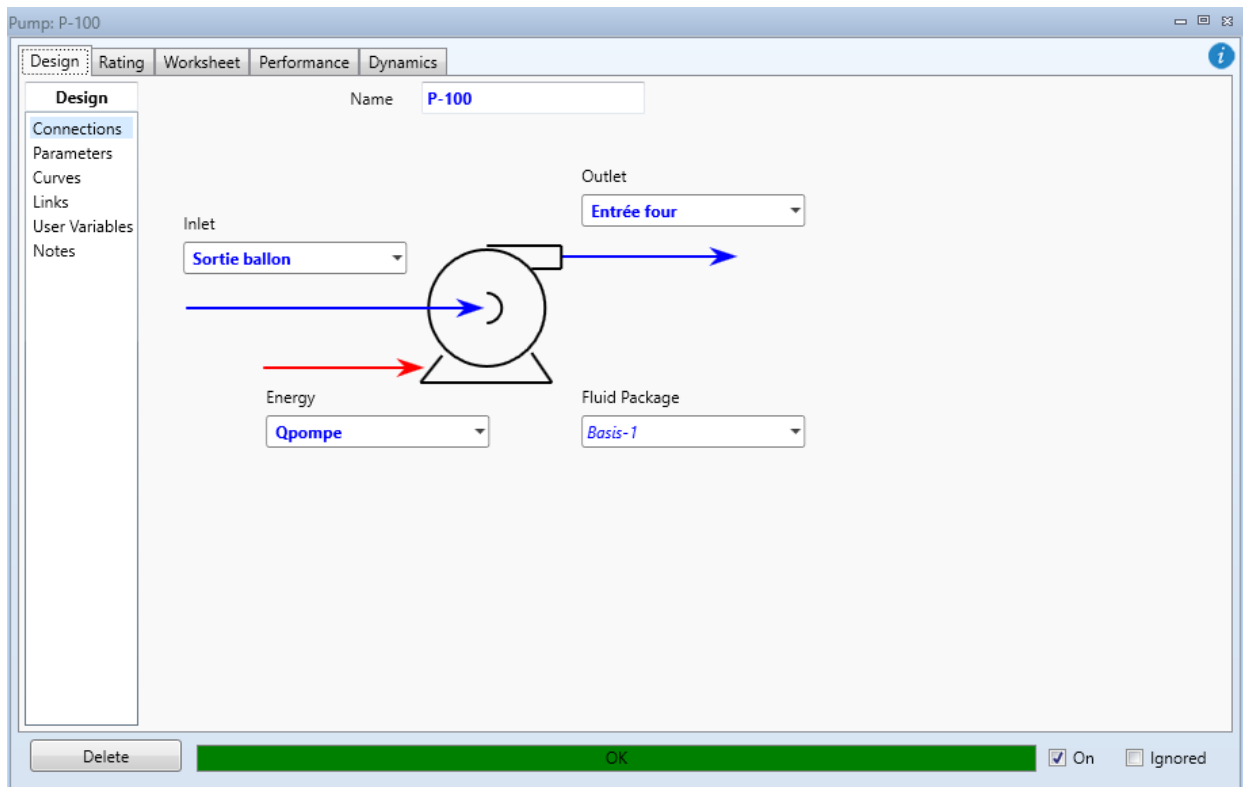
Composition Basis:  Mole Fractions,  Mass Fractions,  Liq Volume Fractions,  Mole Flows,  Mass Flows,  Liq Volume Flows

Buttons: Erase, Equalize Composition, Cancel, OK, Normalize, Total: 1,0000

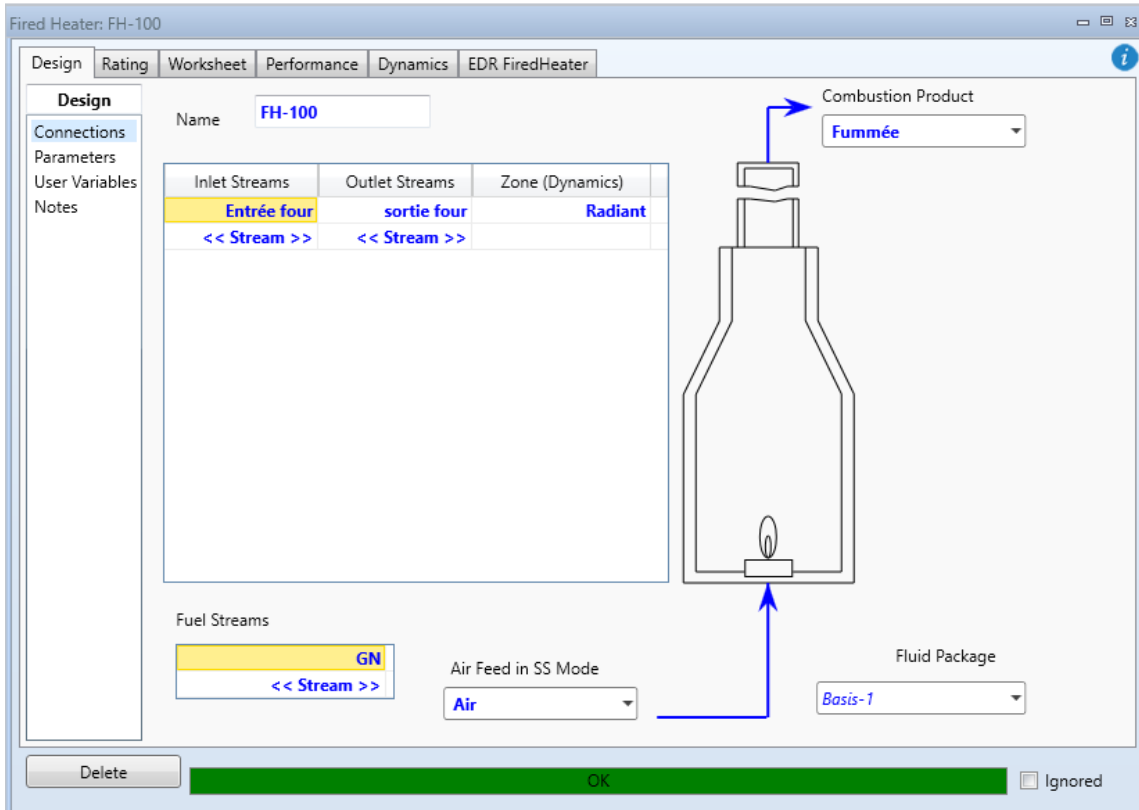
- Ajouter un séparateur depuis la palette d'objets avec une entrée et deux sorties ; une pour la vapeur et l'autre pour le liquide.



- Ajouter de la même manière une pompe qui sert à transporter l'huile liquide vers le four à une pression de 7 bars.



- Ajouter un four en précisant les deux courants de combustible (GN), et de comburant (air) → Ajouter Inlet et Outlet du four.



### III.2.2.2 Schéma général du simulateur Aspen HYSYS

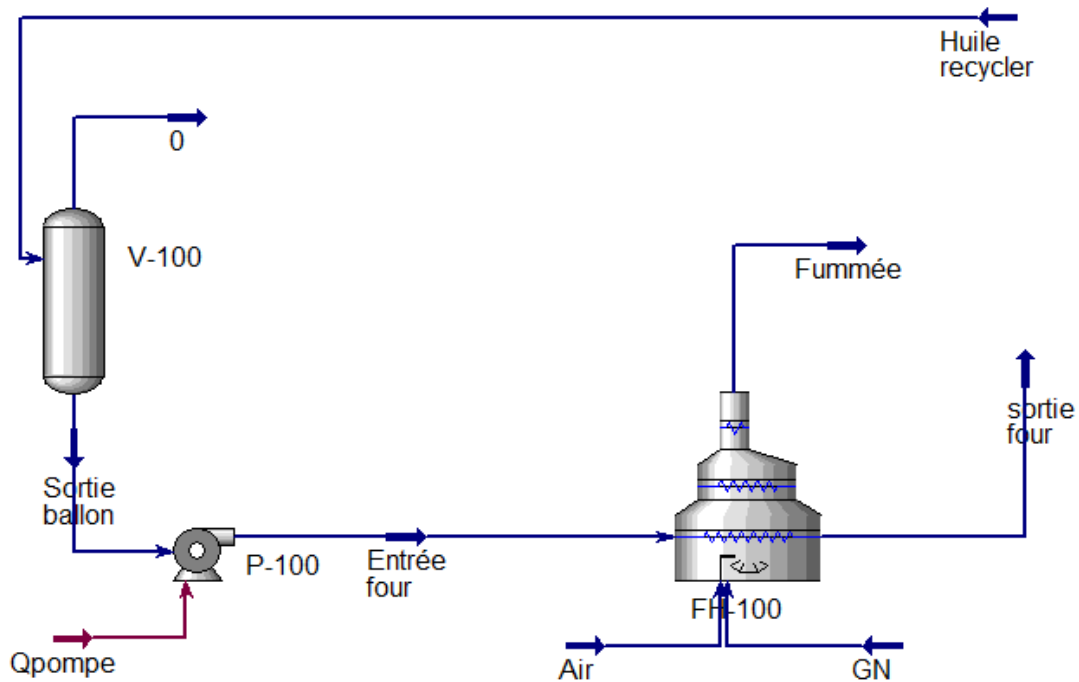


Figure III. 1: Schéma général du simulateur Aspen HYSYS

### III.2.2.3 Résultats obtenus par la simulation

Worksheet	Name	Entrée four	Air	GN	sortie four	Fumée
Conditions	Vapour	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	135,0000	25,0000	0,0000	180,0000	280,0000
Composition	Pressure [kg/cm2]	7,000	1,033	8,171	7,000	1,033
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	2171,7928	1415,9888	139,9528	2171,7928	1567,5597
	Mass Flow [tonne/h]	847,0000	40,8517	2,6729	847,0000	43,5246
	LiqVol Flow [m3/h]	1100,0000	47,2245	7,8626	1100,0000	52,5631
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-7,604e+005	-8,183	-7,450e+004	-7,114e+005	-7,469e+004
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	2904	155,7	165,8	3018	181,2
	Heat Flow [kcal/h]	-3,9472e+08	-2,7694e+03	-2,4921e+06	-3,6925e+08	-2,7983e+07

Figure III. 2: Résultats obtenus par HYSYS "WorkSheet"

D'après les résultats de la simulation, on trouve un débit massique de GN :

$$\dot{m}_{comb} = 2672 \text{ kg/h pour une température d'entrée d'huile } T_e = 135^\circ\text{C}.$$

La puissance fournie obtenue est :

$$\dot{Q}_{fournie} = 2672 \times 10705.59 \rightarrow \boxed{\dot{Q}_{fournie} = 2.86 \times 10^7 \text{ kcal/h}}$$

Enfin, le rendement du four pour une température d'entrée d'huile  $T_e = 135^\circ\text{C}$  est :

$$\eta = \left( \frac{2.29 \times 10^7}{2.86 \times 10^7} \right) \times 100 \rightarrow \boxed{\eta = 80.07\%}$$

### III.2.2.4 Effet de la température d'entrée d'huile et de son débit volumique sur le rendement du four

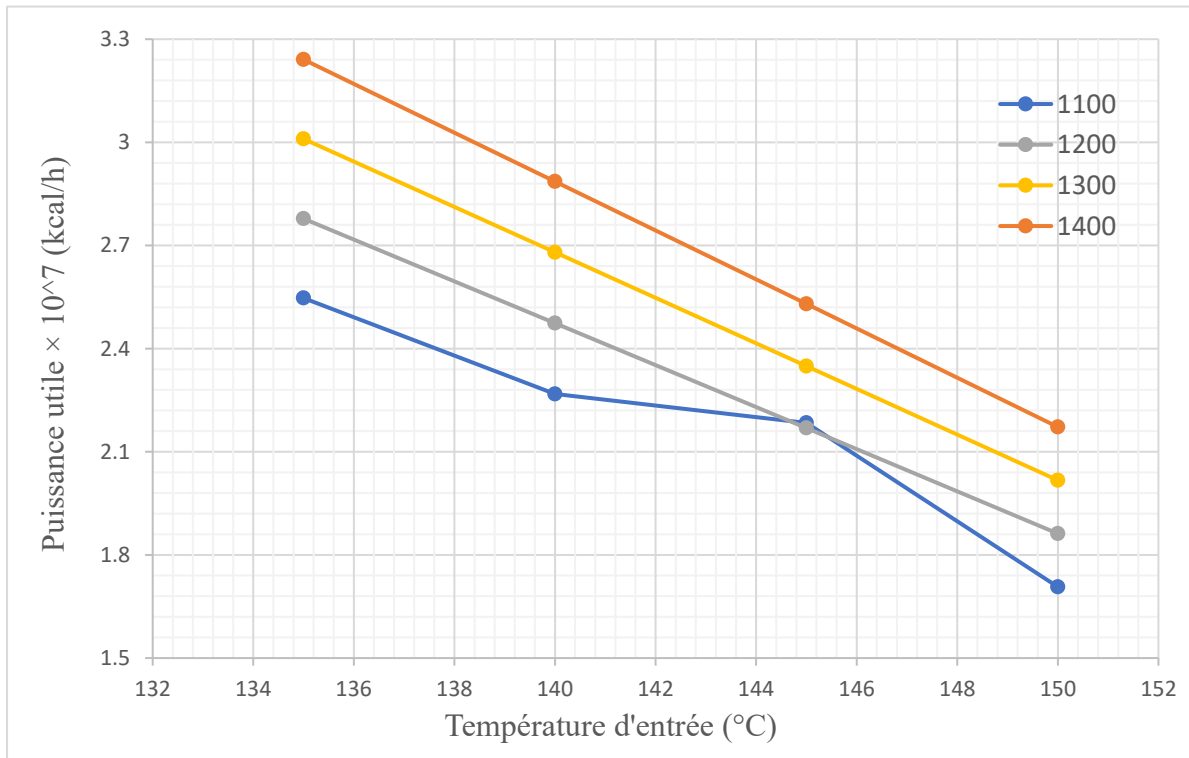
On a repris le même calcul que précédemment pour différentes températures d'entrée d'huile et différents débits volumiques.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau (III.4).

**Tableau III. 4:** Variation du rendement thermique en fonction du débit volumique et de la température d'entrée

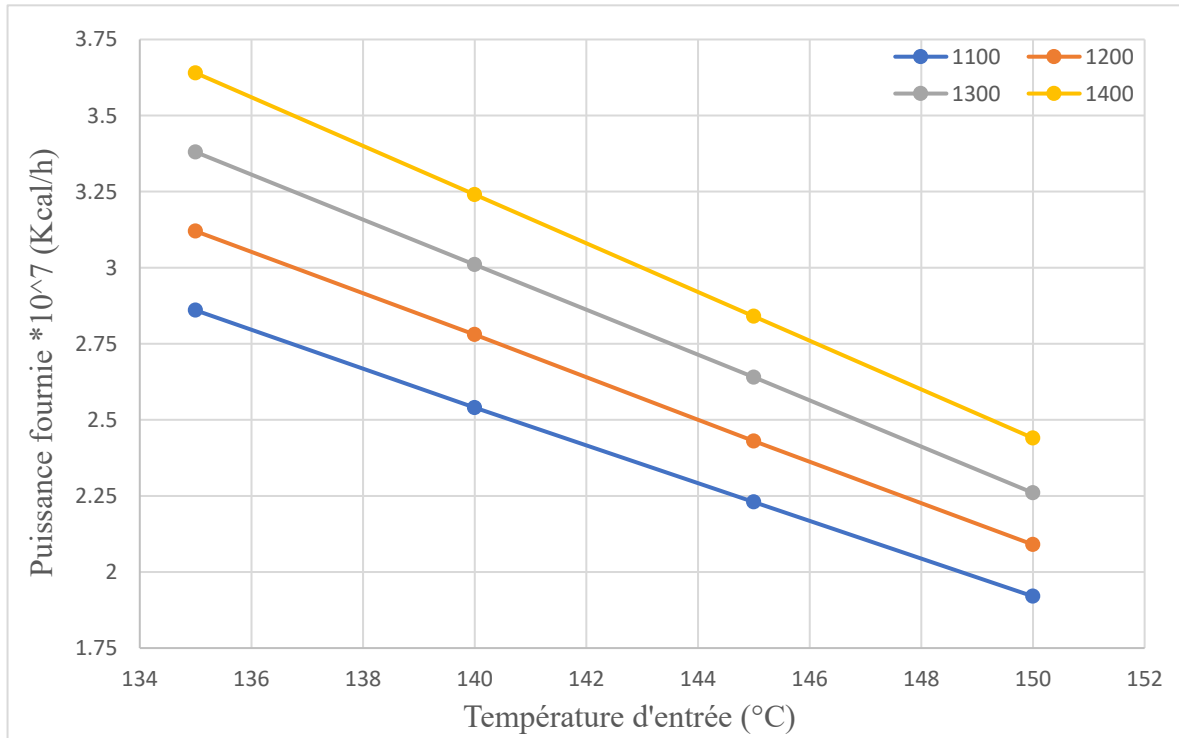
Température d'entrée de l'huile (°C)	$\dot{V} = 1100 \text{ m}^3/\text{h}$			$\dot{V} = 1200 \text{ m}^3/\text{h}$		
	$\dot{Q}_{utile}$ (kcal/h)	$\dot{Q}_{fournie}$ (kcal/h)	$\eta$ (%)	$\dot{Q}_{utile}$ (kcal/h)	$\dot{Q}_{fournie}$ (kcal/h)	$\eta$ (%)
135	$2.29 \times 10^7$	$2.86 \times 10^7$	80.07	$2.50 \times 10^7$	$3.12 \times 10^7$	80.13
140	$1.99 \times 10^7$	$2.54 \times 10^7$	78.35	$2.17 \times 10^7$	$2.78 \times 10^7$	78.06
145	$1.74 \times 10^7$	$2.23 \times 10^7$	78.03	$1.90 \times 10^7$	$2.43 \times 10^7$	78.19
150	$1.49 \times 10^7$	$1.92 \times 10^7$	77.60	$1.63 \times 10^7$	$2.09 \times 10^7$	78.00
Température d'entrée de l'huile (°C)	$\dot{V} = 1300 \text{ m}^3/\text{h}$			$\dot{V} = 1400 \text{ m}^3/\text{h}$		
	$\dot{Q}_{utile}$ (kcal/h)	$\dot{Q}_{fournie}$ (kcal/h)	$\eta$ (%)	$\dot{Q}_{utile}$ (kcal/h)	$\dot{Q}_{fournie}$ (kcal/h)	$\eta$ (%)
135	$2.71 \times 10^7$	$3.38 \times 10^7$	80.18	$2.92 \times 10^7$	$3.64 \times 10^7$	80.22
140	$2.35 \times 10^7$	$3.01 \times 10^7$	78.07	$2.53 \times 10^7$	$3.24 \times 10^7$	78.09
145	$2.06 \times 10^7$	$2.64 \times 10^7$	78.03	$2.22 \times 10^7$	$2.84 \times 10^7$	78.17
150	$1.76 \times 10^7$	$2.26 \times 10^7$	77.88	$1.90 \times 10^7$	$2.44 \times 10^7$	77.87

Les résultats du tableau (III.4) sont représentés graphiquement sur les figures (III.3) et (III.4).



**Figure III. 3:** Effet de la Température d'entrée sur la puissance utile pour chaque débit

Ce graphique montre que la puissance utile diminue avec l'augmentation de la température d'entrée, pour tous les débits (1100 à 1400 m<sup>3</sup>/h). Cela indique que lorsque le fluide entre plus chaud, il capte moins de chaleur utile dans le système. À débit constant, une température d'entrée plus élevée réduit le gradient thermique, ce qui diminue le transfert de chaleur utile. Par ailleurs, à température d'entrée fixe, plus le débit est élevé, plus la puissance utile est grande, ce qui est cohérent car un plus grand volume transporte plus d'énergie.



**Figure III. 4:** Effet de la Température d'entrée sur la puissance fournie pour chaque débit

Ce graphique montre aussi une diminution de la puissance fournie avec l'augmentation de la température d'entrée. Cela signifie que le four ou l'équipement chauffe moins intensément lorsque le fluide entre plus chaud. Cependant, les écarts entre les courbes sont plus réguliers et parallèles comparé au graphique de la puissance utile, ce qui montre une baisse linéaire plus stable. Encore une fois, à température constante, les puissances fournies augmentent avec le débit, car un débit plus élevé nécessite plus d'énergie pour être chauffé.

### III.2.2.5 Calcul du rendement par simulation

L'objectif de cette simulation est de déterminer le rendement thermique du four à partir des valeurs de Heat Flow (débit thermique) affichées dans le WorkSheet de simulation par Aspen HYSYS donnée dans la figure (III.2). Un petit calcul supplémentaire est nécessaire pour déterminer la puissance utile et le rendement.

➤ **Calcul de la puissance utile :**

La puissance utile correspond à la variation du Heat Flow du fluide à chauffer entre l'entrée et la sortie du four :

$$\dot{Q}_{utile} = |\dot{H}_{sortie} - \dot{H}_{entrée}| \dots \dots \dots (III.7)$$

$$\dot{H}_{sortie} : \text{Enthalpie du fluide sortant} = 4.6996 \times 10^8 \text{ kcal/h}$$

$$\dot{H}_{entrée} : \text{Enthalpie du fluide entrant} = 4.9168 \times 10^8 \text{ kcal/h}$$

$$\boxed{\dot{Q}_{utile} = 2.172 \times 10^7 \text{ kcal/h}}$$

➤ **Calcul du rendement :**

La puissance fournie  $\dot{Q}_{fournie}$  est déjà calculée analytiquement, on obtient :

$$\eta = \left( \frac{2.547 \times 10^7}{2.86 \times 10^7} \right) \times 100 = \boxed{89.06\%}$$

Interprétation comparative entre analytique et HYSYS

Le rendement calculé analytiquement atteint un maximum de 80,22 %, tandis que celui obtenu par HYSYS varie autour de 89 %. Cette divergence s'explique principalement par la simplification des hypothèses utilisées dans la méthode analytique, telles que l'interpolation manuelle des Cp, l'utilisation de valeurs moyennes, ou encore l'absence de certaines pertes thermiques. À l'inverse, Aspen HYSYS permet une modélisation plus fidèle du procédé, en intégrant les bilans thermodynamiques, les propriétés exactes des fluides et les conditions opératoires réelles. Ainsi, bien que le calcul analytique soit utile pour une estimation rapide, la simulation HYSYS s'avère plus précise et représentative du comportement industriel du four.

La simulation nous a également permis de voir l'effet de la température d'entrée et le débit volumique de l'huile sur respectivement la puissance utile, la puissance fournie et le rendement.

Le tableau (III.5) résume les résultats obtenus.

**Tableau III. 5:** Résultats de la simulation par Aspen HYSYS

Débit volumique "TORADA-TC" ( $m^3/h$ )	1100				1200			
	135	140	145	150	135	140	145	150
Température d'entrée ( $^{\circ}C$ )	135	140	145	150	135	140	145	150
Puissance utile ( $kcal/h$ ) $\times 10^7$	2.547	2.268	2.184	1.707	2.778	2.474	2.169	1.862
Puissance fournie ( $kcal/h$ ) $\times 10^7$	2.86	2.54	2.23	1.92	3.12	2.78	2.43	2.09
Rendement du four (%)	89.06	89.29	89.15	88.91	89.04	88.92	89.26	89.09
Débit volumique "TORADA-TC" ( $m^3/h$ )	1300				1400			
	135	140	145	150	135	140	145	150
Température d'entrée ( $^{\circ}C$ )	135	140	145	150	135	140	145	150
Puissance utile ( $kcal/h$ ) $\times 10^7$	3.01	2.68	2.349	2.017	3.241	2.886	2.53	2.172
Puissance fournie ( $kcal/h$ ) $\times 10^7$	3.38	3.01	2.64	2.26	3.64	3.24	2.84	2.44
Rendement du four (%)	89.03	89.03	88.90	89.25	89.04	89.07	89.08	89.02

**Interprétation :**

Ce tableau permet de comprendre comment le four réagit quand on change deux paramètres : le débit volumique (la quantité de gaz qui circule) et la température d'entrée. On remarque que plus on augmente le débit, plus le four doit fournir d'énergie pour chauffer tout ce volume. À l'inverse, si l'huile arrive déjà chaud, le four a moins d'effort à fournir, donc il consomme moins d'énergie.

Le rendement nous indique si le four utilise bien l'énergie qu'il reçoit. Dans presque tous les cas, il est entre [88% - 89%], ce qui montre un bon fonctionnement.

### III.3 Simulation par Aspen EDR

L'utilisation du logiciel Aspen EDR s'impose pour analyser plus en détail les performances thermiques du four. Contrairement à HYSYS, qui simule l'ensemble du procédé, EDR permet de modéliser précisément les zones de radiation et de convection, tout en tenant compte des pertes thermiques, des rendements locaux et des contraintes de conception. Cet outil est donc indispensable pour évaluer le rendement réel du four en conditions industrielles.

#### III.3.1 Etapes de la simulation par EDR

1. Cette étape consiste à introduire les données à partir du DataSheet du Four fourni par le design.

**Process Data :**

Process Data Fired Heater			Stream 1	Stream 2
<input checked="" type="checkbox"/> Streams <input checked="" type="checkbox"/> Flue Gas <input checked="" type="checkbox"/> Injected Steam				
Stream name			HUILE TORADA	GN rechaufage
Total mass flow	kg/h		1102500	2000
Inlet temperature	°C		155	25
Outlet temperature	°C		180	280
Inlet vapor mass fraction			0	0
Outlet vapor mass fraction			0	0
Pressure drop calculation option			Predict outlet pressure	Predict outlet pressure
Inlet pressure (abs)	MPa		0,52	0,35
Outlet pressure (abs)	MPa		0,25	0,32
Estimated pressure loss	MPa		0,27	0,03
Minimum pressure	MPa		0,01	0,01
Heat load	kW			
Fouling resistance	m <sup>2</sup> -K/W		0,00017	0,00017

**Composition gaz de combustion (GN + C2 du DC2) :**

Fuel Fired Heater				
<input checked="" type="checkbox"/> Fuel <input checked="" type="checkbox"/> Gaseous Fuel <input checked="" type="checkbox"/> CHONS Fuel				
	Fuel 1	Fuel 2	Fuel 3	Fuel 4
Fuel name	gaz de combusti	C2 DE DC2	GN UTILITE	
Fuel type identifier	<i>gaseous</i>	<i>gaseous</i>	<i>gaseous</i>	
Mass / molar composition	<i>Weight flowrat</i>	<i>Weight flowrat</i>	<i>Weight flowrat</i>	
Methane	0,6924	0,246	0,83	
Ethane	0,1921	0,585	0,071	
Propane	0,057	0,169	0,01	
Butanes	0,01	0	0	
Pentanes	0,0027	0	0	
Hexanes	0,0018	0	0,0018	
Cyclohexane	0	0	0	
Benzene	0	0	0	
Ethene	0	0	0	
Propene	0	0	0	
Butenes	0	0	0	
Pentenes	0	0	0,027	
Butadienes	0	0	0	
Acetylene	0	0	0	
Hydrogen	0	0	0	
Hydrogen sulphide	0	0	0	
Oxygen	0	0	0	
Nitrogen	0,058	0	0	
Argon	0	0	0	
Water vapor	0,005	0	0,005	
Carbon monoxide	0	0	0	
Carbon dioxide	0,0021	0	0,0021	
Sulphur dioxide	0	0	0	

**Propriétés physiques d'huile TORADA (Stream 1) :**

		1	2	3	4
Temperature	°C	129	180		
Liquid density	kg/m <sup>3</sup>	802	770		
Liquid specific heat	kcal/(kg-C)	0,55	0,59		
Liquid viscosity	mPa-s	2,6	1,3		
Liquid thermal cond.	kcal/(h-m-C)	0,108	0,104		
Liquid surface tension	N/m				
Liquid molecular weight		390	390		
Specific enthalpy	kJ/kg				
Vapor mass fraction					
Vapor density	kg/m <sup>3</sup>				

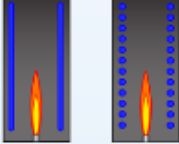
**FireBox :**

Firebox  
Fired Heater
+

✓ Layout
✓ Main Tube Rows
✓ Roof Tube Rows
✓ Tube Details
✓ Gas Offtake
✓ Firebox Diagram

Fired heater type twin box ▼

Tube row layout refractory backed ▼



**Firebox Dimensions**

Height 8300 mm ▼

Length 18950 mm ▼

Width 3880 mm ▼

Inner diameter  mm ▼

Number of cells in multi-cell firebox

Elevation of floor of firebox  mm ▼

Elevation of top of firebox  mm ▼

**Burner Details**

Burner location bottom ▼

Type of burner natural draught, low NOX (API) ▼

Number of burners 30

Burner diameter 100 mm ▼

## 2. Résultats obtenus par le modèle de simulation :

Après l'introduction dans l'environnement de la simulation les données du Datasheet de design du four existant (T100) nous avons obtenu les résultats suivants :

Recap of Designs × Fired Heater +		
Recap of Design		
Current selected case		A
		A
Stream1 flowrate	kg/h	945000
Stream1 temperature in	°C	150
Overall efficiency (%)	-	91,99
Firebox efficiency (%)	-	73,51
Convection section efficiency % (LCV)	-	18,48
Firebox process stream inlet temperature	°C	156
Firebox process stream outlet temperature	°C	180
Firebox process stream duty	kW	15169,7
Oxidant flowrate	kg/s	7,7844
Volumetric heat release	kW/m <sup>3</sup>	33,9
Firebox well-stirred gas temperature	°C	624
Bridgewall gas temperature	°C	500
Peak firebox tube outer wall temperature	°C	202
% Excess air		10
Bank3 draft loss (total)	Pa	-16,1
Bank3 stream flow dir		Countercurrent
Firebox process stream flowrate (inlet)	kg/s	262,5
Heat loss to flue	kW	5056,6
Firebox process stream pressure drop	bar	4,71466
Estimated draught loss	Pa	0
Heat transfer to main tubes	kW	12511,2

Cette étude a été réalisée pour quatre débits différents (1100, 1200, 1300 et 1400 m<sup>3</sup>/h) et quatre températures distinctes (135, 140, 145 et 150 °C), en tenant compte des conditions spécifiques du complexe.

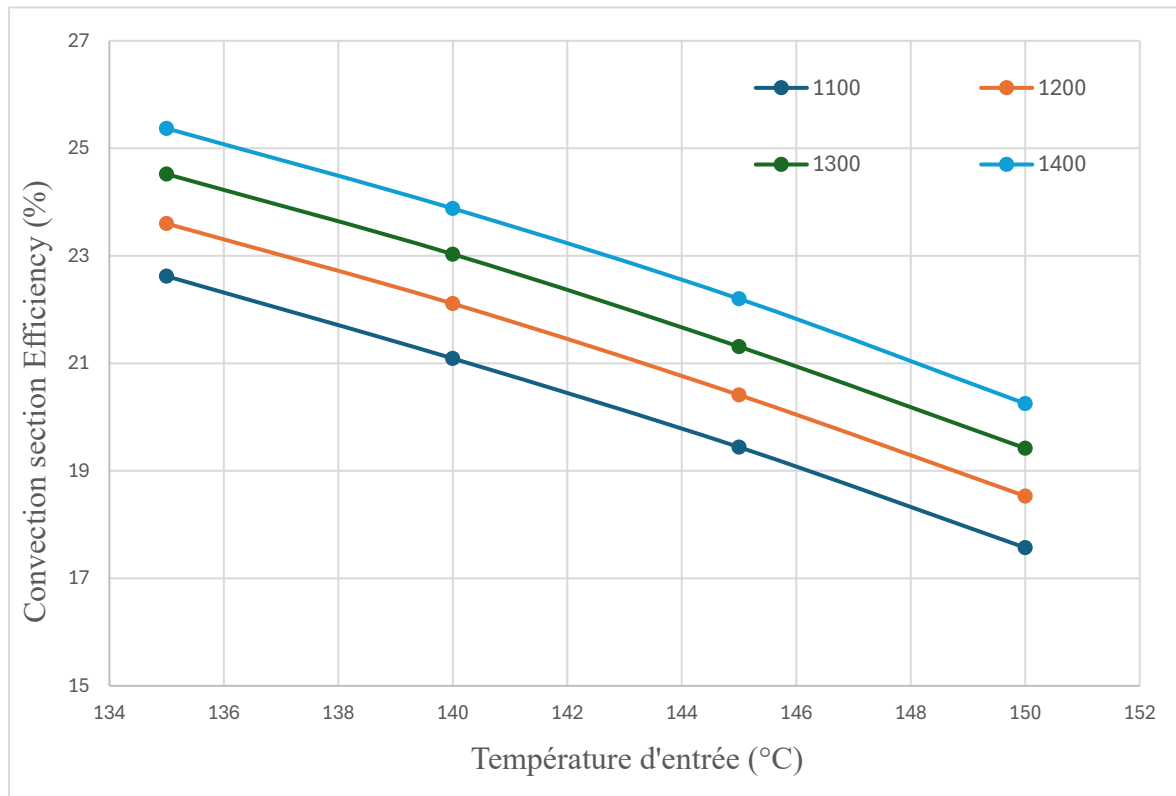
Les résultats obtenus par cette simulation sont représentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III. 6:** Résultats obtenus par Aspen EDR

	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>
<b>Overall efficiency (%)</b>	92,1	92,09	92,11	92,11	91,93	91,98	91,98	92
<b>Firebox efficiency (%)</b>	69,49	71	72,67	74,54	68,33	69,87	71,57	73,48
<b>Convection section efficiency (LCV) (%)</b>	22,62	21,09	19,44	17,57	23,6	22,11	20,41	18,53
<b>Température (°C)</b>	135	140	145	150	135	140	145	150
<b>Débit (m<sup>3</sup>/h)</b>	1100	1100	1100	1100	1200	1200	1200	1200
<b>Chaleur transférée au tubes (kW)</b>	16297,9	14796,6	13246,4	11645,2	17520,2	15912,9	14255,5	12541,2

	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>P</b>	<b>Q</b>	<b>R</b>	<b>S</b>
<b>Overall efficiency (%)</b>	91,76	91,84	91,85	91,9	91,59	91,69	91,77	91,79
<b>Firebox efficiency (%)</b>	67,25	68,81	70,54	72,48	66,23	67,81	69,57	71,54
<b>Convection section efficiency (LCV) (%)</b>	24,52	23,03	21,31	19,42	25,37	23,88	22,2	20,25
<b>Température (°C)</b>	135	140	145	150	135	140	145	150
<b>Débit (m<sup>3</sup>/h)</b>	1300	1300	1300	1300	1400	1400	1400	1400
<b>Chaleur transférée au tubes (kW)</b>	12539,2	17010,7	15248,2	13421,2	19893,6	18086,7	16220,5	14286,1

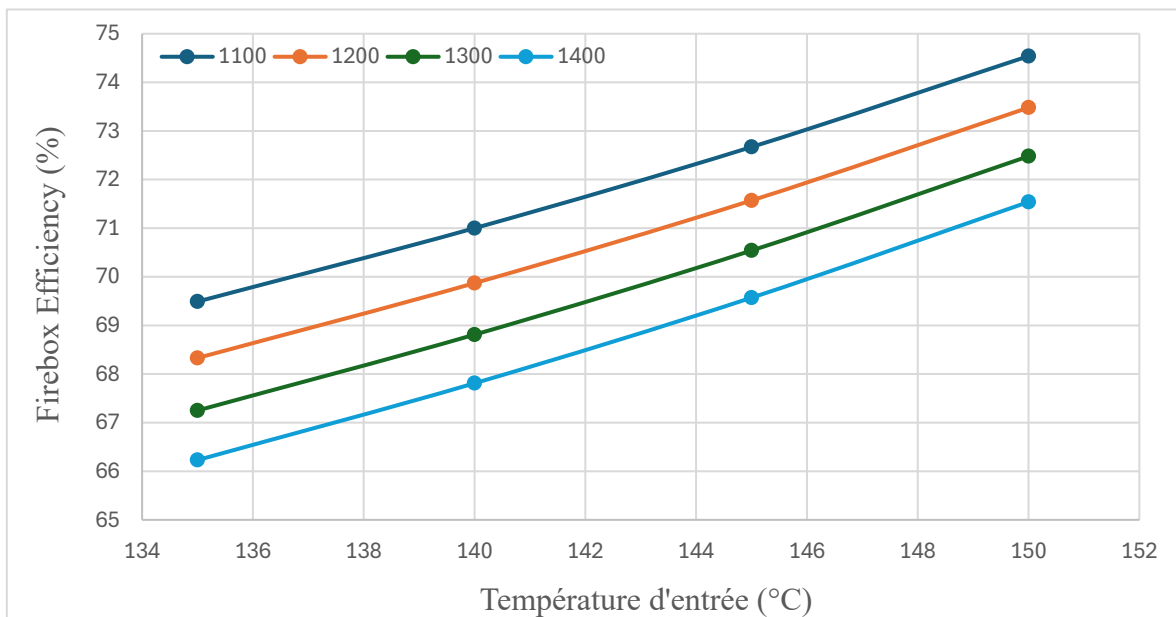
### III.3.2 Effet de la température d'entrée et le débit sur les rendements



**Figure III. 5:** Effet de la température d'entrée et le débit sur le rendement de la zone de convection

Ce graphe montre l'influence de la température d'entrée sur le rendement de la section de convection pour chaque débit :

- **Effet de la Température d'entrée** : Le rendement de la section de convection diminue significativement à mesure que la température d'entrée augmente. Ceci est un point clé : si plus de chaleur est transférée dans la zone de radiation, il reste moins d'énergie à récupérer par convection en aval. Cela peut aussi être dû à une réduction de la différence de température entre les gaz et le fluide dans la section de convection, rendant le transfert convectif moins efficace.
- **Effet du Débit** : Les débits volumiques plus élevés (1300 et 1400) affichent un rendement de convection supérieur pour une même température d'entrée. Cependant, tous les débits subissent la même tendance à la baisse avec l'augmentation de la température d'entrée.

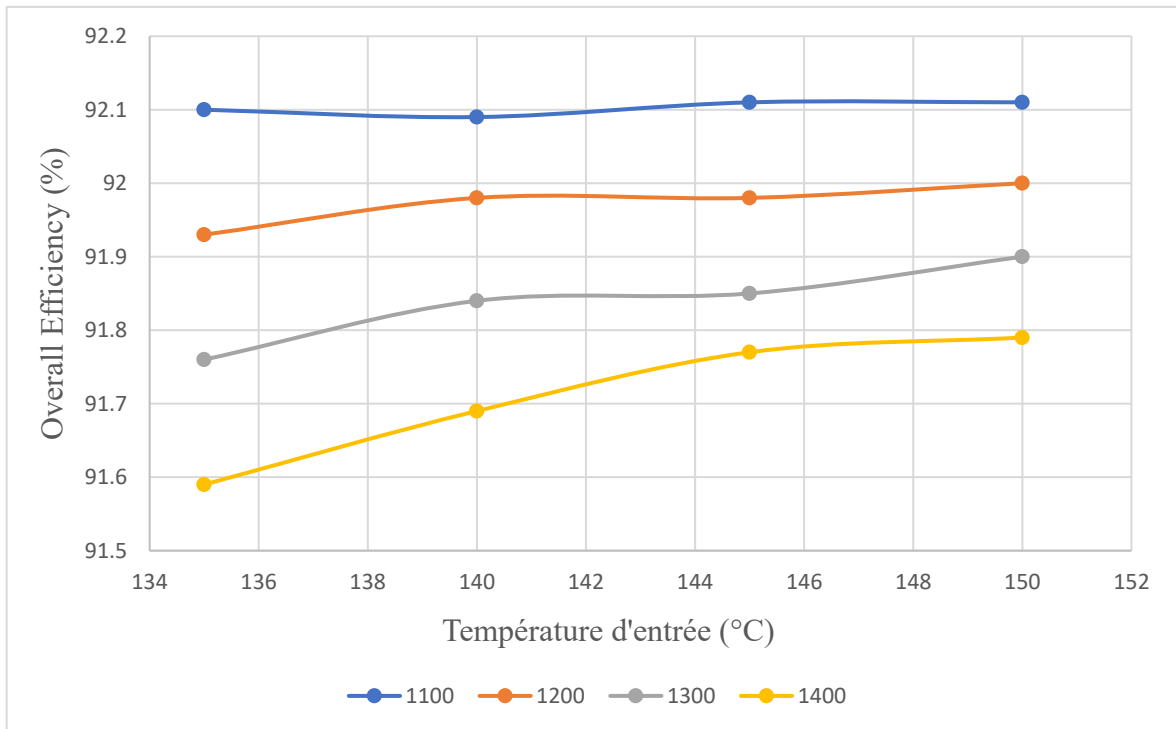


**Figure III. 6:** Effet de la température d'entrée et le débit sur le rendement de la zone de radiation

Ce graphe illustre l'évolution de la température d'entrée sur le rendement de la zone de radiation pour chaque débit :

- **Effet de la Température d'entrée** : On observe une augmentation nette du rendement de la zone de radiation à mesure que la température d'entrée augmente. Cela est logique, car une température d'entrée plus élevée signifie souvent une meilleure capacité à absorber et transférer la chaleur par rayonnement dans la chambre de combustion (FireBox).

- Effet du Débit :** Pour une même température d'entrée, un débit volumique plus élevé (1300 et 1400) conduit à un rendement de radiation supérieur. Le débit de 1400 donne systématiquement le rendement le plus élevé, tandis que le débit de 1100 donne le plus bas. Cela suggère qu'un flux plus important de fluide permet une meilleure capture de l'énergie radiante, possiblement en augmentant la surface d'échange effective ou en améliorant le coefficient de transfert thermique global dans cette zone.



**Figure III. 7:** Effet de la température d'entrée et le débit sur le rendement global

Ce graphe présente l'impact de la température d'entrée et le débit sur le rendement global :

- Effet de la Température d'entrée :** Le rendement global est très élevé, oscillant autour de 91,6 % à 92,1 %. Il montre une légère tendance à augmenter ou à rester stable avec l'augmentation de la température d'entrée. La variation est minime, ce qui indique que le système est déjà très performant.
- Effet du Débit :** Encore une fois, les débits volumiques plus élevés (1300 et 1400) se traduisent par un rendement global légèrement supérieur. Le débit de 1400 atteint les performances les plus élevées. La différence entre les débits est faible, ce qui souligne la robustesse et l'efficacité intrinsèque du système, quel que soit le débit.

**Conclusion :**

Les calculs analytiques ont fourni une première estimation du rendement thermique en conditions réelles, basée sur les propriétés physiques du fluide caloporteur. Cette méthode a l'avantage d'être rapide et accessible, mais elle reste limitée par les hypothèses simplificatrices.

La simulation sous Aspen HYSYS a permis de modéliser le système avec plus de précision, en intégrant les bilans de matière et d'énergie du procédé. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec les calculs analytiques, tout en révélant une meilleure sensibilité aux variations des conditions opératoires.

L'utilisation d'Aspen EDR, quant à elle, a permis d'évaluer finement les performances thermiques des échangeurs liés au four. Ce logiciel a mis en évidence les pertes thermiques et les marges de sécurité, souvent invisibles dans les méthodes précédentes.

La comparaison montre que les résultats les plus proches de la réalité industrielle sont obtenus avec Aspen EDR, tandis que les méthodes analytiques restent utiles pour des estimations initiales.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude menée dans ce mémoire a permis d'évaluer et d'optimiser le rendement thermique du four au niveau du complexe GP1/Z en combinant trois approches complémentaires : le calcul analytique, la simulation sous Aspen HYSYS et la modélisation détaillée avec Aspen EDR.

Le **calcul analytique** a permis de déterminer un rendement maximal de **80,22 %**, basé sur des formules classiques et les propriétés thermiques de l'huile TORADA TC 32. Cette méthode, bien qu'approximative, constitue une base de référence rapide pour une première estimation.

La **simulation avec Aspen HYSYS** a permis une modélisation plus complète du procédé thermique, en intégrant les bilans matière et énergie, ainsi que les interactions réelles entre les courants. Les rendements obtenus dans ce cas ont atteint **en moyenne 89 %**, confirmant l'efficacité du four dans ses conditions de fonctionnement habituelles.

Enfin, l'approche par **Aspen EDR** a permis une analyse plus fine des performances thermiques en tenant compte des détails de conception du four. Les rendements globaux obtenus par EDR varient entre **91,59 % et 92,11 %**, en fonction des débits et températures d'entrée. Ce sont les résultats les plus proches de la réalité industrielle, car EDR prend en compte les rendements de chaque zone (radiation et convection), les pertes thermiques du four.

En conclusion, l'étude montre que l'**augmentation du débit d'huile** et une **réduction modérée de sa température d'entrée** permettent d'optimiser le rendement thermique tout en réduisant la consommation de gaz naturel. Cette démarche contribue à la fois à la **rentabilité énergétique** et à la **réduction de l'impact environnemental**, en offrant une meilleure gestion des ressources au sein du complexe GP1/Z.

## Références

---

- <sup>1</sup> Manuel Opérateur GP1/Z, Généralités sur le complexe.
- <sup>2</sup> Manuel Opérateur GP1/Z, Process
- <sup>3</sup> Manuel Opérateur GP1/Z, Section de séparation.
- <sup>4</sup> Dunod. Encyclopédie des Sciences Thermiques, "Transfert de chaleur et fluides caloporteurs". 2018.
- <sup>5</sup> Fiche Technique TORADA TC 32, Fournisseur spécialisé en fluides thermiques. 2023.
- <sup>6</sup> Guide d'application des fluides thermiques, Société d'Ingénierie Thermique Industrielle. 2022.
- <sup>7</sup> WAUQUIER, Jean-Pierre. Raffinage du pétrole TOME II (Procédés de séparation), Edition TECHNIP 1998.
- <sup>8</sup> ZdeněkJegla, JiříVondál, JiříHájek. Standards for fired heater design: An assessment based on computational modelling, ScienceDirect, Volume 89, Pages 1068-1078. 5 October 2015. Vol. Volume 89.
- <sup>9</sup> Données du département technique du complexe GP1/Z.
- <sup>10</sup> Données du département technique du complexe GP1/Z.
- <sup>11</sup> Données du département technique du complexe GP1/Z.