

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Option : Génie Chimique

Intitulé du mémoire

**Etude paramétrique et optimisation
multicritère d'un four industriel de
l'unité CPF de traitement de gaz
naturel de Rhourde Nouss-Algérie**

Présenté par :

- **BENSALEM** Mohammed Amine
- **BENAISSA** Asma

Encadré par :

Pr D. TOUIL

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudee à notre cher professeur Monsieur D.TOUIL qui a encadré ce travail et nous a guidé tous au long de cette étude. Ses conseils avisés nous ont été d'un grand recours.

Nous adressons également nos remerciements respectueux à tout le personnel de la région de Rhourde Nouss avec qui nous avons travaillé durant la période de notre stage et particulièrement le personnel du service de corrosion, auprès duquel nous avons trouvé l'accueil chaleureux, l'aide et l'assistance dont on avait besoin.

On associe à ces remerciements Mlle. FERGANI Zineb pour son énorme et inestimable aide et de sa générosité.

Nos remerciements vont également aux membres de jurys qui ont bien voulu examiner et juger ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au parachèvement de ce projet de fin d'études, soit par leur savoir scientifique ou par leur amitié.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

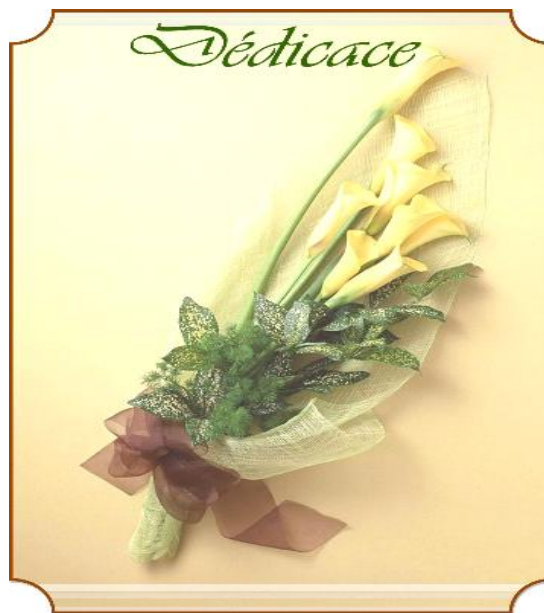
À celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère.

À mon père, école de mon enfance, l'exemple de ma vie qui a été mon ombre durant toutes les années des études et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

À mon frère et ma sœur, en témoignage de fraternité, avec mes souhaits de bonheur, de santé et de succès.

A mes amis et à toute ma famille.

À toute personne qui m'a aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.



BENAISSA Asma

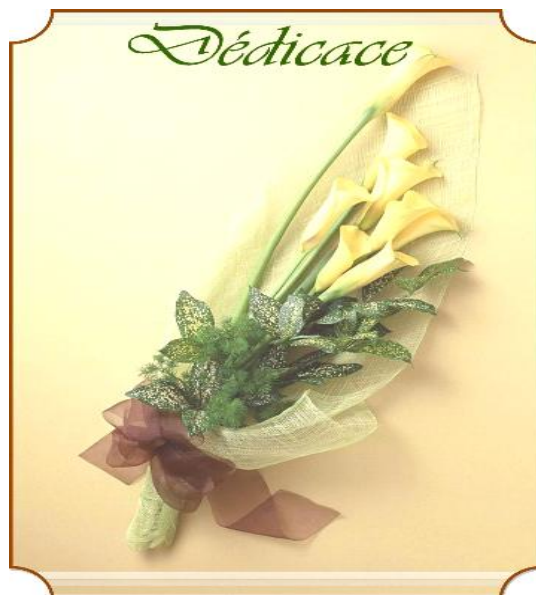
Dédicaces

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce travail de fin d'études à mes chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.

A tous les membres de ma famille

A mes amis HOUSSEM, TAYEB et ANISS, ABDESSALEM et MOUAD.

A mon professeur Mr. TOUIL et tous les autres enseignants du département de génie des procédés.



BENSALEM M. Amine

Résumé

La présente étude porte sur l'optimisation multicritère d'un four industriel de chauffage d'huile caloporteuse utilisé dans un procédé de décarbonatation du gaz naturel de la région de Rhourde Nouss en Algérie. Un modèle numérique complet a été développé à l'aide du logiciel Matlab à partir des bilans massiques, énergétiques et les cinétiques de formation des polluants issus de la combustion du fuel gas. Le modèle permet l'étude paramétrique pour évaluer l'effet de différents paramètres de fonctionnement sur les performances du four étudié. Ensuite, le four a été optimisé en termes énergétique, économique et environnemental afin de déterminer les paramètres optimaux qui satisfont l'ensemble de ces critères. Dans un premier temps, chaque critère est optimisé séparément. Dans un second temps, les trois critères sont considérés simultanément durant l'optimisation.

Mots clés : optimisation multicritère, four industriel, huile caloporteuse, gaz naturel, performances, étude paramétrique.

Abstract

This study focuses on the multi-criteria optimization of an industrial fired-heater used for heating a heat-transfer oil used in an acid gas removal process for the Algerian natural gas in the Rhourde-Nouss region of Algeria. A complete numerical model was developed using the Matlab software from the masse and energy balances and the kinetics of formation of pollutants resulting from the combustion of fuel gas. The model allows parametric study to evaluate the effect of different operating parameters on the performance of the fired-heater under study. Then, the fired-heater has been optimized in terms of energy, economy and environment to determine the optimal parameters that meet all of these criteria. As a first step, each criterion is optimized separately. In a second step, all three criteria are considered simultaneously during optimization.

Keywords : multi-criteria optimization, fired-heater, heat-transfer oil, acid gas removal process, natural gas, performance, parametric study.

ملخص

تركز هذه الدراسة على التحسين المتعدد المعايير لفرن صناعي مستعمل لتسخين زيت نقل الحرارة المستعملة في عملية نزع الغاز الحمضي من الغاز الطبيعي الجزائري. تم تطوير نموذج رقمي باستخدام برنامج ماتلاب، حيث يسمح هذا النموذج بتقييم الفعالية الطاقوية، الاقتصادية والبيئية للفرن الصناعي. لقد قمنا باعتماد موازنة الكتلة، الطاقة وكذا حركية تكوين الملوثات لتطوير هذا النموذج الرقمي وبعد انتهاء عملية النمذجة الرقمية، قمنا بأجراء دراسة تحليلية لمعرفة تأثير معاملات التشغيل على أداء الفرن المدروس. بعد ذلك قمنا بتحسين الأنظمة من الناحية الطاقوية الاقتصادية والبيئية لتحديد معاملات التشغيل المثالية التي تحقق التسويات الممكنة بين هذه المعايير. في البداية، قمنا بتحسين كل معيار بشكل منفصل عن الآخر. بعد ذلك تم اعتبار المعايير الثلاثة معا.

الكلمات المفتاحية: التحسين المتعدد المعايير، فرن صناعي، الغاز الحمضي، زيت نقل الحرارة، دراسة تحليلية، الغاز الطبيعي.

APPENDICE A

LISTE DES SYMBOLES

A	Surface d'échange	m ²
A	Facteur pré-exponentiel	
A _{cp}	Surface "plan froid" des tubes	m ²
C	Concentration	mg/Nm ³
C _p	Capacité calorifique	KJ/kg.°C
e	Epaisseur	mm
E	Energie d'activation	Kcal/mol
F	Facteur d'échange de rayonnement	
F _{CO2}	Facteur d'émission de CO ₂	g de CO ₂ /tonne d'huile traitée
h	Coefficient de transfert convectif	W/m ² .°C
IE	Indicateur économique	DZD/tonne d'huile
K	Constante de vitesse	
L	Dimension caractéristique d'échange	m
ṁ	Débit massique	kg/h
n	Facteur d'air	
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	kJ/kg
Q _{pertes}	Pertes thermiques	W
Q	Taux de transfert de chaleur par convection	W
q _r	Densité de flux de chaleur par radiation	W/m ²
Q _r	Flux de transfert de chaleur par rayonnement	W
r	Vitesse de réaction	mol/m ³ .s
R	Résistance de transfert de chaleur	°C.m/W
R	Constante des gaz parfaits	J/mol K
T	Température	°C
U	Coefficient global de transfert de chaleur	W/m ² °C
V	Débit volumique	Nm ³ /h
Lettres Grecques		
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m ² .K ⁴

α	Facteur d'efficacité d'absorption	
λ	Conductivité thermique	W/m.°C
ε	Emissivité	
η	Rendement	%
τ_r	Temps de réaction	s
ρ	Masse volumique	kg/m ³

APPENDICE B

LISTE DES ABREVIATIONS

AGRU : Acid Gas Removal Unit

barg : Pression en bar dans les conditions standards

BP : Basse pression

BTX : Benzène, Toluène et Xylène

CPF : Central Processing Facility

COV : Composés organiques volatils

CSC : Centre de séparation et de compression

CTH : Centre de traitement d'huile

DZD : Dinar algérien

ESD : Emergency Shut Down

FCPRN : Fuzzy Cardinal Priority Ranking Normalized

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

HP : Haute pression

HT : Hors taxes

Nm³ : Normo mètre cube

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PCS : Pouvoir calorifique supérieur

PMO : Preventive Maintenance Optimization

ppm : Partie par million

ppmv : Partie par million en volume

PSO : Particle Swarm Optimization

QH : Quartzite de Hamra

Sm³ : Standard mètre cube

TRC : Activité Transport par Canalisations

WHRU : Waste Heat Recovery Unit

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
I. DESCRIPTION DE L'UNITE CPF DE TRAITEMENT DE GAZ NATUREL	
3	
I.1 Présentation de la région de Rhourde-Nouss	3
I.1.1 Situation Géographique	3
I.1.2 Historique	4
I.1.3 Les différents complexes de la région	4
I.1.4 Organisation de la région de Rhourde-Nouss.....	5
I.2 L'unité CPF	7
I.2.1 Données du procédé	8
I.2.2 Description du Procédé de l'unité CPF [8].....	9
I.3 Situation Energétique de l'Unité CPF.....	13
I.3.1 Usage de l'énergie dans l'unité CPF.....	13
I.3.2 Production de gaz de vente.....	13
I.3.3 Analyse de la consommation du Fuel gas	14
II. LE PROCEDE DU FOUR DE CHAUFFAGE D'HUILE : ANALYSES DES	
GAZ ET DONNEES OPERATOIRES	15
II.1 Les fours de l'industrie du pétrole et du gaz	15
II.1.1 Types de fours	15
II.1.2 Constitution et dispositions du four.....	16
II.2 Procédé de fonctionnement du four d'huile caloporteuse.....	17
II.2.1 Le four d'huile caloporteuse.....	17
II.2.2 Système de circulation d'huile	18
II.2.3 Conditions de design du four.....	19
II.2.4 Paramètres opératoires du design entrée-sortie de l'huile.....	20
II.2.5 Conditions de design de la combustion du fuel gas	20
II.3 Mesures et relevés des paramètres opératoires actuels du four.....	21
II.3.1 Températures d'air et des fumées de combustion	21
II.3.2 Températures d'huile caloporteuse entrée-sortie.....	22
II.3.3 Débits d'huile et du fuel gas	22
II.4 Analyse du fuel gas et des gaz de combustion à la sortie du four.....	23
II.4.1 Analyse du fuel gas	23

II.4.2	Analyse des gaz de combustion.....	24
II.4.3	Résultats d'analyse des gaz de combustion.....	25
III.	MODELISATION DES ASPECTS ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DU FOUR.....	29
III.1	Transfert thermique dans les zones du four	29
III.1.1	Zone de radiation.....	29
III.1.2	Zone de convection.....	31
III.2	Modélisation de l'Aspect Energétique	31
III.2.1	Bilans massiques	32
III.2.2	Bilans thermiques	33
III.3	Rendement Energétique du Four.....	35
III.4	Modélisation de l'aspect environnemental.....	36
III.4.1	Réaction de combustion	36
III.4.2	Polluants émis par les fours.....	37
III.4.3	Mécanismes et cinétiques de formation des polluants.....	38
III.4.4	Temps de séjour.....	42
III.5	Résolution du modèle.....	42
IV.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	44
IV.1	Etude paramétrique	44
IV.1.1	Variables opératoires	44
IV.1.2	Indicateurs des critères de performance	44
IV.1.3	Tests de sensibilité des Indicateurs de performance.....	45
IV.2	Optimisation des Indicateurs de Performance.....	52
IV.2.1	Contexte général de l'optimisation [27]	52
IV.2.2	Optimisation mono-objective des indicateurs de performance	54
	CONCLUSION GENERALE.....	58
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	63

LISTE DES FIGURES ET GRAPHIQUES

Figure I.1: Situation géographique de la région [7]	4
Figure I.2 : L'organigramme de la région	5
Figure I.3 : L'unité CPF	7
Figure I.4 : Schéma du Bloc CPF	8
Figure I.5: Unité de traitement de Gaz Rhourde Nous (CPF).....	12
Figure I.6: Réseau de distribution du fuel gas dans l'usine CPF	13
Figure I.7 : Evolution de la production de gaz de vente de l'unité CPF	14
Figure I.8 : Consommation annuelle du fuel gas par l'unité CPF	14
Figure II.1 : Fours types cabine (à gauche) et cylindrique (à droite) [12]	17
Figure II.2 : Le four d'huile caloporteuse	18
Figure II.3: Système de circulation d'huile caloporteuse	19
Figure II.4 : Températures d'air ambiant et des gaz de combustion en fonction du temps de relevé	21
Figure II.5 : Températures d'entrée et de sortie d'huile caloporteuse en fonction du temps de relevé	22
Figure II.6: Débits massiques du fuel gas et d'huile en fonction du temps de relevé	23
Figure II.7 : Point d'analyse des gaz des fumées	24
Figure II.8 : Appareil d'analyse des gaz de combustion	25
Figure II.9: Concentration de CO en fonction du temps d'analyse	26
Figure II.10: Concentration des imbrûlés CxHy en fonction du temps d'analyse	26
Figure II.11 : Concentration de NO ₂ en fonction du temps d'analyse	27
Figure II.12: Concentration de NO en fonction du temps d'analyse	27
Figure II.13: Concentration des NO _x en fonction du temps d'analyse	28
Figure II.14: Concentration de CO ₂ en fonction du temps d'analyse	28
Figure III.1 : Rayonnement d'une flamme	30
Figure III.2: Transfert thermique par convection	31
Figure III.3: Représentation du procédé du four d'huile caloporteuse	32
Figure III.4: Abaque de détermination de k _e [20]	35
Figure III.5: Organigramme de résolution du modèle	43
Figure IV.1: IE et η en fonction du débit massique \dot{m}_{FG}	46
Figure IV.2 : Concentrations des polluants en fonction de \dot{m}_{FG}	46
Figure IV.3 : IE et η en fonction du débit massique de l'air comburant	47

Figure IV.4 : Evolution des concentrations des polluants en fonction du débit massique de l'air comburant.....	47
Figure IV.5 : IE et η en fonction de la température de l'air ambiant.....	48
Figure IV.6 : Concentrations des polluants en fonction de la température ambiante	48
Figure IV.7 : IE et η en fonction de la température du fuel gas.....	49
Figure IV.8 : Concentrations des polluants en fonction de la température du fuel gas ..	49
Figure IV.9 : IE et η en fonction de la température de l'air comburant.....	50
Figure IV.10 : Concentrations des polluants en fonction de la température de l'air comburant	50
Figure IV.11 : IE et η en fonction du coefficient U4	51
Figure IV.12: Concentrations des polluants en fonction du coefficient U4	51
Figure IV.13 : Frontière de Pareto d'un problème d'optimisation bi-objectif.....	53
Figure IV.14 : Organigramme général de PSO.....	54
Figure IV.15 : Courbe de PSO pour l'optimisation de l'IE	55
Figure IV.16 : Courbe de PSO pour l'optimisation de FCO ₂	55
Figure IV.17 : Courbe de PSO pour le rendement du four	56
Figure IV.18 : Front de Pareto d'optimisation multicritère	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1: Conditions de design du four sans préchauffage intermédiaire.....	19
Tableau II.2 : Données opératoires entrée-sortie du design de l'huile	20
Tableau II.3 : Données du design de la combustion du fuel gas.....	20
Tableau II.4 : Analyse du fuel gas utilisé	23
Tableau IV.1 : Domaine de variation des paramètres opératoires pour l'optimisation monocritère	54
Tableau IV.2 : Valeurs des paramètres donnant les indicateurs optimaux.....	56
Tableau IV.3: Valeur optimale multicritère et paramètres opératoires correspondants	57

INTRODUCTION GENERALE

Le gaz naturel est à la fois une énergie fossile dont les ressources sont importantes et un carburant pour le transport et les applications industrielles. Quel que soit son champ d'application, cette ressource présente des avantages spécifiques qui en font une alternative stratégique [1]. Notons, que la production mondiale du gaz naturel a été estimée en 2013 à 9,3 Milliards de m³/jour [2].

La consommation énergétique mondiale est en progression continue. En 2009, l'Agence Internationale de l'Energie a estimé que la consommation énergétique totale était d'environ 508.10¹⁸ Joules. Plus de 80 % de cette consommation énergétique est attribuée aux énergies fossiles, dont 35 % en pétrole, 28 % en charbon et **23 % en gaz naturel** [3]. Cependant, le secteur de l'industrie est l'un des secteurs les plus énergivores, consommant environ 54 % d'énergie totale distribuée mondialement [4]. Face à cette situation, le secteur industriel doit prendre des mesures pour limiter la consommation énergétique, en améliorant régulièrement son rendement énergétique et en réduisant ses émissions de gaz à effet de serre.

Notons, que l'Algérie a ratifié la convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) en 1993 et a également signé le protocole de KYOTO en 2005 montrant ainsi sa volonté de contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique. Pour rappel, les travaux du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur l'évolution du climat) indiquent qu'il faudrait réduire d'ici 2050, les émissions mondiales de l'ensemble des gaz à effet de serre de 40 à 70 % par rapport au niveau de 2010, pour espérer atteindre une limite de réchauffement climatique « nettement en dessous » de 2 °C d'ici 2100 [2].

Tous les Fours des unités algériennes actuelles de traitement de gaz naturel ou de pétrole sont dotés de systèmes de combustion au fuel gas (gaz combustible). A sa fonction originale de traitement et de réchauffage est venue s'ajouter les caractéristiques principales de la combustion du gaz combustible qui sont l'inflammation et la combustion complète. Une approche réaliste de la conception des fours doit se baser sur le minimum de consommation d'énergie calorifique et le minimum de génération des effluents, en particulier les gaz à effet de serre (CO₂, NO_x et les imbrûlés). Pour résoudre les mesures d'optimisation énergéico-environnementale et économique ainsi nécessaires, il est indispensable de disposer d'une connaissance détaillée du processus de fonctionnement,

d'acquisition des paramètres opératoires reproductibles, elle peut être acquise à l'aide d'une modélisation des approches énergétique et environnementale du système.

Le four de chauffage d'huile caloporteuse de l'unité de traitement de gaz naturel CPF (Central Processing Facility) de Rhourde-Nouss (Wilaya d'Illizi) qui fait partie de Sonatrach est pris comme exemple de cas d'étude. Le modèle développé pour ce système sera validé par des analyses des produits de combustion et des mesures de température du fluide à la sortie du système.

Le manuscrit est scindé en quatre chapitres pouvant être décrits succinctement comme suit :

- Dans le premier chapitre, l'unité CPF où a eu lieu le stage d'études est présentée ainsi que les procédés de ses installations et équipements.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description du procédé de fonctionnement du four de chauffage d'huile ainsi qu'à l'analyse des gaz et des données opératoires.
- Le troisième chapitre est dédié à la modélisation des aspects énergétique et environnemental du four.
- Le dernier chapitre est consacré à l'étude paramétrique sur les performances énergétique, économique et environnementale du four ainsi qu'à son optimisation mono et multicritère.

Enfin, le travail s'achève par une conclusion exposant un rappel des principaux résultats obtenus et les perspectives envisagées.

Chapitre I

I. DESCRIPTION DE L'UNITE CPF DE TRAITEMENT DE GAZ NATUREL

L'Algérie occupe la 7^{ème} place dans le monde en matière de ressources prouvées en gaz naturel, la 5^{ème} en sa production et la 3^{ème} en son exportation juste après la Russie et le Canada. Compte tenu de ces chiffres, l'Algérie dispose d'un véritable potentiel énergétique. Sur le pourtour méditerranéen, l'Algérie est le premier producteur et exportateur de pétrole et de gaz naturel, fort de 50 % des réserves, de 48 % de production et d'un impressionnant taux relatif à l'exportation de gaz naturel fixé à 94 % [5].

A ce jour, le pétrole et le gaz naturel sont considérés comme des vecteurs de progrès socio-économiques, d'où l'importance particulière accordée à leur valorisation. Toutefois, le ratio Réserves/Production de chacune de ces ressources donne au gaz naturel une priorité supplémentaire qui est celle de la couverture à long terme des besoins énergétiques du pays.

Selon le programme du gouvernement algérien, la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG) prévoit une demande locale allant de 55 à 85,3 Gm³ à l'horizon 2040, soit une date très proche. Ceci pèse alors sur la capacité de l'Algérie à honorer ses engagements gaziers envers les pays clients.

A contrario, une part importante de cette énergie se perd sous forme de rejets thermiques, provoquant la diminution du rendement des procédés de traitement du gaz naturel et contribuant aux impacts néfastes sur l'environnement.

Le site SONATRACH situé dans la région de Rhourde-Nouss, illustre parfaitement cette situation. Il a fait l'objet d'une étude pratique qui a duré plus de deux mois. Il est présenté ci-dessous.

I.1 Présentation de la région de Rhourde-Nouss

I.1.1 Situation Géographique

La région de Rhourde-Nouss (Figure I.1) fait partie de la Willaya d'Illizi. Elle est éloignée des centres urbains et située : à 350 km au Sud/Sud-est de la ville de Ouargla, à 1200 km au Sud/Sud-est d'Alger et à 270 km au Sud/Sud-est de la ville de Hassi-Messaoud. Elle rejoint la RN03 reliant Ouargla à Illizi au moyen d'une route de 30 km. Son altitude moyenne est située à 275 mètres par rapport au niveau de la mer. Son climat est désertique

c'est à dire sec avec un très faible taux d'humidité, et possède une fréquence importante de vents de sable. Elle a un écart important de température passant de -5 °C en hiver à 55 °C en été.



Figure I.1: Situation géographique de la région [6]

I.1.2 Historique

La première découverte du gaz naturel à Rhourde-Nouss fut en 1956. Le premier puit RN1, a été foré en 1962. Il a pu mettre en évidence la présence de gaz naturel riche en condensât au niveau de plusieurs réservoirs. Après la découverte de l'huile sur le puit RN4, un centre de traitement d'huile CTH a été construit et mis en exploitation en 1966.

I.1.3 Les différents complexes de la région

La région de Rhourde-Nouss est à vocation principalement gazière. Elle est dotée de deux usines de traitement de gaz humide :

- La phase A : Traitement de 51 millions Sm^3/j pour récupérer le condensât ;
- La phase B : Traitement de 48,3 millions Sm^3/j pour récupérer le GPL et les traces du condensât ;
- Un centre de séparation et de compression (CSC) ;
- une nouvelle installation CPF de traitement de gaz acide.

I.1.4 Organisation de la région de Rhourde-Nouss

L'organigramme de la région de Rhourde-Nouss est donné par la Figure I.2 ci-dessous.

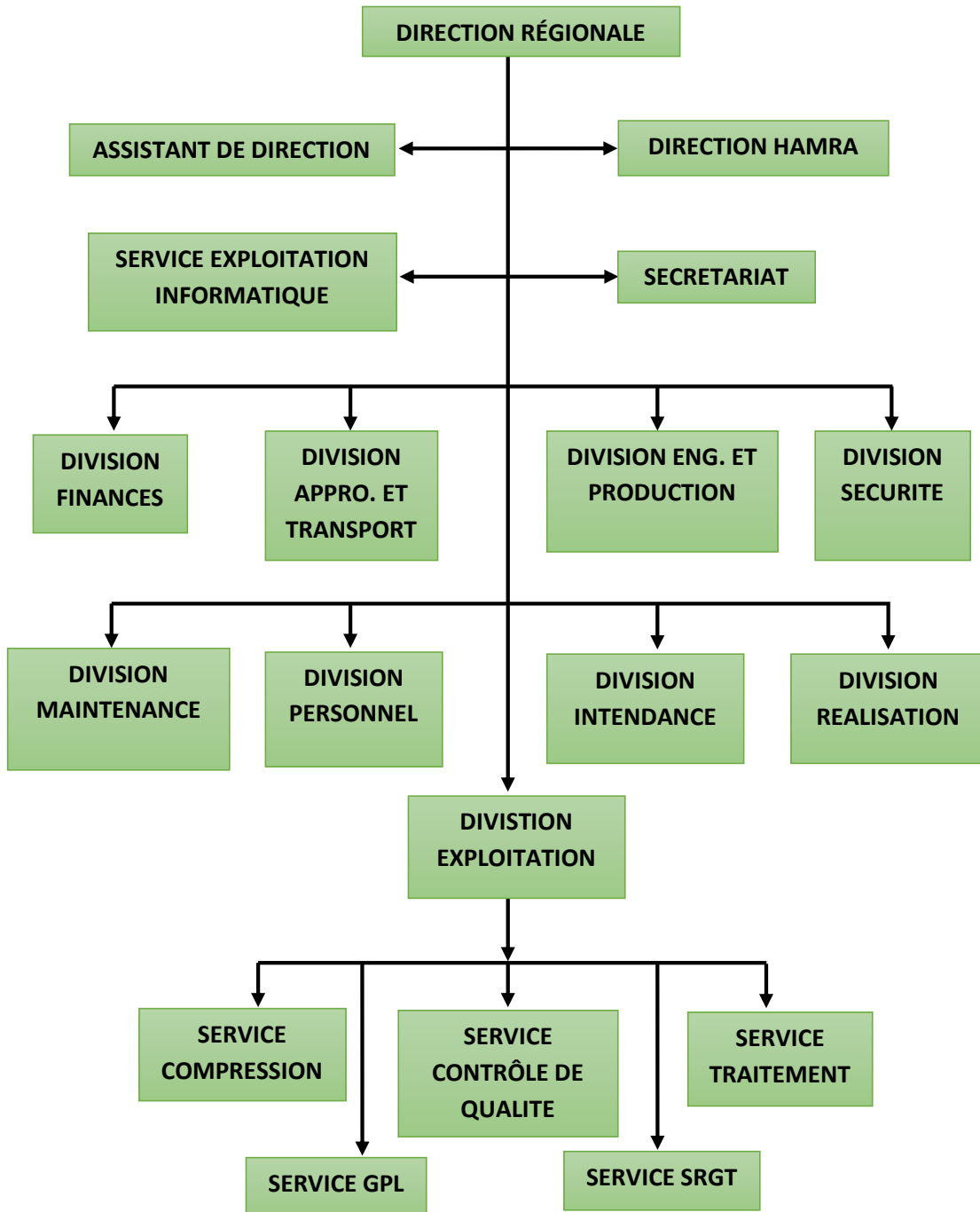


Figure I.2 : L'organigramme de la région

- **Phase A :**

Cette unité traite le gaz brut au niveau de cinq trains dont quatre sont identiques. Chacun comporte un ensemble d'équipements dans le but de réaliser la séparation et ainsi, récupérer le maximum de condensat (C_5^+) et assurer la compression du gaz sec (partie HP) pour l'envoyer à la phase B (Usine GPL). Dans cette dernière phase, il sera traité pour récupérer les C_1 et C_2 (gaz de vente) qui seront réinjectés à nouveau vers la phase A. Le condensat ainsi récupéré est alors envoyé vers le 5^{ème} train afin d'être traité dans une colonne de stabilisation. L'usine existante traite actuellement une charge de 46 millions Sm^3/j de gaz brut et une production de 2690 t/j de condensât.

- **Phase B (GPL) :**

Les installations de cette unité sont conçues pour récupérer le GPL contenu dans le gaz de la phase A. Le GPL récupéré est envoyé par un pipeline vers Haoudh-El Hamra (HEH) alors que le condensat récupéré est envoyé vers la phase A pour son traitement.

- **Centre de stabilisation et de compression (CSC) :**

Le centre de séparation et de compression (CSC) a pour but de séparer l'huile (brut), l'eau et le gaz provenant de 33 puits. Ils sont regroupés suivant leur niveau de pression pour séparer le condensat et le gaz. Ces derniers seront envoyés respectivement vers HEH et la phase A.

- **Central Processing Facility (CPF) :**

L'unité de traitement de gaz de Rhourde-Nouss CPF est conçue pour traiter 11 millions $Sm^3/jour$ de gaz (base sèche) provenant de 33 puits de production issus de quatre (4) champs de la région de Rhourde-Nouss. L'usine (Figure I.3) a une production nominale de 10 millions $Sm^3/jour$ produit du gaz résiduaire sec ayant un pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) compris entre 9800 et 9900 Kcal/ Sm^3 et un contenu de CO_2 inférieur à 2,0 % molaire. Le gaz d'exportation est envoyé vers le gazoduc GR4 du réseau de transport TRC.



Figure I.3 : L'unité CPF

I.2 L'unité CPF

L'unité CPF est subdivisée en plusieurs sections (voir figure I.4) :

- La séparation du mélange multiphasique à l'entrée de l'usine (Slug Catcher) ;
- Le traitement du gaz ;
- La compression et la déshydratation du CO₂ ;
- Le prétraitement du condensat instable ;
- Le traitement de l'eau produite (désuilage) ;
- Les utilités (système de gaz combustible, système d'huile caloporteuse, unité d'injection de produits chimiques, torches...) ;
- L'incinérateur des gaz acides (incinération des BTX ((Benzène, Toluène et Xylène) contenus dans le gaz acide).

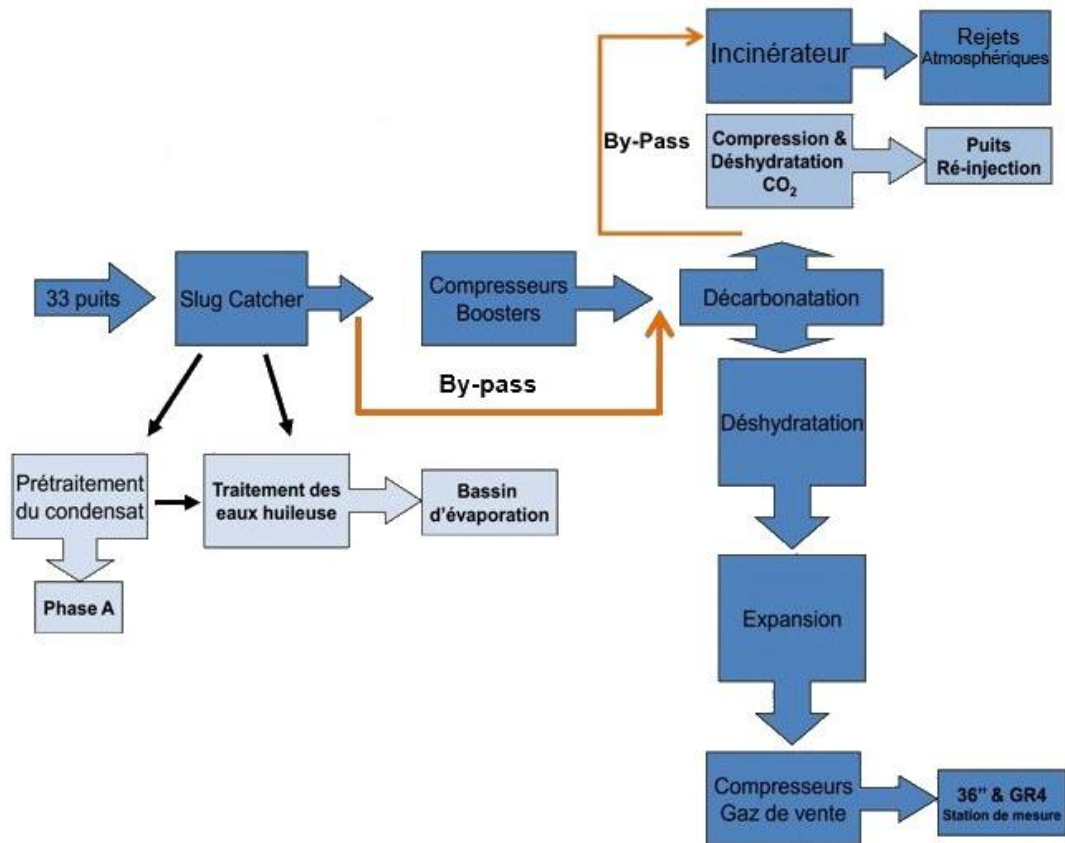


Figure I.4 : Schéma du Bloc CPF

I.2.1 Données du procédé

Les données présentées ci-dessous correspondent aux valeurs obtenues pour les quatre (4) champs de production. Il est ainsi considéré qu'il existe 658 mg/L de chlorures, il n'y a pas de composé sulfuré, pas de composé d'ammoniac ni d'autres contaminants identifiés. Toutefois, le gaz est supposé saturé en eau.

- Débit de conception entrée CPF 11 millions Sm³/jour de gaz (base sèche) ;
- Débit nominale d'opération entrée CPF 10 millions Sm³/jour de gaz (base sèche) ;
- Pression 40 barg ;
- Température 55 °C.

Les données du gaz de vente correspondantes au débit nominal d'opération sont les suivantes :

- Débit nominal d'opération 8,6 millions Sm³/jour ;
- Pression 96 barg, température 60 °C ;

- Poids moléculaire 18,9 g/mole ;
- Contenu en eau de gaz de vente <1,0 ppmv ;
- Point de rosée des hydrocarbures -9,3 °C à 96 barg.

Le condensat non stabilisé est envoyé à une installation présentée ci-après, conçues pour une alimentation de 3456 m³/jour, correspondant à 130 % du débit nominal d'opération.

- Débit nominal d'opération 108 m³/jour ;
- Pression 26,3 barg ;
- Température 51 °C.

I.2.2 Description du Procédé de l'unité CPF [7]

La description du procédé de l'unité CPF se présente comme suit :

- **Séparation du mélange multiphasique (Slug Catcher)**

Le Slug Catcher est consacré à la collecte des gaz humides, de condensat et d'eau de production provenant du réseau de collecte de gaz, qui raccorde les puits dans le champ de Rhourde-Nouss QH à la nouvelle usine CPF. Le réseau de collecte de gaz est conçu pour assurer une pression opérationnelle minimale de 40 barg au Slug Catcher. Le gaz du Slug Catcher est envoyé vers l'aspiration des compresseurs Booster par la vanne de contrôle de pression alors que le gaz excédentaire est relâché dans le réseau de la torche haute pression (HP) par la vanne de contrôle de pression.

- **Prétraitement du condensat non-stabilisé**

Le système de prétraitement du condensat non-stabilisé a pour objectif de recueillir et d'éliminer l'eau du condensat des hydrocarbures. Le condensat est aussi récupéré lors des diverses opérations de l'unité de traitement de séparation à basse température. Après le prétraitement, le condensat non-stabilisé présentera moins de 0,1 % en teneur d'eau et moins de 200 ppm de sels.

- **Compresseurs booster**

Le gaz humide séparé dans le Slug Catcher est envoyé dans le collecteur d'aspiration commun qui alimente les deux (2) compresseurs booster en parallèle, chacun conçu pour une capacité de 50 % (équivalent à 5 millions Sm³/jour pour la charge nominale au CPF). En exploitation normale avec (2) compresseurs booster en service, chaque train de

compresseurs est alimenté par un raccord provenant du collecteur d'aspiration commun vers les ballons d'aspiration respectifs. Le liquide séparé dans les ballons d'aspiration est envoyé vers le séparateur du condensat à l'entrée, sous un contrôle de niveau tout ou rien. Le gaz qui provient des ballons d'aspiration est acheminé vers les compresseurs booster avec un entraînement à turbine à gaz à régime variable. Il est comprimé de 39,5 à 85 barg, avec une augmentation de température de 55 °C à 126 °C. Des aérorefroidisseurs en aval de chaque compresseur booster réduisent la température de gaz de sortie à un point de consigne de 55 °C.

- **Décarbonatation du gaz d'alimentation AGRU (Acid Gas Removal Unit)**

Le but de l'unité de décarbonatation est de réduire la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) du gaz d'alimentation pour passer de 8,6 % molaire à la spécification finale de gaz d'exportation inférieur à 2 % molaire. L'unité AGRU est basée sur la technologie combinée d'absorption à contrecourant avec une solution d'amine, suivi par une étape de régénération dans laquelle le CO₂ est éliminé de la solution d'amine. Les gaz acides qui proviennent des compresseurs booster entrent dans le séparateur à l'entrée de l'unité de décarbonatation à une pression de 82 barg et à une température de 55 °C. Dans le séparateur, les liquides présents dans le courant du gaz sont séparés et envoyés sous contrôle de niveau dans le système de traitement des eaux huileuses.

- **Déshydratation du gaz**

L'unité de déshydratation du gaz utilise trois lits de tamis moléculaire à base de zéolite en parallèle pour enlever l'eau du gaz afin de rencontrer la spécification de 1 ppmv dans le produit. Les sécheurs suivent une séquence automatique de 24h durant laquelle ils alternent entre les cycles d'adsorption (8 + 8 heures) et de régénération (8 heures). Il y aura toujours deux sécheurs en adsorption pendant que le troisième se fait régénérer thermiquement.

- **Expansion et séparation du gaz**

Le gaz en provenance de l'unité de déshydratation est détendu au turbo-expandeur. Le turbo-expandeur (ou la vanne Joule Thomson) contrôle la pression en amont de la détente. La détente, aussi nommé expansion, permet de refroidir et de condenser la fraction lourde du gaz afin de rencontrer, en mode turbo-expandeur seulement, la spécification du pouvoir calorifique supérieur (PCS) du gaz de vente. Le condensat, quant à lui, est séparé dans le ballon d'aspiration du compresseur-expandeur et est dirigé sur contrôle de niveau

vers le séparateur du condensat à l'entrée. Le gaz épuré à la sortie de l'expandeur fournit la source de refroidissement à l'échangeur entrée turbo-expandeur et à l'échangeur entrée déshydratation avant d'être comprimé au compresseur-expandeur puis refroidi à 55°C par l'aérefroidisseur.

- **Compression et expédition du gaz de vente**

Le gaz sec décarbonaté qui provient de l'aérefroidisseur du compresseur-expandeur, à une pression de 66,5 barg et à une température de 55 °C, est envoyé dans un collecteur d'aspiration commun qui alimente 2 compresseurs parallèles de gaz de vente, chacun d'entre eux est conçu pour une capacité de 50 %. Les trains de gaz de vente comprennent des ballons d'aspiration, des compresseurs de gaz de vente avec entraînements de turbine à régime variable et des aérefroidisseurs. Afin de mélanger le gaz de vente du CPF avec le gaz provenant de l'usine GPL existante, le gaz est comprimé à 97 barg à une température de 60 °C.

- **Incinération**

Une unité d'incinération a été nouvellement conçue pour brûler les composés aromatiques, essentiellement les BTX présents dans le gaz qui provient de l'unité de décarbonatation. Le CO₂ est rejeté ensuite vers l'atmosphère directement.

Le schéma simplifié du procédé de l'unité CPF est donné en figure I.5 ci-dessous.

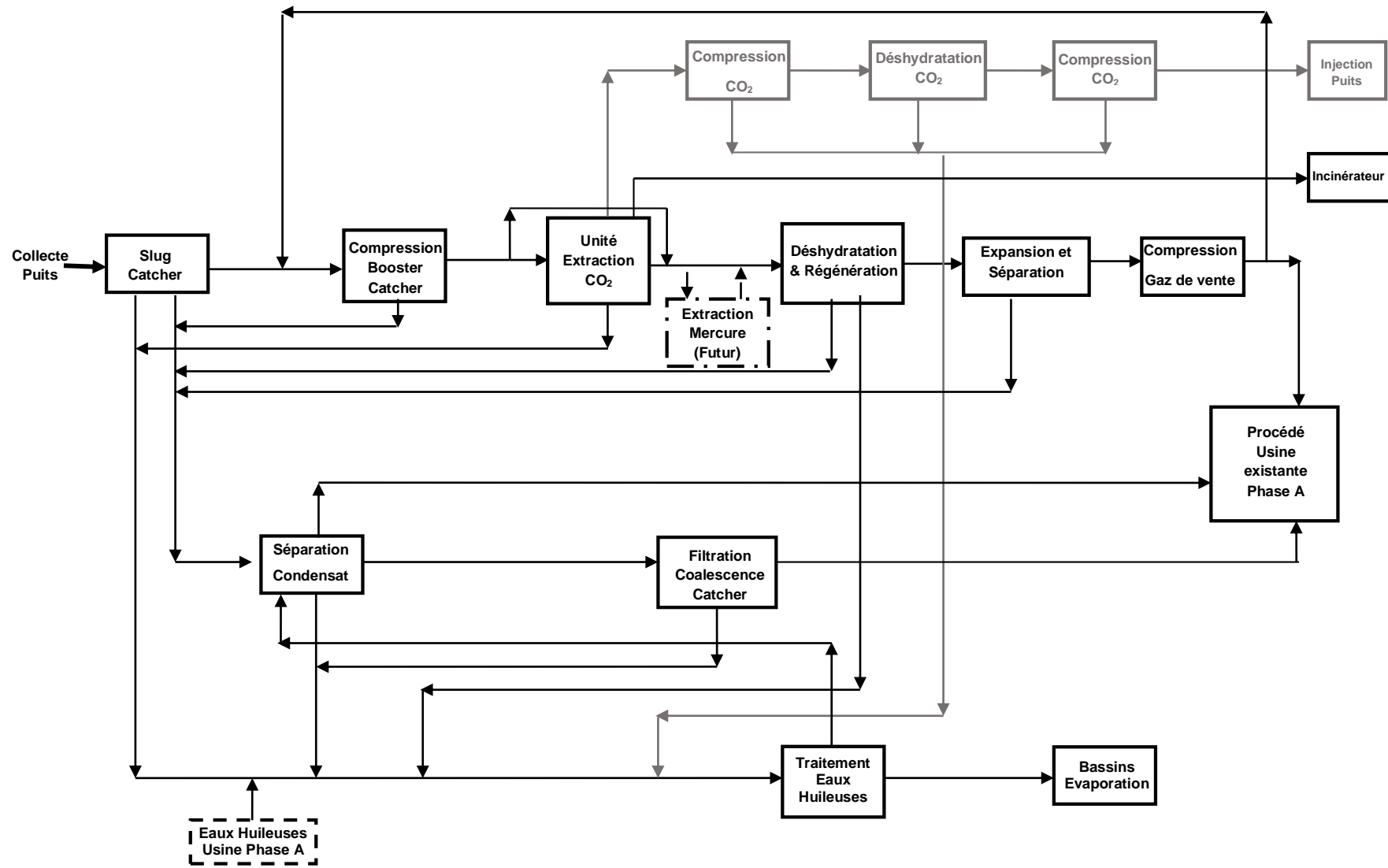


Figure I.5: Unité de traitement de Gaz Rhourde Nouss (CPF)

I.3 Situation Energétique de l'Unité CPF

I.3.1 Usage de l'énergie dans l'unité CPF

L'unité CPF est fournie en Fuel Gas par deux sources différentes : la source principale se trouve au refoulement du compresseur-expandeur, alors que la source alternative, gaz d'appoint et de démarrage, provient des installations existantes de GPL, à partir du pipeline de 36 pouces. Le système de gaz combustible fournit deux niveaux de pression pour assurer l'approvisionnement en gaz combustible des usagers haute pression (HP) et basse pression (BP). Le système de gaz combustible HP est dédié aux turbines à gaz des compresseurs booster, gaz de vente et CO₂ (voir Figure I.6 ci-dessous) [8]. Le système de gaz combustible BP alimente les brûleurs, les veilleuses des fours, et de l'incinérateur et des torches. Il est employé en tant que gaz tampon dans les ballons de torche, drainage fermé et séparateur des eaux huileuses et en tant que gaz de balayage des lignes de torche et de vide vite.

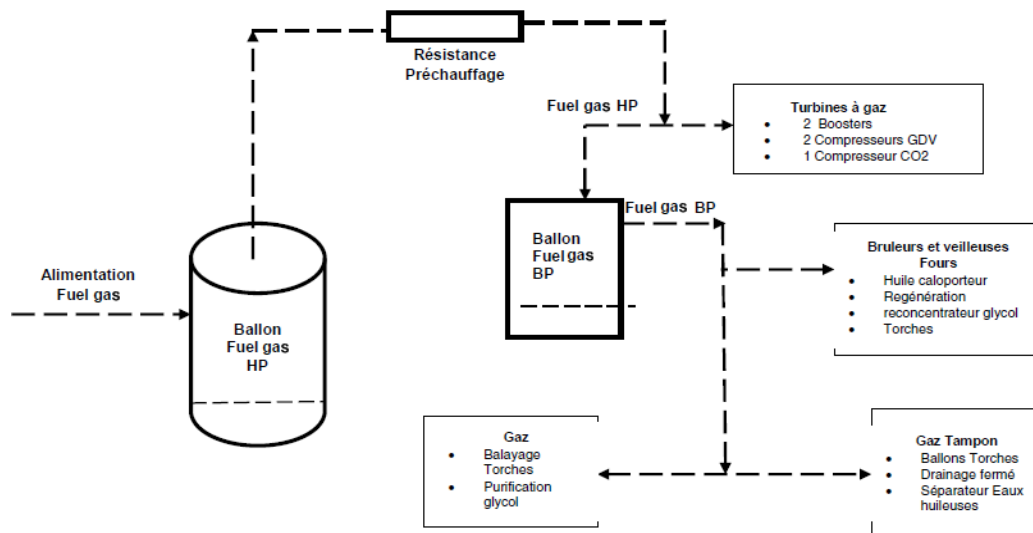


Figure I.6 : Réseau de distribution du fuel gas dans l'usine CPF

I.3.2 Production de gaz de vente

L'analyse des chiffres relatifs à la production de gaz de vente telle que communiqués par l'unité permet de représenter en figure I.7 ci-dessous, l'évolution de la production réelle durant la période (2015-2017). Cette représentation montre que durant cette période la production du gaz de vente ne cesse d'augmenter d'une année à une autre. Elle passe ainsi de 1539 en 2015 à 2300 en 2016 puis à 2500 millions Sm³ en 2017. Ceci représente en moyenne une capacité de production de **67 %** par rapport à celle nominale de 3139 millions Sm³.

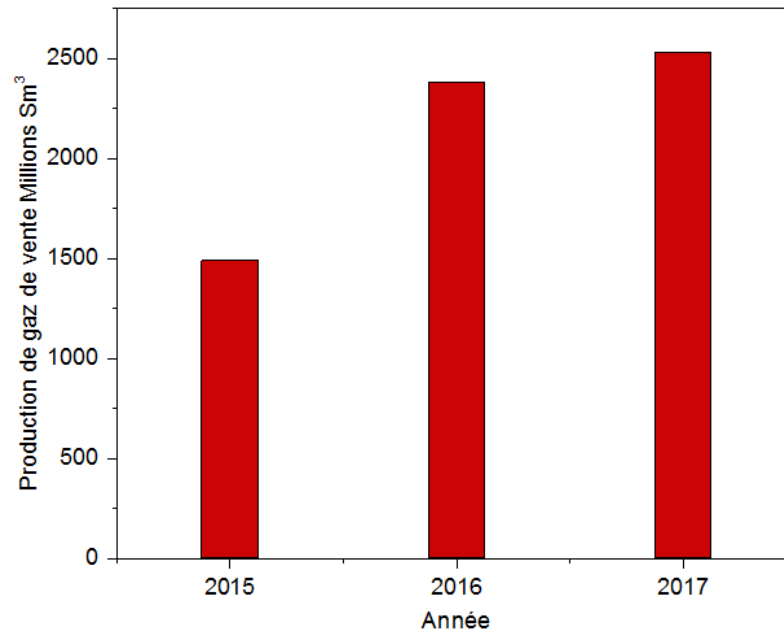


Figure I.7 : Evolution de la production de gaz de vente de l'unité CPF

I.3.3 Analyse de la consommation du Fuel gas

La figure I.8 présente l'évolution de la consommation moyenne annuelle du Fuel gas du procédé de traitement de gaz durant la période (2015-2017). On constate que l'évolution de la consommation du Fuel Gas suit la même tendance que celle de la production de gaz de vente. En 2017, elle atteint la plus grande consommation qui est de l'ordre de 70 millions de Sm³, ce qui correspond à une consommation spécifique de gaz combustible de **0.028 Sm³ fuel gas/Sm³ gaz de vente.**

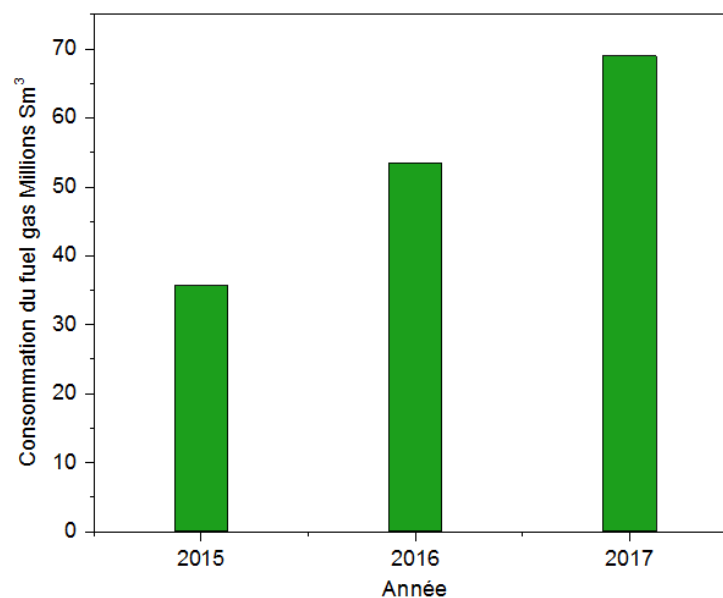


Figure I.8 : Consommation annuelle du fuel gas par l'unité CPF

Chapitre II

II. LE PROCÉDE DU FOUR DE CHAUFFAGE D'HUILE : ANALYSES DES GAZ ET DONNEES OPERATOIRES

Ce chapitre est consacré à la description du procédé de fonctionnement du four de chauffage d'huile caloporteuse de l'unité CPF, utilisée pour les rebouilleurs du régénérateur d'amine. Nous donnons également les paramètres opératoires de son fonctionnement, relevés sur site ainsi que les résultats d'analyse des gaz de combustion à la sortie du four.

II.1 Les fours de l'industrie du pétrole et du gaz

II.1.1 Types de fours

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 serpent 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 [10].

Les appareils de chauffage tubulaires ont été introduits au début dans l'industrie de pétrole et deux avantages ont été obtenus, à savoir, la réalisation d'opérations continues et la réduction de la formation des mousses. Ces appareils de chauffage sont largement utilisés pour le chauffage dans le raffinage du pétrole, les usines pétrochimiques et dans d'autres industries chimiques. Le calcul et la conception des appareils de chauffage au gaz dans les raffineries de pétrole en particulier restent parmi les applications les plus importantes du transfert de chaleur. La chaleur transmise au fluide chauffé peut servir :

- ❖ **A un simple réchauffage** : on élève la température du fluide traité afin de lui faire subir, ultérieurement, une transformation physique ou chimique (surchauffeur de vapeur, réchauffeur de gaz d'un reformeur catalytique, réchauffeur d'hydrocarbure liquide, etc.)

- ❖ **A une transformation chimique** : celle-ci peut s'effectuer par pyrolyse (fours de craquage à la vapeur, four de craquage d'acide acétique, etc.). Dans d'autres cas, la transformation s'effectue en présence de catalyseur (fabrication de gaz de synthèse à partir de gaz naturel ou de naphta ...). Dans le cas le plus courant, plusieurs opérations sont effectuées, simultanément ou successivement, dans le même four.

II.1.2 Constitution et dispositions du four

D'une façon générale, les fours comportent les parties principales suivantes :

- **Zone de radiation**, constituée essentiellement d'une chambre de combustion, dans laquelle des tubes sont disposés. Les tubes, non jointifs, sont reliés entre eux par des coudes. 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.
- **Zone de convection** : Afin de récupérer la chaleur sensible des fumées, ces dernières circulent à vitesse élevée à travers un faisceau de tubes, où l'échange s'effectue principalement par convection. Ces tubes peuvent être garnis d'ailettes ou d'aiguilles, afin d'augmenter la surface d'échange du côté des fumées.
- **Une cheminée d'évacuation des fumées** comportant un registre permettant de régler le tirage (et donc la température) du four.

On distingue aussi une quatrième section, appelée section de protection ou de choc, sépare les deux sections principales de chauffage. Elle contient des tubes proches de la section de rayonnement qui protègent les tubes de la section de convection restante du rayonnement direct.

Il existe de nombreuses dispositions des tubes, dans les zones de radiations et de convection, et d'une zone par rapport à l'autre. Il en résulte de nombreux types de fours présentés ci-dessous.

- a. **Les fours cylindriques verticaux** : 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. La surface d'échange couvre les parois verticales et, présente donc une symétrie circulaire par rapport au groupe de chauffage.

- b. Les fours à tubes verticaux (boîtes) :** 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.
- c. Les fours à tubes horizontaux (cabines) :** dans ces fours, la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède dont la plus grande longueur est horizontale. Les tubes sont placés horizontalement le long des parois latérales les plus longues. Les brûleurs sont situés sur la sole, ou sur la partie inférieure des murs latéraux les plus longs.

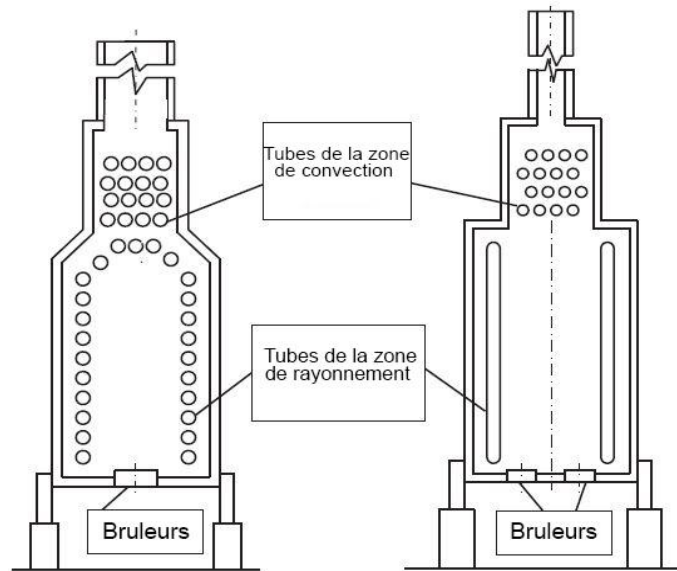


Figure II.1 : Fours types cabine (à gauche) et cylindrique (à droite) [11]

II.2 Procédé de fonctionnement du four d'huile caloporteuse

II.2.1 Le four d'huile caloporteuse

Le four d'huile est de type cylindrique vertical à 9 passes et à tirage naturel (voir figure II.2). Il a une section de convection à 12 rangées de tubes et une section radiante. Le four a une hauteur de 53.4 mètres. Un registre à la base de la cheminée permet l'ajustement du tirage du four. Le four d'huile caloporteuse chauffe l'huile à 177 °C. Le point de consigne pour la chauffe est donné par la température du régénérateur de l'AGRU. L'huile caloporteuse chaude est dirigée vers les rebouilleurs du régénérateur d'amine ou elle transfère son énergie à l'amine. L'huile caloporteuse refroidie à environ 141 °C est d'abord dirigée vers les unités de récupération de chaleur (Waste Heat Recovery Unit-WHRU) installées sur les turbines des compresseurs booster où elle se réchauffe à environ 167 °C puis retourne dans le ballon d'expansion d'huile caloporteuse avant d'être pompée vers le four. À la sortie du four, les 9 passes sont recombinaées dans

une conduite de 18 pouces avant d'être acheminées vers les rebouilleurs d'amine. Sur la conduite, il y a un clapet de non-retour pour empêcher un débit à rebours dans le four, un indicateur de pression, une soupape de sécurité réglée à 23.5 barg, un indicateur de température pour le contrôle des gaz vers les brûleurs et un indicateur de très haute température relié au système ESD pour arrêter le four.



Figure II.2 : Le four d'huile caloporteuse

II.2.2 Système de circulation d'huile

L'huile caloporteuse est de type Torada TC-32, manufacturé par une filiale de Sonatrach. Le système d'huile caloporteuse comprend principalement un système de stockage, un ballon d'expansion, des pompes de circulation, un four et des unités de récupération de chaleur (figure II.3). Lors des opérations normales, la chaleur proviendra principalement des unités de récupération de chaleur résiduelle (WHRU) installés sur chaque turbine des compresseurs booster dans une proportion de 70-73 % du besoin total, le restant de 27-30 % étant fourni par le four.

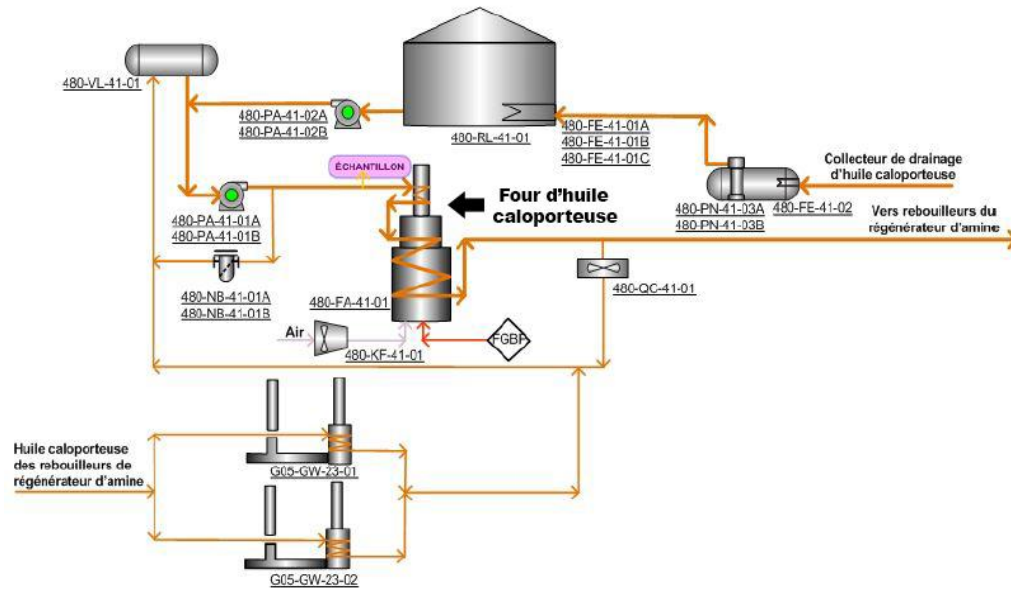


Figure II.3 : Système de circulation d'huile caloporteuse

II.2.3 Conditions de design du four

Le tableau II.1 suivant donne les conditions de design de fonctionnement du four de chauffage d'huile caloporteuse sans préchauffage intermédiaire par les unités de récupération de chaleur résiduelle des gaz de combustion de la turbine.

Tableau II.1: Conditions de design du four sans préchauffage intermédiaire

Paramètres	Unité	Zone de radiation	Zone de convection
Fluide		Torada TC-32	Torada TC-32
Chaleur absorbée	Gcal/h	17,932	12,057
Débit massique	kg/h	1460000	1460000
Perte de charge	bar	1,5	1,5
Densité de flux moyenne (radiation)	Kcal/h m ²	34,957	
Densité de flux maximale (radiation)	Kcal/h m ²	62,923	
Densité de flux (convection)	Kcal/h m ²		42,231

II.2.4 Paramètres opératoires du design entrée-sortie de l'huile

Les données opératoires du design de l'huile caloporteuse à l'entrée et à la sortie du four sont regroupées dans le tableau II.2 ci-dessous :

Tableau II.2 : Données opératoires entrée-sortie du design de l'huile

Paramètres	unité	Entrée	Sortie
Température	°C	141	177
Pression	bar(g)	5,5	4,3
Débit massique	kg/s	405,6	405,6
Densité du liquide	kg/m ³	798	775
Viscosité (liq/vap)		2,1	1,39
Chaleur spécifique	Kcal/kg °C	0,556	0,587
Conductivité thermique	Kcal/h m °C	0,114	0,114

II.2.5 Conditions de design de la combustion du fuel gas

Les données opératoires de design de la combustion de fuel gas du four d'huile caloporteuse sont données au tableau ci-dessous :

Tableau II.3 : Données du design de la combustion du fuel gas

Type de combustible	Unités	valeurs
Excès d'air	%	15
PCI calculé	Gcal/h	35,04
Masse volumique du combustible	kg/m ³	2,94
Pertes par radiation du PCI	%	1,5
Température du gaz d'échappement	°C	
Zone de radiation		905
Zone de convection		278
Débit massique des gaz d'échappement	kg/h	61308
Température de l'air ambiant	°C	15
PCI Volumétrique	Kcal/h m ³	54821

II.3 Mesures et relevés des paramètres opératoires actuels du four

La comptabilité des flux énergétiques des différents produits mis en jeu nécessite la mesure et le relevé sur site des données opératoires du four. Nous donnons ci-après le relevé des paramètres opératoires effectué in situ (1^{er} trimestre 2018), à deux prises par jour, durant notre séjour dans l'unité CPF. Nous représentons en figures II.4 à II.6 ci-après leurs valeurs moyennes en fonction du temps de relevé durant la période du 27 février au 05 mars 2018.

II.3.1 Températures d'air et des fumées de combustion

La figure II.4 représente l'évolution de température d'air ambiant et celle des gaz de combustion à la sortie du four, en fonction du temps de relevé. On constate que les valeurs relevées de ces deux paramètres sont presque identiques et s'ajustent à des valeurs moyennes respectives de 180 °C et 22 °C, ce qui met en évidence une stabilité pour le régime de fonctionnement du four durant cette période. Toutefois, le niveau thermique des gaz de combustion à la sortie du four de 180 °C, identifie la chaleur véhiculée par ces gaz comme une perte énergétique rejetée dans l'atmosphère, qui peut constituer une source potentielle de récupération d'énergie.

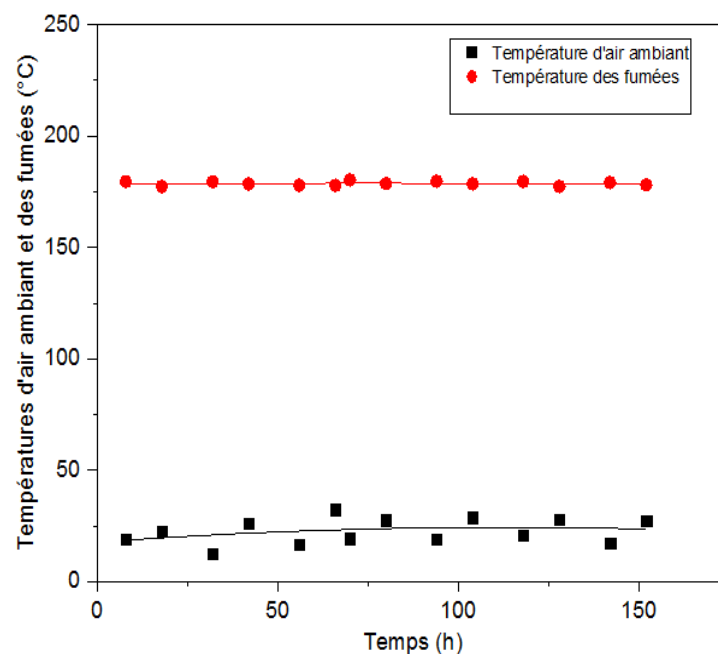


Figure II.4 : Températures d'air ambiant et des gaz de combustion en fonction du temps de relevé

II.3.2 Températures d'huile caloporteuse entrée-sortie

La figure II.5 ci-dessous représente l'évolution de la température d'huile caloporteuse à l'entrée et à la sortie du four en fonction du temps de relevé. On observe qu'en dépit du 5^{eme} et du 14^{eme} relevé, les valeurs des températures de l'ensemble des autres relevés ajustent correctement des valeurs moyennes respectives de 136 et 142 °C, soit un écart de 6°C. Ce faible écart de température confirme que la plus importante part du besoin énergétique de cette huile a été réalisée par son préchauffage préalable au moyen du système de récupération de chaleur installé sur les turbines des compresseurs booster. Notons qu'en absence de cette récupération de chaleur, l'écart de température du design peut atteindre 36 °C (tableau II.2).

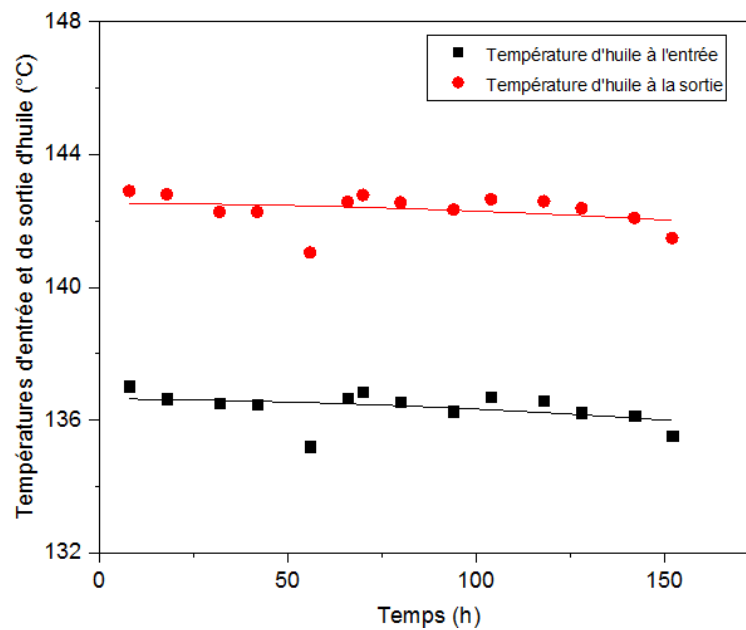


Figure II.5 : Températures d'entrée et de sortie d'huile caloporteuse en fonction du temps de relevé

II.3.3 Débits d'huile et du fuel gas

La figure II.6 représente les débits massiques du fuel gas et de l'huile caloporteuse en fonction du temps de relevé. Elle montre que les débits sont quasiment constants tout au long la période de relevé. Le rapport entre les deux débits moyens enregistrés donne une valeur de débit spécifique de fuel gas de $1,51 \times 10^{-4}$ kg fuel/kg huile, soit 7,25 % par rapport à la valeur du design donnée dans le cas d'absence de récupération de chaleur (tableau II.3). Ceci montre que la récupération de chaleur utilisée pour le préchauffage d'huile entraîne une économie de fuel gas de 93,28 % d'où, l'intérêt bénéfique de son utilisation.

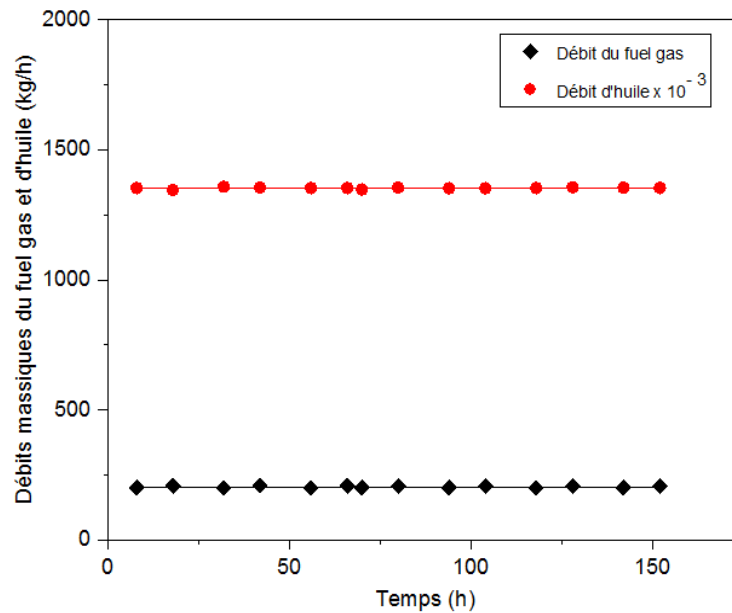


Figure II.6 : Débits massiques du fuel gas et d'huile en fonction du temps de relevé

II.4 Analyse du fuel gas et des gaz de combustion à la sortie du four

II.4.1 Analyse du fuel gas

Une analyse du fuel gas effectuée par chromatographie en phase gazeuse au laboratoire de contrôle qualité de l'unité a permis la détermination de sa composition chimique donnée au tableau II.4 ci-après. Les résultats de cette analyse montrent que ce fuel gas répond à la norme d'acidité ($\%CO_2 \leq 2$) et il est constitué principalement de méthane (88.16 %), éthane (8.46 %) et propane (1.09 %). Les autres constituants d'hydrocarbures et azote représentent des traces dans le mélange.

Tableau II.4 : Analyse du fuel gas utilisé.

Composant	% Molaire
N ₂	0,78
CO ₂	1,19
CH ₄	88,16
C ₂ H ₆	8,46
C ₃ H ₈	1,09
i-C ₄ H ₁₀	0,14
n-C ₄ H ₁₀	0,12
i-C ₅ H ₁₂	0,03
n-C ₅ H ₁₂	0,02
n-C ₆ H ₁₄	0,06

II.4.2 Analyse des gaz de combustion

L'analyse des gaz de combustion à la sortie du four a été effectuée toutes les 20 secondes au niveau de la cheminée (figure II.7) au moyen d'un analyseur portatif des gaz de combustion de type **LAND COM 4** du fournisseur **AMTEK [9]** (figure II.8). L'analyseur portatif fournit la solution complète pour l'analyse des gaz de combustion. Il est intégré dans une unité compacte alimentée par batterie capable de mesurer jusqu'à huit gaz simultanément avec neuf capteurs distincts. Il est personnalisable à des mesures de gaz et à des conditions de flux de procédé spécifiques et, pour cela, il est doté d'une sonde en acier inoxydable résistante à la température des gaz de combustion. Tandis que des techniques avancées de traitement en temps réel produisent les calculs désirés de combustion et d'émission, caractérisés par leur précision. Les figures ci-après représentent les résultats d'analyses de ces gaz identifiés comme polluants et gaz à effet de serre de manière générale.

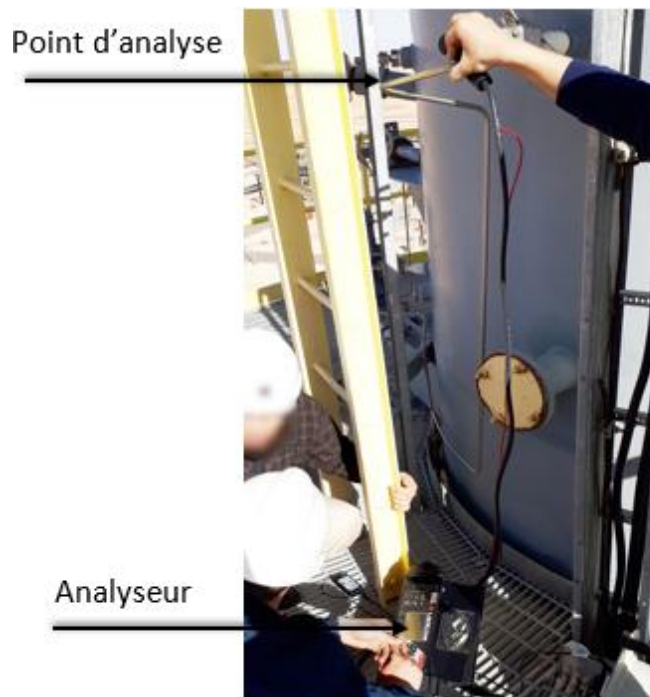


Figure II.7 : Point d'analyse des gaz des fumées



Figure II.8 : Appareil d'analyse des gaz de combustion

II.4.3 Résultats d'analyse des gaz de combustion

Les figures II.9 à II.14 représentent les concentrations des différents polluants dans les fumées (mg/Nm^3), issus de la combustion du fuel gas consommé. Cette représentation est fonction du temps d'analyse (temps de prise de concentration du polluant). On observe que les concentrations pour l'ensemble des polluants demeurent quasi constantes pendant toute la durée de l'analyse. Ceci met en évidence la stabilité et la reproductibilité des résultats d'analyse de ces polluants ainsi que la fiabilité de cette technique d'analyse.

Les valeurs de la concentration de CO et des imbrûlés C_xH_y (figures II.9 et II.10) ajustent assez bien des valeurs moyennes respectives de l'ordre de 25 et $300 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. La valeur du polluant CO reste inférieure à la limite imposée qui est de l'ordre de $150 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ [12]. Par contre, la valeur des imbrûlés dépasse largement la limite de $20 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. Les valeurs des concentrations de NO_2 et NO ajustent des valeurs moyennes respectives de 1,1 et $14 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (figures II.11 et II.12). Quant à la concentration de NO_x considérée comme la somme de NO_2 et NO, elle ajuste assez bien une valeur moyenne de $15,1 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (figure II.13) qui reste largement inférieure par rapport à la limite, de l'ordre de $200 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. Le polluant NO accuse une part de 93 % dans le mélange NO_x . Tandis que pour le CO_2 qui est le produit principal de la combustion du fuel gas, il ajuste une valeur moyenne de l'ordre de $13 \text{ g}/\text{Nm}^3$ (figure II.14).

- **Le monoxyde de carbone (CO) :**

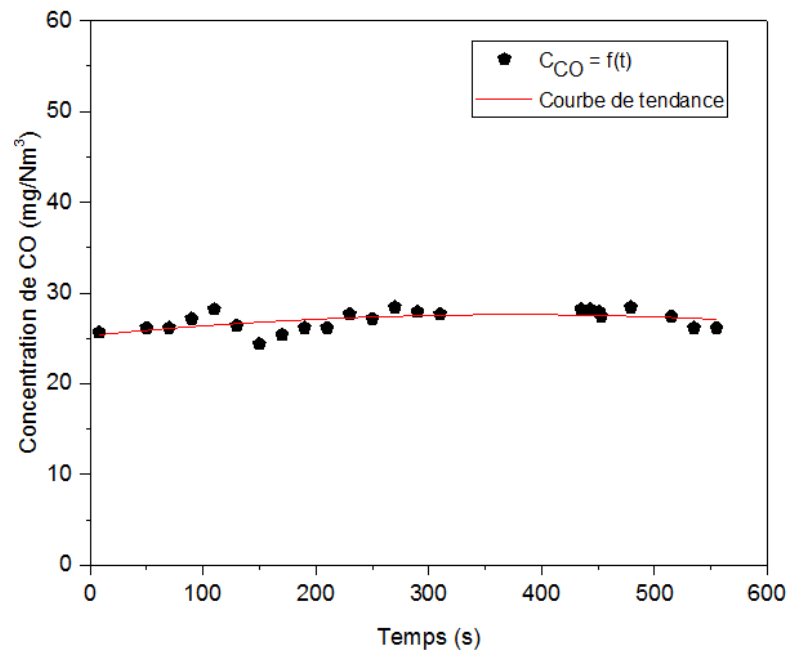


Figure II.9 : Concentration de CO en fonction du temps d'analyse

- **Les imbrulés (C_xH_y) :**

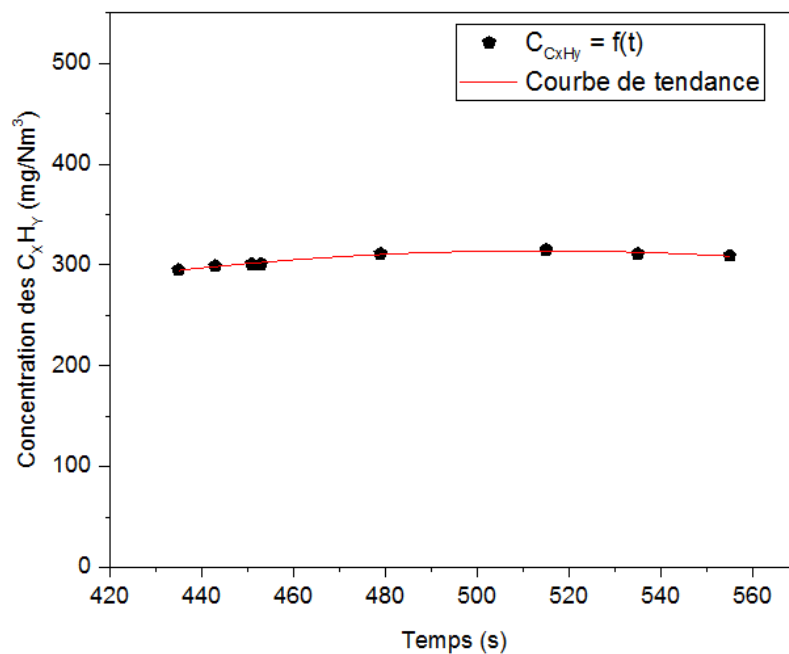


Figure II.10 : Concentration des imbrulés C_xH_y en fonction du temps d'analyse

- **Le dioxyde d'azote (NO₂) :**

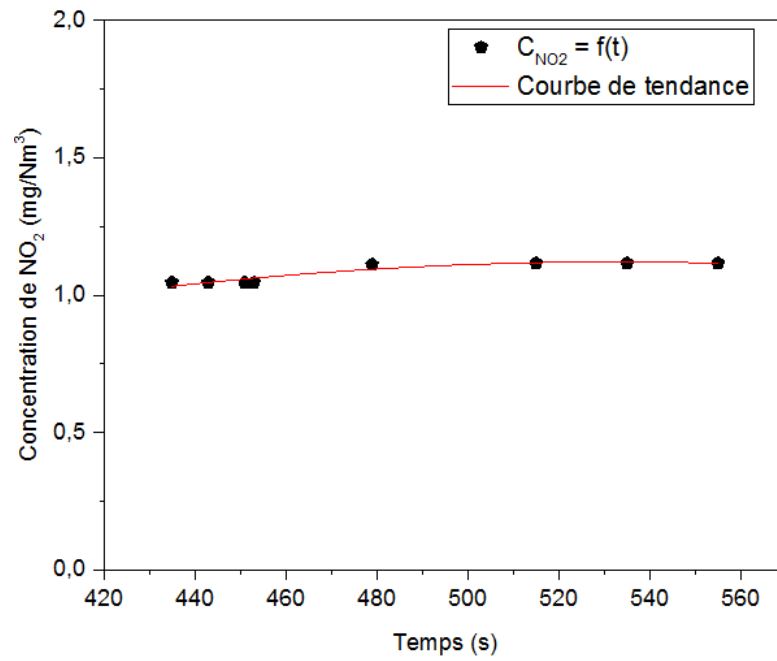


Figure II.11 : Concentration de NO₂ en fonction du temps d'analyse

- **Le monoxyde d'azote (NO) :**

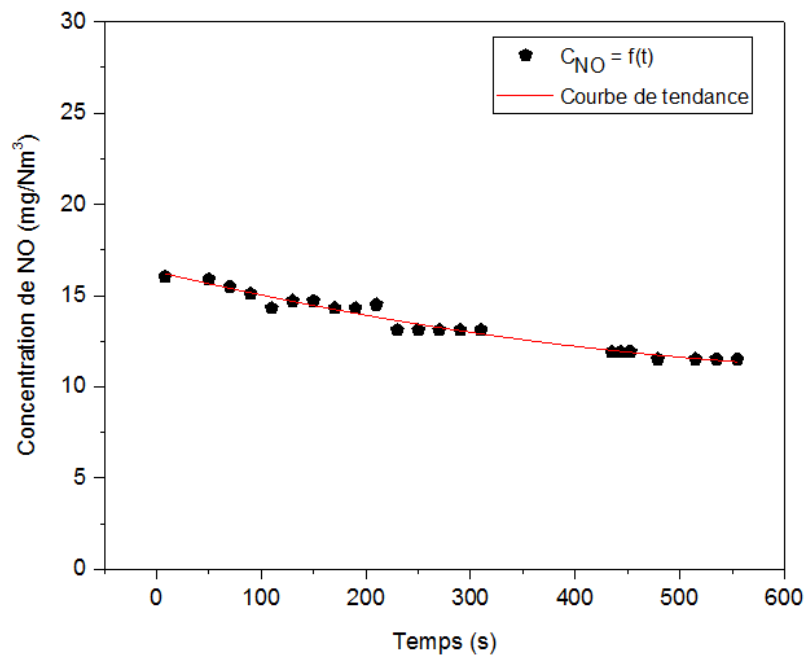


Figure II.12 : Concentration de NO en fonction du temps d'analyse

- **Les oxydes d'azote (NO_x) :**

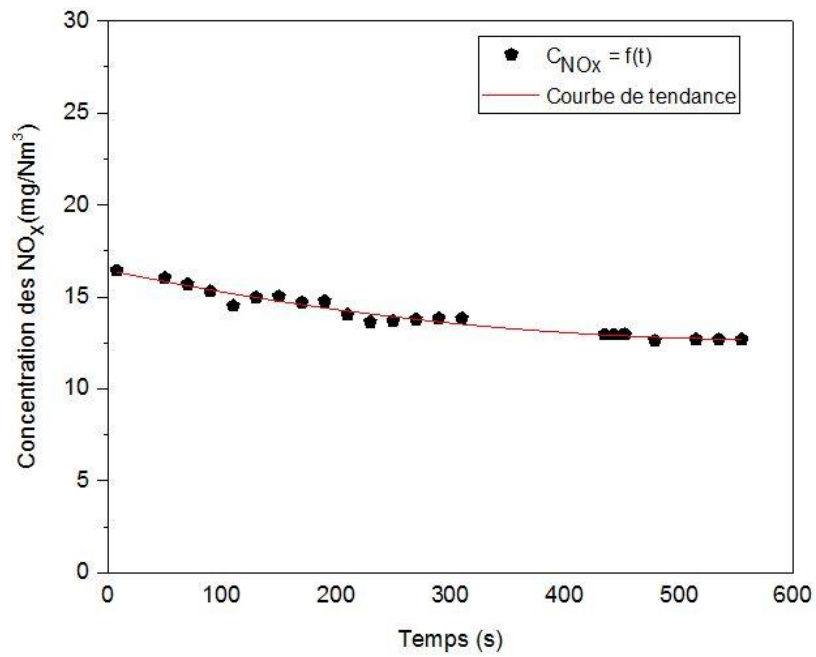


Figure II.13 : Concentration des NO_x en fonction du temps d'analyse

- **Le dioxyde de carbone (CO₂) :**

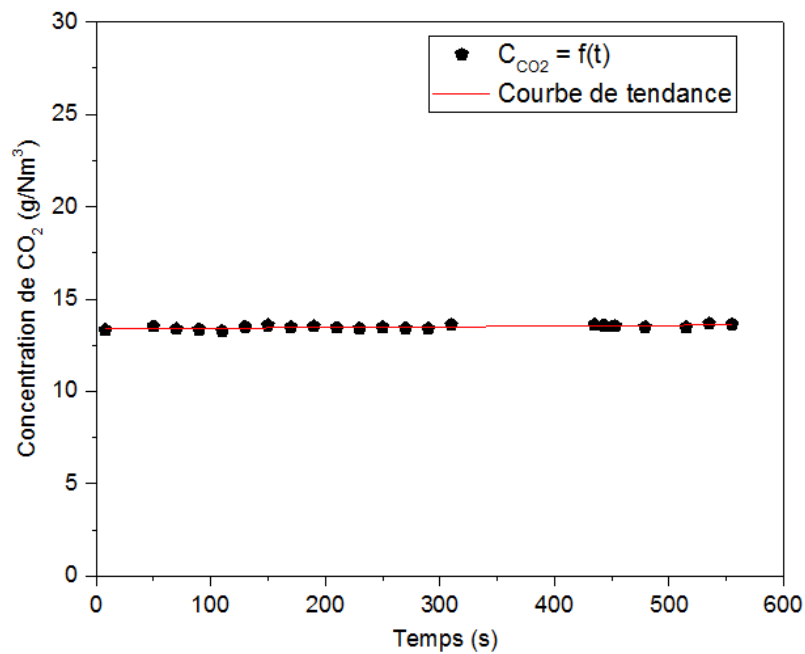


Figure II.14 : Concentration de CO₂ en fonction du temps d'analyse

Chapitre III

III. MODELISATION DES ASPECTS ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DU FOUR

Ce chapitre est consacré à la modélisation des aspects énergétique et environnemental du four de chauffage d'huile caloporteuse. Le modèle est développé à partir de l'établissement des bilans massiques et thermiques des deux zones du four ainsi que les cinétiques de formation des polluants générées lors de la combustion du fuel gas. Un code de calcul sous le langage Matlab [13] a été élaboré à cet effet pour prendre en charge les différentes étapes de calcul de modélisation et de l'étude paramétrique objet du chapitre quatre (4).

III.1 Transfert thermique dans les zones du four

Dans les fours industriels du gaz et du pétrole, 50 à 70 % de la chaleur totale fournie par la combustion est transférée dans la section radiante. La température du gaz dépend du combustible utilisé et de la quantité d'air excédentaire. Environ 20 % d'air en excès est normalement utilisé pour les combustibles gazeux et 25 % pour les combustibles liquides. L'excès d'air est utilisé pour empêcher la formation de suie et de monoxyde de carbone. L'augmentation de l'excès d'air a pour effet de réduire la température de la flamme adiabatique et d'augmenter le débit de gaz de cheminée, déplaçant ainsi la chaleur disponible de la section radiante vers la section convective.

III.1.1 Zone de radiation

Le transfert de chaleur par radiation à partir d'une surface est régi par l'équation de Stefan-Boltzmann [14] :

$$q_r = \sigma T^4 \quad (3.1)$$

q_r = flux de chaleur par radiation (W/m²)

σ = constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m² K⁴)

T = température de la surface (K)

Pour l'échange de chaleur entre les gaz de combustion et les tubes chauds, l'équation peut s'écrire :

$$Q_r = \sigma \times (\alpha \times A_{cp}) \times F \times (T_g^4 - T_t^4) \quad (3.2)$$

Q_r = taux de transfert de chaleur par rayonnement (W)

A_{cp} = surface "plan froid" des tubes (nombre de tubes \times longueur exposée \times nombre de passe)

α = facteur d'efficacité d'absorption

F = facteur d'échange de rayonnement

T_g = température des gaz chauds (K)

T_t = température de surface du tube (K)

Le facteur d'échange de rayonnement F , dépend de la disposition des surfaces, de leur émissivité et de leur absorptivité. Les gaz de combustion sont de mauvais radiateurs, car seuls le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau, environ 20% à 25% du total, émettront des rayonnements dans le spectre thermique. Pour un four, le facteur d'échange dépend de la pression partielle et de l'émissivité de ces gaz ainsi que de la disposition du réchauffeur. La pression partielle dépend du type de combustible utilisé, du liquide ou du gaz et de la quantité d'air excédentaire. L'émissivité du gaz est fonction de la température [15].

Le flux de chaleur vers les tubes dans la section radiante sera compris entre 20 et 40 kW/m², pour la plupart des applications. Une valeur de 30 kW/m² peut être utilisée pour faire une estimation grossière de la surface du tube nécessaire dans cette section. Notons qu'une petite quantité de chaleur sera transférée vers les tubes par convection dans la section radiante, mais comme la vitesse superficielle des gaz sera faible, le coefficient de transfert thermique sera faible, autour de 10 W/m²°C.

Le rayonnement des flammes éclairantes (figure III.1) dépend de la quantité de matière solide déposée dans la flamme, généralement du carbone, qui est chauffée jusqu'à incandescence, conférant à la flamme son éclat. En conséquence, le manque de connaissances précises concernant le rayonnement des gaz et des flammes est encore plus grand [16].

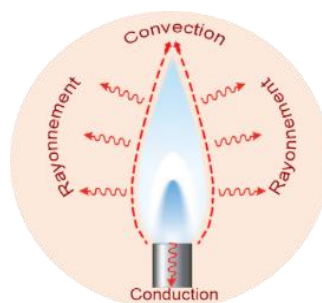


Figure III.1 : Rayonnement d'une flamme

III.1.2 Zone de convection

Le flux local de transfert thermique par convection entre une surface et un fluide est donné par la relation de Newton :

$$Q = h \times A \times (T_{surface} - T_{fluide}) \quad (3.3)$$

Q = taux de transfert de chaleur par convection (W)

h = coefficient de transfert convectif (W/m² °C)

A = surface d'échange (m²)

$T_{surface}$ = température de la surface (°C)

T_{fluide} = température du fluide (°C)

Les gaz de combustion s'écoulent à travers les tubes dans la section de convection. Le coefficient global dépend de la vitesse et de la température du gaz, ainsi que de la taille des tubes. La figure III.2 montre le passage d'un fluide autour d'un paquet de tubes créant donc la convection forcée [17].

Les valeurs typiques vont de 20 à 50 W/m² °C sachant que le coefficient de transfert de chaleur du côté gaz sera faible et lorsque des surfaces étendues sont utilisées, il faut tenir compte de l'efficacité de l'ailette.

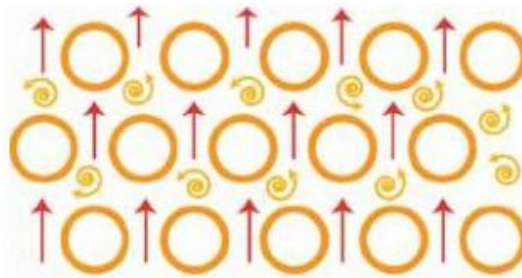


Figure III.2 : Transfert thermique par convection

III.2 Modélisation de l'Aspect Energétique

Etant donné la complexité du processus de rayonnement de la flamme de combustion et le manque de données et de précisions pour cet aspect, nous proposons pour la représentation du réchauffage de l'huile caloporteuse, une modélisation de type génie chimique [18], basée sur le concept des bilans, massiques et thermiques, des zones de rayonnement et de convection du four. Se basant sur cette approche, une configuration de

procédé du four est donnée en figure III.3, dans laquelle on mentionne les variables opératoires utilisées.

III.2.1 Bilans massiques

$$\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel\ gaz} = \dot{m}_{fumées} \quad (3.4)$$

$$\dot{m}_{Huile(1)} = \dot{m}_{Huile(2)} \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_{Huile(2)} = \dot{m}_{Huile(3)} \quad (3.6)$$

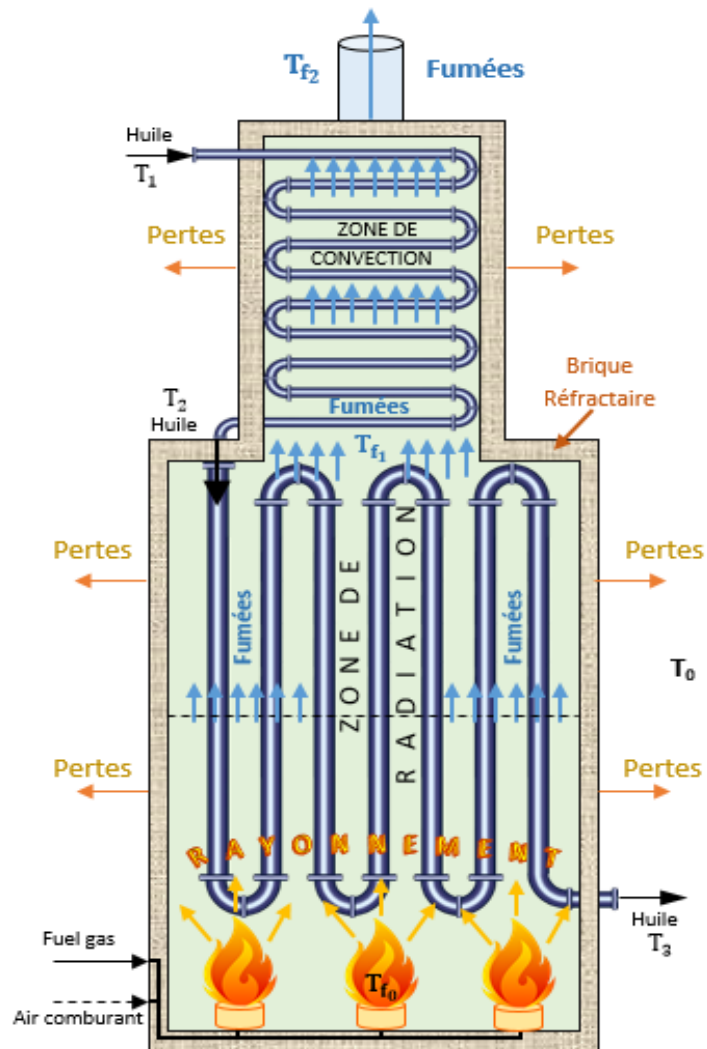


Figure III.3 : Représentation du procédé du four d'huile caloporteuse

III.2.2 Bilans thermiques

III.2.2.1 Hypothèse de Production de chaleur de combustion

Pour une simplification du processus de transfert thermique de la combustion, on suppose que toute la chaleur générée par la flamme est transformée totalement en fumées de combustion de façon réversible et sans déperdition de chaleur. A cet effet, on considère la température T_{f0} est celle de la flamme (appelée température théorique de flamme). Ainsi, le bilan pour la génération de la chaleur s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{FuelGas} \times Cp_{FuelGas} (T_{FuelGas} - T_0) + \dot{m}_{FuelGas} \times PCI + \dot{m}_{air} \times Cp_{air} (T_{air} - T_0) \\ = \dot{m}_{fumées} \times Cp_{Fumées} \times (T_{f0} - T_0) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$\dot{m}_{FuelGas}$, \dot{m}_{air} et $\dot{m}_{fumées}$ = débits massiques du fuel gas, de l'air comburant et des fumées (kg/h)

$Cp_{FuelGas}$, Cp_{air} et $Cp_{Fumées}$ = capacités calorifiques du fuel gas, de l'air comburant et des fumées (kJ/kg °C)

$T_{FuelGas}$, T_{air} , T_0 = températures du fuel gas, de l'air comburant et de l'air ambiant (°C)

T_{f0} = température théorique de flamme (°C)

PCI = pouvoir calorifique inférieur du fuel gas (kJ/kg)

III.2.2.2 Bilan thermique de la zone de radiation

Le bilan thermique entre les fumées de combustion produites dans la zone de radiation et l'huile traversant l'intérieur des tubes est décrit comme suit :

$$\dot{m}_{fumées} \times Cp_{Fumées} \times (T_{f0} - T_{f1}) = \dot{m}_{Huile} \times Cp_{Huile} (T_3 - T_2) + Q_{pertes(1)} \quad (3.8)$$

Les pertes thermiques $Q_{pertes(1)}$ à travers les parois de la zone de radiation sont prises égales à 1,5 % par rapport au PCI du fuel gas (Tableau III.1).

T_{f1} = température des fumées à la sortie de la zone de radiation (°C)

T_2 et T_3 = températures d'huile à l'entrée et à la sortie de la zone de radiation (°C)

\dot{m}_{Huile} = débit massique de l'huile (kg/h)

Cp_{Huile} = capacité calorifique de l'huile (kJ/kg °C)

III.2.2.3 Bilan thermique de la zone de convection

De même que pour la zone de radiation, le bilan thermique de la zone de convection s'écrit :

$$\dot{m}_{fumées} \times Cp_{Fumées} \times (T_{f1} - T_{f2}) = \dot{m}_{Huile} \times Cp_{Huile} (T_2 - T_1) + Q_{pertes(2)} \quad (3.9)$$

Tels que :

T_{f2} = température des fumées à la sortie de la zone de convection (°C)

T_2 = température d'huile à la sortie de la zone de convection (°C)

Les pertes thermiques $Q_{pertes(2)}$ à travers les parois de la zone de convection sont estimées par la formule suivante :

$$Q_{pertes(2)} = U_4 \times A_{latérale} \times \left(\frac{T_{f1} + T_{f2}}{2} - T_0 \right) \quad (3.10)$$

U_4 = coefficient de transfert de chaleur entre les fumées dans la zone de convection et le milieu externe (W/m² °C)

$A_{latérale}$ = surface latérale de la zone de convection (m²)

Le coefficient global de transfert de chaleur entre l'intérieur du four et le milieu ambiant est calculé par :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + R_{conduction} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (3.11)$$

Les équations de calcul des coefficients de transfert de chaleur h_i et h_{ext} sont données ci-après, par contre le détail de calcul est renvoyé en annexe du document.

Pour la zone de convection, le terme de la résistance due à la conduction est exprimé par l'équation suivante :

$$R_{conduction} = \frac{\sum e_i}{\lambda_i} \quad (3.12)$$

e_i = épaisseur des i couches successives de réfractaires ou d'isolants (m) ;

λ_i = conductivité thermique des i couches successives de réfractaires ou d'isolants (W/m °C).

h_{ext} ou (K_e) = Coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance (W/m² °C). Il est déterminé par l'abaque (figure III.4) en fonction de la température de la paroi externe.

Le coefficient k_e regroupe un facteur de rayonnement qui croît avec la température de la paroi externe T_e et un facteur de convection naturelle qui croît avec la vitesse de circulation de l'air autour de la paroi externe.

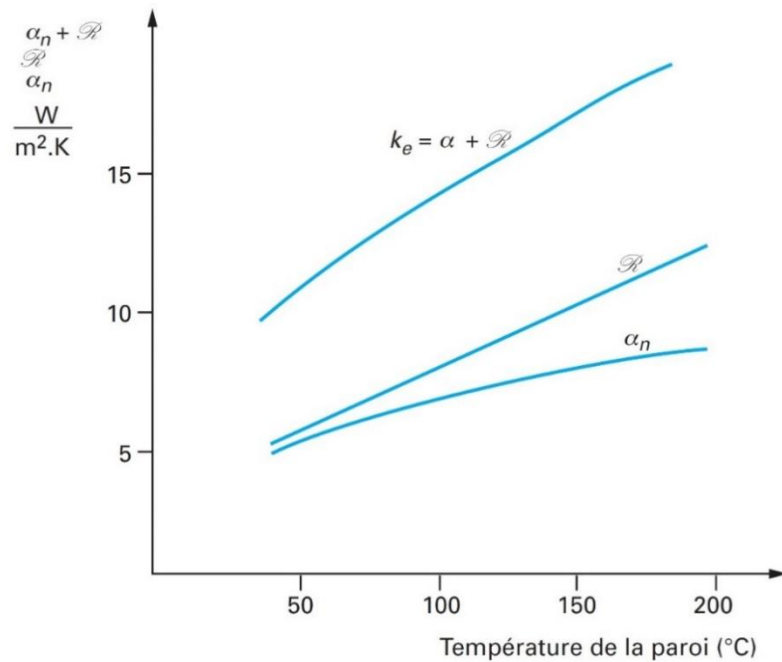


Figure III.4: Abaque de détermination de k_e [19]

Le calcul du coefficient de transfert de chaleur interne h_{int} entre les fumées et la paroi interne de la zone de convection est estimé selon l'équation (3.13) suivante [20].

$$Q = h_{int} \times L_3 \times (T_{gaz} - T_{paroi}) + \sigma \times L_3 \times \varepsilon_{paroi} \times \varepsilon_{gaz} \times (T_{gaz}^4 - T_{paroi}^4) \quad (3.13)$$

Q = flux d'échange de chaleur entre les gaz et la paroi (W)

h_{int} = coefficient de transfert de chaleur entre les fumées et la paroi interne (W/m² K)

L_3 = dimension caractéristique d'échange (m)

T_{gaz} et T_{paroi} = températures des gaz de combustion et de la paroi interne (K)

ε_{paroi} et ε_{gaz} = émissivités de la paroi et du gaz

σ = constante de Stefan-Boltzmann

III.3 Rendement Énergétique du Four

Quel que soit le four, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur utile Q_u . Le rendement η d'un four est le rapport de l'énergie utile Q_u à l'énergie Q qu'il faut fournir au four sous forme de combustible.

$$\eta = \frac{Q_u}{Q} \quad (3.14)$$

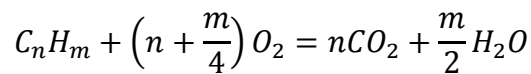
Soit :

$$\eta = \frac{\dot{m}_{Huile} \times C_p_{Huile} \times (T_3 - T_1)}{\dot{m}_{Fuel\ Gas} \times PCI} \quad (3.15)$$

III.4 Modélisation de l'aspect environnemental

III.4.1 Réaction de combustion

Le terme de combustion s'applique à l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent au cours de l'oxydation complète ou partielle d'un combustible [20]. La combustion complète d'un hydrocarbure conduit à la formation de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, et peut être représentée par une réaction globale du type :



En réalité, le processus de combustion ne peut être décrit par cette seule réaction globale. En effet, l'oxydation d'un hydrocarbure s'effectue suivant des mécanismes réactionnels complexes constitués de réactions en chaînes ramifiées, faisant intervenir un grand nombre d'espèces chimiques intermédiaires, comme par exemple le monoxyde de carbone et l'hydrogène ainsi que des espèces radicalaires telles que O, H, OH. La combustion est donc un phénomène complexe, qui ne peut se développer que sous certaines conditions d'inflammabilité et de propagation. Elle est exothermique et apparaît le plus souvent sous la forme d'une flamme, constituée par le volume gazeux dans lequel s'effectuent les réactions d'oxydation.

III.4.1.1 Les différents types de combustion

- **Combustion stœchiométrique :**

Le pouvoir comburivore du gaz combustible, appelé également air stœchiométrique, est défini comme la quantité d'air nécessaire et suffisante pour assurer la combustion complète de l'unité de volume de ce gaz. Il s'exprime en Nm³ d'air/Nm³ de gaz. L'air stœchiométrique V_a qui permet d'obtenir la combustion complète, sans excès ni défaut d'air vaut :

$$V_a = \frac{\left(n + \frac{m}{4}\right)}{0,21} \quad (3.16)$$

- **Combustion complète en excès ou en défaut d'air :**

Le facteur d'air du mélange combustible n , appelé aussi taux d'aération, s'exprime en fonction du pouvoir comburivore du gaz V_a , et du rapport entre le volume d'air et le volume de gaz combustible réellement introduits dans le mélange :

$$n = \frac{\left(\frac{V_{air}^{réel}}{V_{gaz}}\right)}{V_a} \quad (3.17)$$

Or, par définition, le pouvoir comburivore du gaz V_a est égal à :

$$V_a = \frac{V_{air}^{stoech.}}{V_{gaz}} \quad (3.18)$$

Le facteur d'air n s'exprime alors plus simplement sous la forme suivante :

$$n = \frac{V_{air}^{réel}}{V_{air}^{stoech.}} \quad (3.19)$$

La combustion complète d'un mélange dans les conditions stœchiométriques s'effectue à un facteur d'air $n=1$, et se caractérise par l'oxydation totale du carbone et de l'hydrogène du gaz combustible ainsi que par la consommation totale de l'oxygène de l'air comburant. Les produits de combustion contiennent seulement du dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau et de l'azote.

- **Combustion incomplète**

On dit qu'une combustion est incomplète lorsqu'en raison de conditions défavorables (mélange non homogène, température insuffisante), une partie du gaz ne participe pas à la combustion et ce, quel que soit le facteur d'air. Cette combustion se caractérise par la présence simultanée d'oxygène et d'imbrûlés, notamment du monoxyde de carbone CO dans les produits de combustion.

III.4.2 Polluants émis par les fours

Consommateurs d'énergie, les fours ont particulièrement par leurs rejets dans l'atmosphère un impact non négligeable sur l'environnement.

Les installations de combustion rejettent plusieurs types de polluants. Ce sont principalement :

- les oxydes de soufre (SO_2 et SO_3) formés à partir du soufre contenu dans certains combustibles (fioul, gaz de cokerie, etc.) ;

- les oxydes d'azote (NO, NO₂, N₂O) formés au cours de la combustion soit, à partir des composés azotés contenus dans le combustible soit, par combinaison à haute température de l'azote et de l'oxygène de l'air ;
- les poussières en provenance du combustible ou de particules solides en provenance des produits chauffés, entraînées par les fumées ;
- l'oxyde de carbone (CO) dans les fours où la combustion s'effectue avec un défaut d'air.

On peut trouver également, dans des installations plus spécifiques des composés de fluor, de chlore, des COV (composés organiques volatils), des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), etc., et, sauf si le combustible est de l'hydrogène pur, on trouve dans les fumées du dioxyde de carbone (CO₂) qui bien que n'étant pas un polluant au sens strict du terme, a un impact sur le climat par l'effet de serre qu'il entraîne [19].

III.4.3 Mécanismes et cinétiques de formation des polluants

- **Oxydation du méthane CH₄**

De tous les composés de la série des alcanes, le méthane est celui qui s'oxyde le moins facilement. Cela est dû à la stabilité importante de la molécule CH₄ et à la faible réactivité de radical méthyle CH₃[•] par rapport à celle de radicaux analogues C₂H₅, C₃H₇ intervenant dans la combustion des hydrocarbures de rang supérieur.

Lors de la combustion du méthane, on peut distinguer principalement deux étapes :

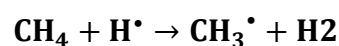
- La première consiste en l'oxydation du méthane par des mécanismes de réaction en chaîne ramifiées aboutissant à la formation de monoxyde de carbone.
- La seconde conduit à la formation de dioxyde de carbone par oxydation de CO. Cette étape intervient en fin de combustion et fournit la majeure partie d'énergie totale dégagée par la réaction.

Les réactions les plus importantes intervenant au cours de l'oxydation direct de CH₄ en CO où M représente une molécule quelconque, sont les suivantes [21] :

- L'initiation :



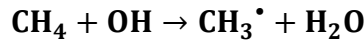
- Propagation et production de H₂ :



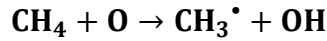
- Chaînes ramifiées



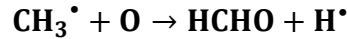
- Propagation :



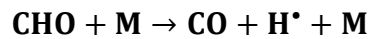
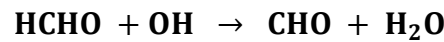
- Ramification :



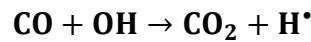
- Propagation et formation de formaldéhyde :



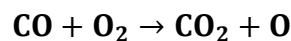
- Chaîne de HCHO :



La formation de monoxyde de carbone dont la combustion finale fournit l'essentiel de l'énergie dégagée lors de la combustion. CO est oxydée en CO₂ presque exclusivement par la réaction :



Le CO est rapidement oxydé en CO₂ ce qui s'accompagne d'un important dégagement de la chaleur. Notons que la formation de CO₂ par la réaction directe est lente et d'importance secondaire.



La vitesse de la réaction globale de formation de CO₂ s'exprime par [21] :

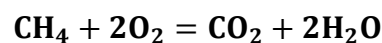
$$r_{\text{CO}_2} = A \times \exp^{(-E/RT)} \times C_{\text{CO}} \times C_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} \times C_{\text{O}_2}^{0,25} \quad (3.20)$$

La concentration de CO₂ s'écrit de la manière suivante :

$$C_{\text{CO}_2} = A \times \exp^{(-E/RT)} \times C_{\text{CO}} \times C_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} \times C_{\text{O}_2}^{0,25} \times \tau_r \quad (3.21)$$

Avec : $c = 0,25$; $d = 0,5$; $\log A = 14,6$; $E = 40 \text{ Kcal. mol}^{-1}$

La réaction globale la plus simple représentant la combustion de méthane s'écrit :



La vitesse de réaction est généralement exprimée par [21] :

$$r_{\text{CH}_4} = A \times T^a \times \exp^{(-E/RT)} \times (C_{\text{CH}_4})^b \times (C_{\text{CO}_2})^c \quad (3.22)$$

La concentration du méthane s'exprime de la manière suivante :

$$C_{CH_4} = A \times T^a \times \exp(-E/RT) \times (C_{CH_4})^b \times (C_{CO_2})^c \times \tau_r \quad (3.23)$$

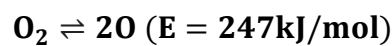
Avec : $a = 0$; $b = -0,3$; $c = 1$; $E = 48,4 \text{ Kcal. mol}^{-1}$

- **Formation des oxydes d'azote NOx**

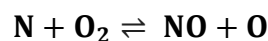
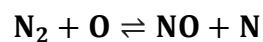
L'azote peut se combiner avec l'oxygène à plus ou moins haute température pour former le monoxyde d'azote. Cependant, ces réactions sont dépendantes des énergies de liaison des molécules qui constitueront la source d'azote. L'énergie de liaison de l'atome d'azote dans la molécule N_2 (environ 950 kJ/mol) est plus élevée que dans les molécules azotées organiques présentes dans les huiles lourdes résiduelles et dans le charbon. Ainsi, nous distinguerons donc deux groupes de réactifs azotés : d'une part le N_2 de l'atmosphère, d'autre part les espèces azotées du combustible que l'on désignera par le nom « N du combustible ».

-Le monoxyde d'azote NO « thermique »

Le mécanisme de formation du NO thermique a été décrit pour la première fois par Zeldovich en 1946 [22]. Il met en jeu un mécanisme radicalaire, qui sera généralement adopté plus tard par tous les chercheurs. Une température élevée est nécessaire pour rompre la molécule de O_2 (d'où l'origine du nom « thermique »). La formation du NO thermique nécessite la présence de radicaux O et OH. À partir d'une certaine température, on constate une dissociation de l'oxygène de l'air :



Le radical O peut ensuite réagir avec l'azote de l'air. Le mécanisme radicalaire décrit par Zeldovich se compose des deux réactions réversibles suivantes :



La vitesse de formation de NO s'exprime par :

$$r_{NO} = 8,52 \times 10^{11} \times C_{N_2} \times C_{O_2}^{0,5} \times \exp(-135000 \times 4,18/RT) \quad (3.24)$$

Donc, la concentration de NO s'exprime comme suit :

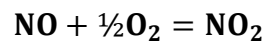
$$C_{NO} = 8,52 \times 10^{11} \times C_{N_2} \times C_{O_2}^{0,5} \times \exp(-135000 \times 4,18/RT) \times \tau_r \quad (3.25)$$

-Le monoxyde NO « du combustible »

La source d'azote est ici l'azote constitutif de la partie organique du combustible. Les liaisons carbone-azote C-N impliquées ici sont nettement plus faibles que la triple liaison $N\equiv N$ impliquée dans la formation du NO thermique. Ainsi, le NO du combustible pourra se former aussi bien à basse température qu'à haute température. L'importance relative du NO du combustible par rapport au NO thermique dépend du taux d'azote du combustible, de la température de combustion, et de la qualité et richesse du mélange dans le four.

- Le dioxyde d'azote NO₂

Peu d'études, à notre connaissance, ont permis de distinguer les émissions de NO₂ des émissions de NO. Ce NO₂ résulte de la transformation du NO au cours de la phase de dilution dans l'air. La réaction a lieu à des températures inférieures à 600 °C [22].



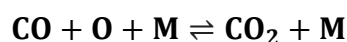
La conversion de NO en NO₂ dépend de la quantité d'oxygène disponible et du temps de séjour des gaz résiduels.

• Formation du monoxyde de carbone CO

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz inodore, incolore et cependant très toxique. Issu de l'oxydation partielle des combustibles composés de chaînes carbonées (Hydrocarbures), le CO est formée lors de la phase secondaire de la combustion. Lorsque les constituants intermédiaires (H_2 , O, H^\bullet et OH) sont créés par réactions en chaîne, un défaut en atome d'oxygène (combustion riche) favorise sa formation et celle d' H_2O .

Dans un second temps, son oxydation en CO_2 intervient. Cette oxydation est lente et quasiment impossible en l'absence d'espèces hydrogénées (notamment OH). Elle fait principalement intervenir plusieurs réactions.

La réaction de terminaison de ce système d'oxydation du CO est une réaction tri moléculaire lente qui s'écrit :



Il est à noter que le CO est seul précurseur du CO_2 , produit final de combustion d'un hydrocarbure. Ainsi, toute perturbation venant consommer O, H^\bullet ou OH limite l'efficacité de combustion et entraîne l'émission toxique de CO.

D'après Vestbrook et Dryer [23] on exprime la vitesse de formation de CO par l'équation suivante :

$$r_{CO} = -A T^a C_b^f C_{CO_2} C_{H_2O}^d \exp(-E \times 4,18.103/RT) \times (10^{-6})^{(b+c+d-1)} \quad (3.26)$$

Enfin, la concentration de CO s'exprime de la manière suivante :

$$C_{CO} = -A T^a C_b^{co} C_{CO_2} C_{H_2O}^d \exp(-E \times 4,18 \times 103/RT) \times (10^{-6})^{(b+c+d-1)} \times \tau_r \quad (3.27)$$

Avec : $a = 0$; $b = 0$; $c = 0,25$; $d = 0,5$; $\log A = 14,6$; $E = 40 \text{ kcal/mol}$

III.4.4 Temps caractéristique de réaction

Les concentrations issues des cinétiques des polluants sont en fonction du temps de séjour qui est noté par le temps caractéristique de la formation de la flamme de combustion. Il est donné par la loi d'Arrhenius

$$\tau_r(T) = \exp(E/K \times T) \quad (3.28)$$

Le modèle considère un temps de séjour τ_r égal à la valeur usuelle de l'ordre de 10^{-3} s proposée par plusieurs auteurs [24].

III.5 Résolution du modèle

La résolution des équations du modèle se déroule en deux étapes de calcul, qui sont reconduites jusqu'à convergence de la température d'huile caloporteuse à la sortie du four à la valeur admissible. La première étape consiste en la résolution du bilan massique et thermique sur les zones de radiation et de convection, la seconde résout le bilan thermique sur la paroi de ces zones (figure III.5).

Les concentrations des différents polluants sont initialisées aux valeurs calculées par les cinétiques de la combustion du méthane dans un lit fluidisé [21]. Elles seront ensuite recalculées et réajustées jusqu'à leur convergence aux valeurs mesurées.

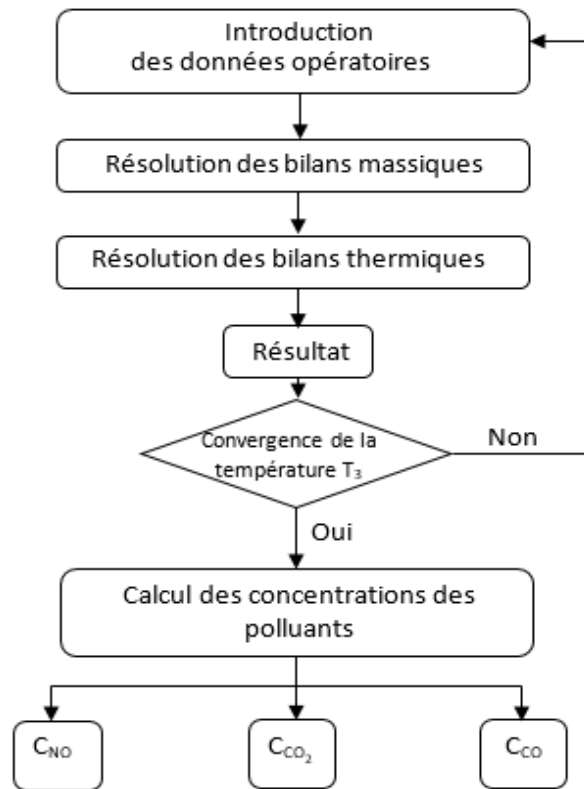


Figure III.5: Organigramme de résolution du modèle

Chapitre IV

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'utilisation du modèle décrit au chapitre précédent dans la simulation du procédé de réchauffage d'huile caloporteuse a permis d'étudier la sensibilité des performances énergétique, économique et environnementale du four aux divers paramètres opératoires, afin de pouvoir identifier ceux qui contrôlent leur dégradation. Ensuite, deux optimisations ont été réalisées, la première est effectuée en prenant en compte chaque critère de performance séparément, tandis que la deuxième considère les trois critères simultanément. Ce qui permet de déterminer le meilleur compromis possible.

IV.1 Etude paramétrique

L'étude paramétrique concerne l'effet des paramètres opératoires sélectionnés sur les indicateurs des critères de performance énergétique, économique et environnementale.

IV.1.1 Variables opératoires

Les paramètres opératoires sélectionnés dans la simulation sont : le débit massique du fuel gas (\dot{m}_{FG}), le débit massique de l'air comburant (\dot{m}_{air}), la température de l'air ambiant (T_0), la température du fuel gas (T_{FG}), la température de l'air comburant (T_{air}) et le coefficient de transfert thermique global U_4 avec le milieu externe dans la zone de convection.

IV.1.2 Indicateurs des critères de performance

- **Indicateur Energétique**

Le rendement énergétique donné au chapitre III (équation 3.15) que nous rappelons ci-après, est choisi comme indicateur du critère d'évaluation de la performance énergétique du four.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{Huile} \times C_p Huile \times (T_3 - T_1)}{\dot{m}_{Fuel Gas} \times PCI} \quad (4.1)$$

- **Indicateur Economique**

Le cout total du fuel gas consommé par le four par rapport à la tonne d'huile réchauffée **IE** (DZD/tonne d'huile traitée), est considéré comme indicateur économique. **C_u** étant le cout unitaire moyen du gaz naturel (HT) fourni par la Sonelgaz au secteur industriel, pris égal à 2 DZD/m³ [25] et $\rho_{fuel\ gas}$ masse volumique du fuel gas (kg/m³)

$$IE = \frac{C_u \times \dot{m}_{Fuel\ Gas}}{\rho_{Fuel\ Gas} \times \dot{m}_{Huile}} \quad (4.2)$$

- **Indicateur Environnemental**

Les concentrations (mg/Nm³) des polluants CO, NO et CO₂ rejetés dans les fumées de combustion du four sont considérées dans l'étude paramétrique comme Indicateurs de performance du critère environnemental. Par contre, le facteur d'émission F_{CO_2} traduisant la quantité de CO₂ (gaz à effet de serre) émise par rapport à la tonne d'huile réchauffée (équation 4.3) est retenu comme indicateur environnemental dans l'étude d'optimisation monocritère et multicritère du système, objet du paragraphe 3.

$$F_{CO_2} = \frac{C_{CO_2} \times V_{Fumées}}{\dot{m}_{Huile}} \quad (4.3)$$

F_{CO_2} : Facteur d'émission de CO₂ (g de CO₂/tonne d'huile traitée)

C_{CO_2} : Concentration du CO₂ (g/Nm³)

$V_{Fumées}$: Débit volumique des fumées (Nm³/h)

IV.1.3 Tests de sensibilité des Indicateurs de performance

La sensibilité des indicateurs de performance cités ci-dessus seront examinés sous diverses conditions opératoires du procédé de réchauffage d'huile. A cet effet, nous donnons aux figures ci-après, leur évolution en fonction de la variation des paramètres opératoires à l'entrée du four.

IV.1.3.1 Effet du débit massique du fuel gas sur les indicateurs de performance

La figure IV.1 montre l'effet du débit massique du fuel gas sur l'indicateur économique (IE) et le rendement du four (η). La figure révèle que l'IE augmente de façon proportionnelle avec l'augmentation du débit du combustible. Par contre le rendement η diminue avec cette augmentation, conséquence de l'augmentation de la quantité de chaleur de combustion fournie au four. Les concentrations des polluants (figure IV.2) augmentent avec l'augmentation du débit du combustible. Leur augmentation est attribuée à leur cinétique de formation dépendant fortement de \dot{m}_{FG} . La concentration de CO₂, identifié comme produit principal de combustion est très significative devant celles de CO et NO. Toutefois, la figure montre qu'au-delà d'un débit \dot{m}_{FG} de 165 kg/h, la concentration de NO est très prononcée par rapport à CO. Sa valeur reste largement

supérieure à la valeur réelle constatée par analyse, ceci peut être attribué au modèle cinétique proposé.

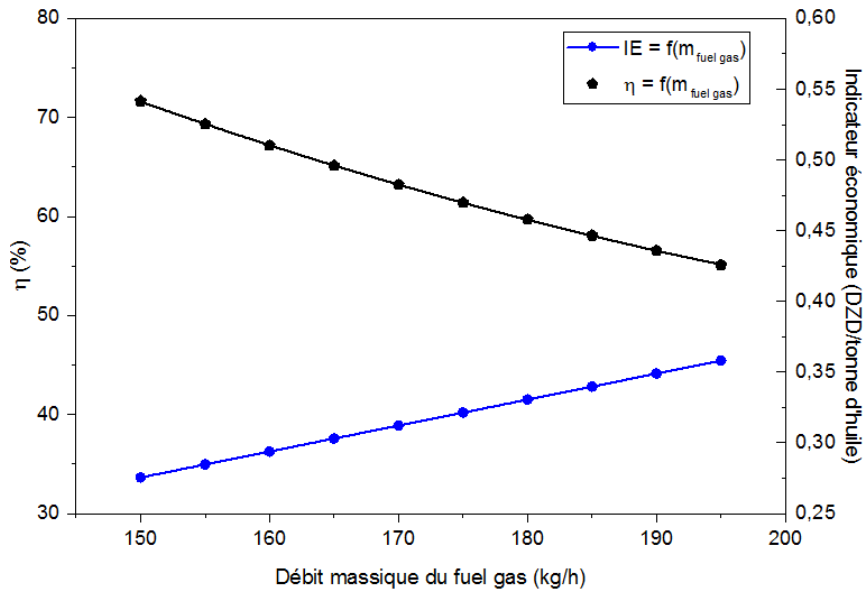


Figure IV.1 : IE et η en fonction du débit massique \dot{m}_{FG}

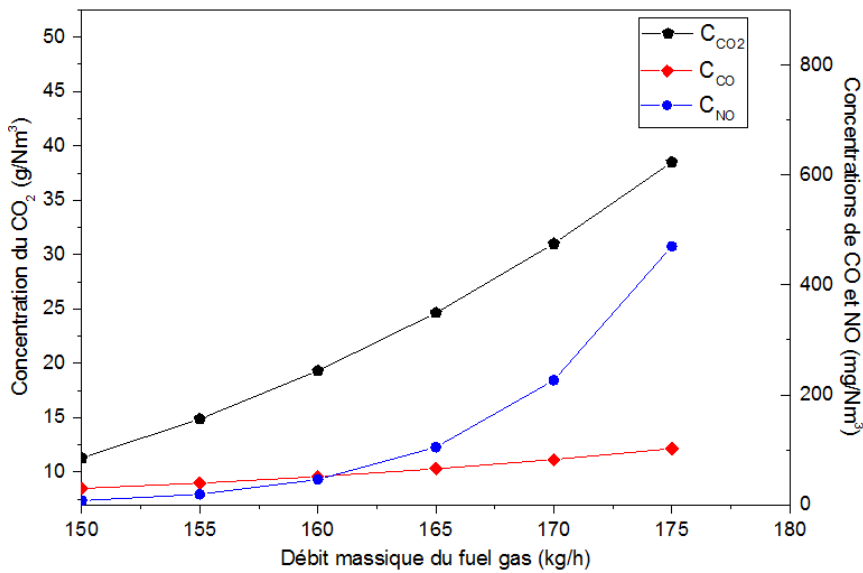


Figure IV.2 : Concentrations des polluants en fonction de \dot{m}_{FG}

IV.1.3.2 Effet du débit massique de l'air comburant sur les indicateurs de performance

La figure IV.3 représente simultanément la variation du rendement du four (η) et l'indicateur économique (IE) en fonction du débit d'air comburant. L'augmentation de l'excès d'air conduit au refroidissement de la flamme ce qui provoque l'augmentation du débit de combustible pour atteindre les températures désirées du procédé. En conséquence le rendement du four diminue et IE augmente. A cet effet, les concentrations de CO et de

NO seront atténuées (figure IV.4), par contre celle de CO₂ sera diluée dans les fumées de combustion.

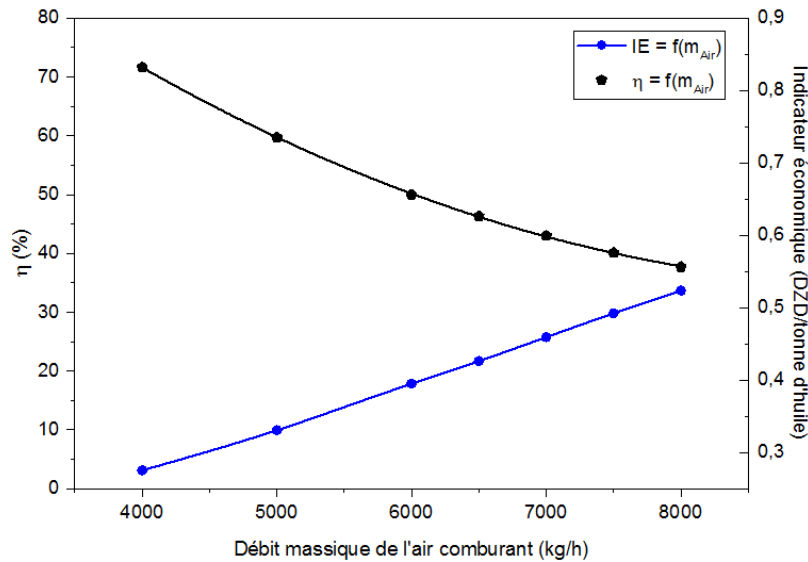


Figure IV.3 : IE et η en fonction du débit massique de l'air comburant

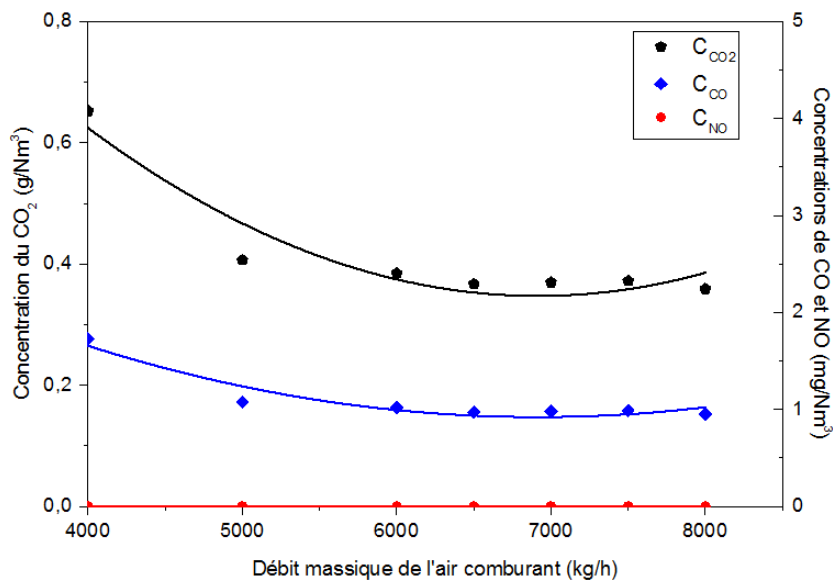


Figure IV.4 : Evolution des concentrations des polluants en fonction du débit massique de l'air comburant

IV.1.3.3 Effet de la température de l'air ambiant sur les Indicateurs de performance

La figure IV.5 représente l'évolution de l'indicateur économique (IE) et celle du rendement du four (η) en fonction de la température de l'air ambiant (T₀). Nous constatons que l'accroissement de T₀ entraîne une faible diminution de IE et une faible augmentation du rendement. Ceci peut être expliqué par la diminution de la perte thermique vers le milieu extérieur, traduite par la diminution du gradient de température ΔT entre les gaz

de combustion et le milieu ambiant. D'autre part, on constate que les concentrations des polluants (figure IV.6) diminuent de manière non négligeable lorsque T_0 augmente.

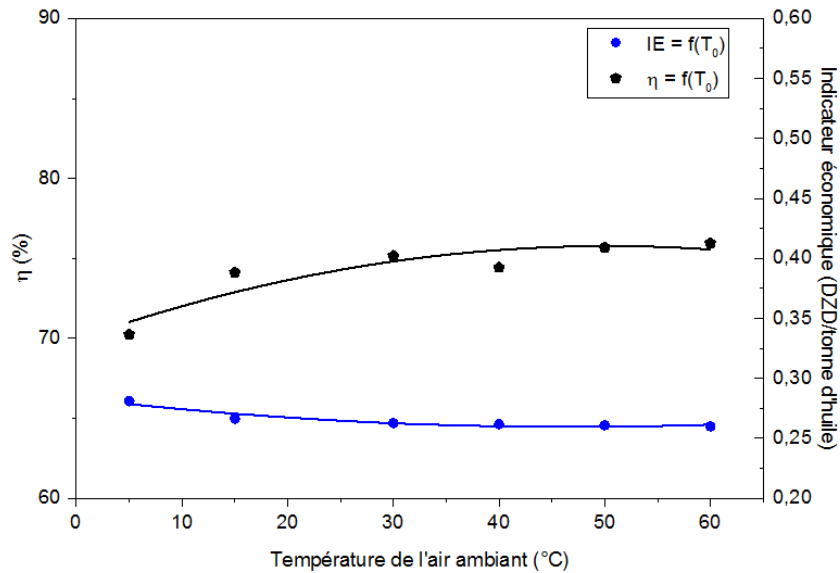


Figure IV.5 : IE et η en fonction de la température de l'air ambiant

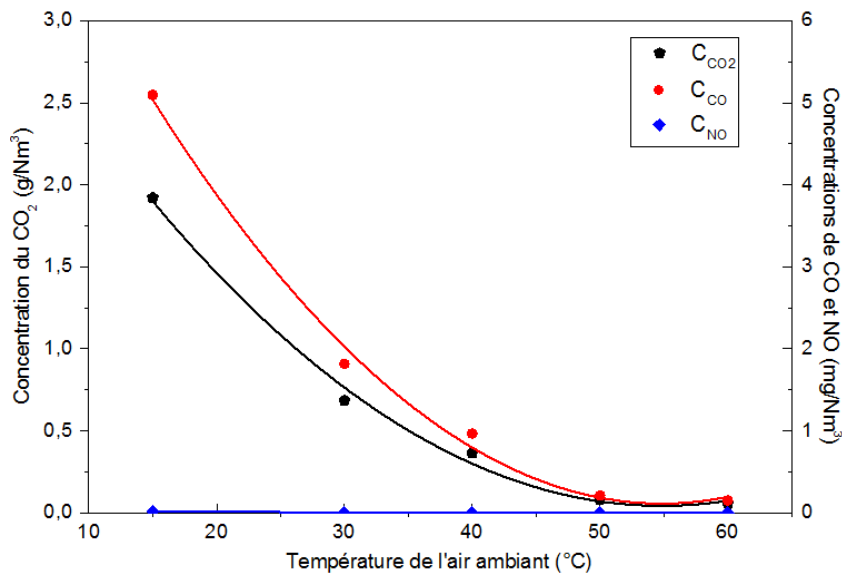


Figure IV.6 : Concentrations des polluants en fonction de la température ambiante

IV.1.3.4 Effet de la température du fuel gas sur les indicateurs de performance

La figure IV.7 représente l'évolution de l'IE et celle du rendement énergétique du four (η) en fonction de la température du fuel gas (T_{FG}). L'augmentation de cette température correspondante à l'augmentation de la chaleur sensible du fuel gas, entraine un effet favorable sur la performance énergétique du four, traduite par une légère augmentation de η . Quant à la performance économique, IE reste insensible à ce paramètre. L'effet de T_{FG} sur les concentrations des polluants est illustré en figure (IV.8). Les concentrations

diminuent avec l'augmentation de T_{FG} , ce qui met en évidence aussi l'importance du préchauffage du combustible avant son entrée dans le four sur l'aspect environnemental.

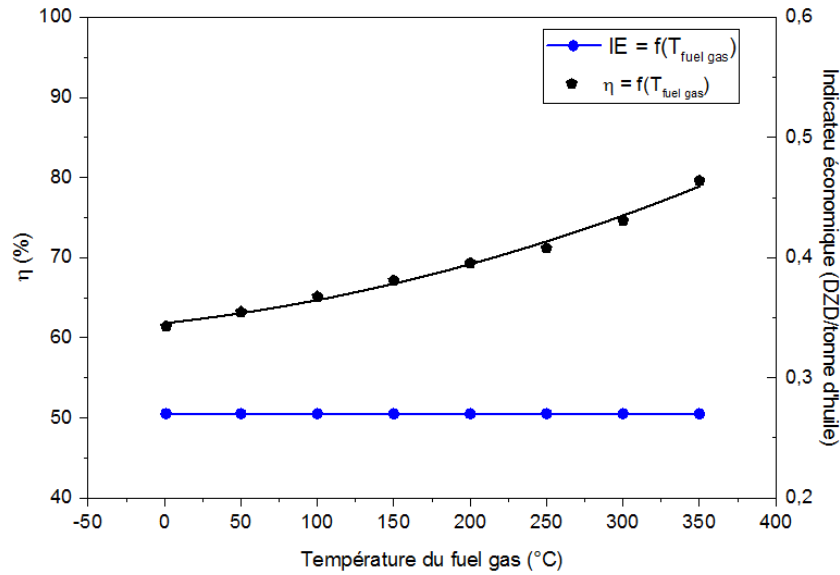


Figure IV.7 : IE et η en fonction de la température du fuel gas

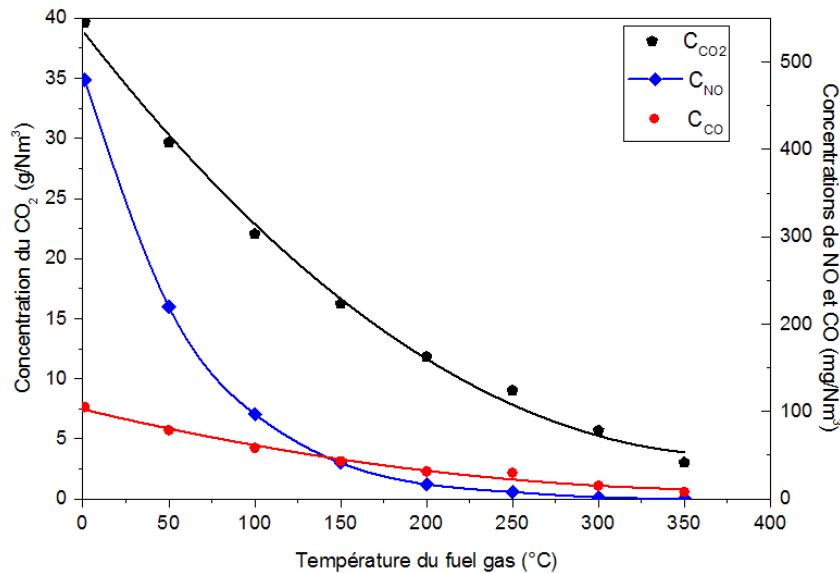


Figure IV.8 : Concentrations des polluants en fonction de la température du fuel gas

IV.1.3.5 Effet de la température de l'air comburant sur les indicateurs de performance

La figure IV.9 représente l'évolution de l'indicateur économique (IE) ainsi que le rendement énergétique du four (η) en fonction de la température de l'air comburant T_{Air} . L'augmentation de cette température entraîne la diminution de IE et l'augmentation du rendement η . L'effet de ce paramètre est très significatif sur les performances économique et énergétique, conséquence de la réduction de la consommation du combustible fuel gas.

Par ailleurs, on constate aussi que l'évolution des concentrations des polluants CO et CO₂ (figure IV.10) ajuste des valeurs très faibles. Ce qui montre l'importance du préchauffage d'air comburant sur la performance multicritère du four. Ainsi, le préchauffage d'air comburant par la récupération de la chaleur des fumées de combustion à la sortie du four est toujours préconisé

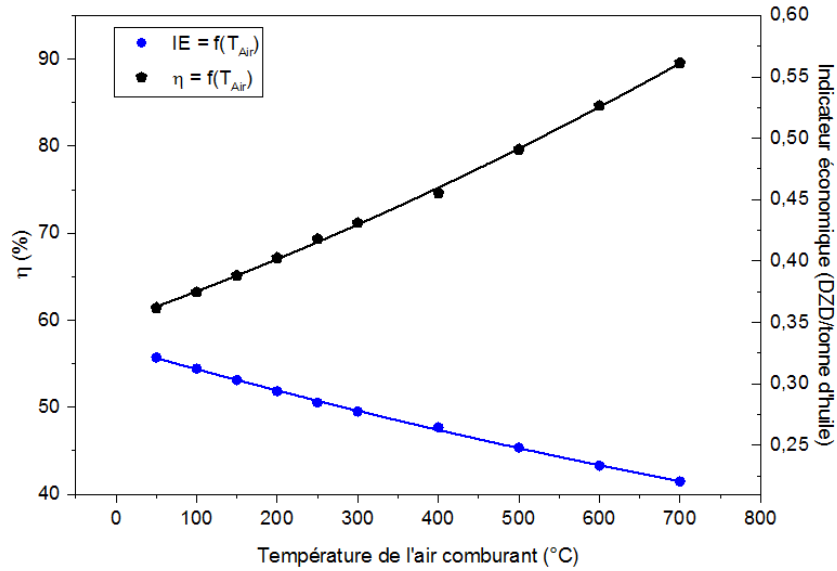


Figure IV.9 : IE et η en fonction de la température de l'air comburant

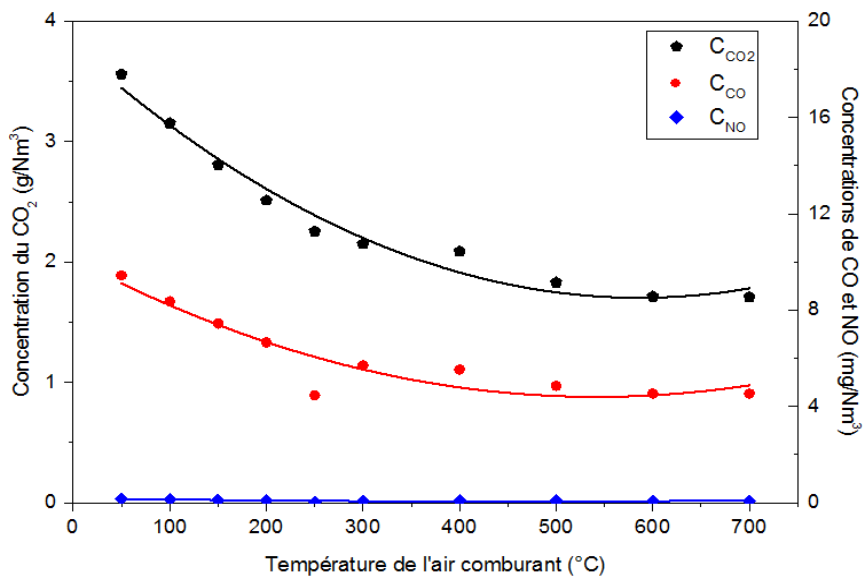


Figure IV.10 : Concentrations des polluants en fonction de la température de l'air comburant

IV.1.3.6 Effet du coefficient de transfert thermique U_4 sur les indicateurs de performance

La figure IV.11 illustre la variation de l'indicateur économique (IE) et du rendement (η) en fonction du coefficient de transfert de chaleur global U_4 dans la zone de convection. On constate que l'IE augmente avec l'augmentation du coefficient U_4 , ce qui engendre l'augmentation des pertes thermiques dans la zone de convection et en conséquence, la diminution du rendement énergétique du four. D'autre part, les concentrations des polluants (figure IV.12) deviennent significatives au-delà d'une valeur U_4 de 20 W/m² K. Ceci peut être aussi expliqué par l'insuffisance des cinétiques de formation des polluants utilisées dans notre cas d'étude.

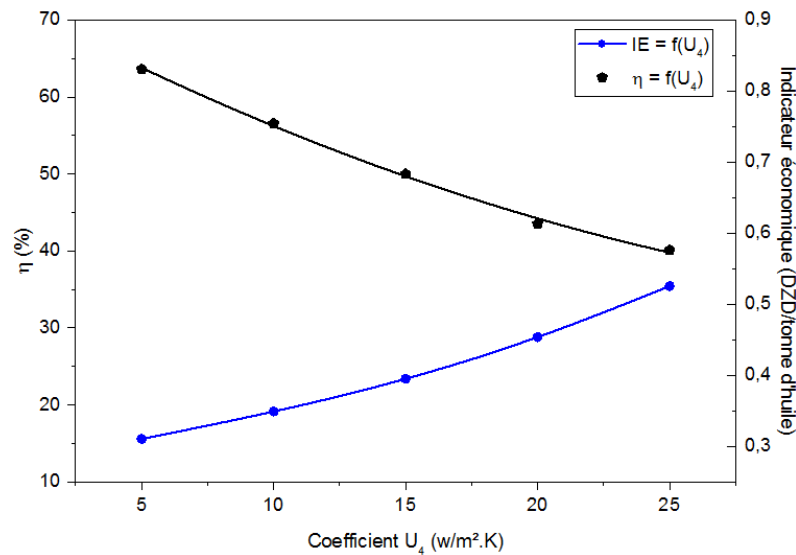


Figure IV.11 : IE et η en fonction du coefficient U_4

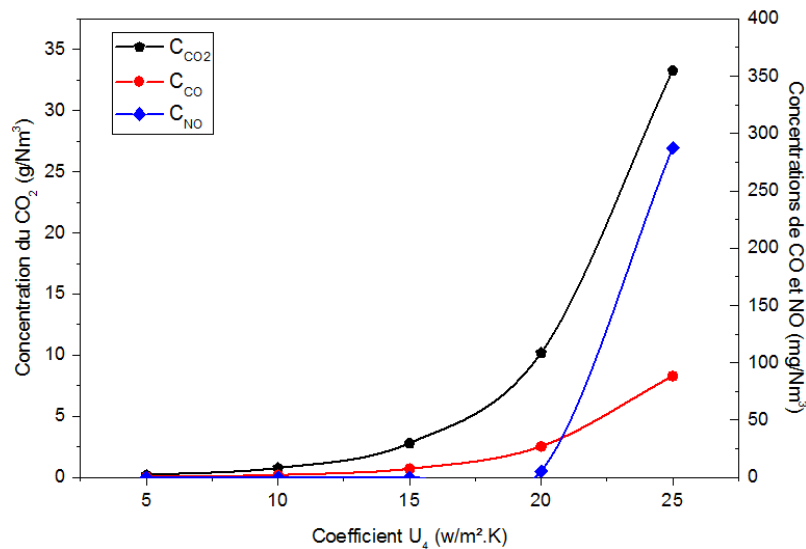


Figure IV.12: Concentrations des polluants en fonction du coefficient U_4

IV.2 Optimisation des Indicateurs de Performance

IV.2.1 Contexte général de l'optimisation [26]

Aujourd'hui, tous les systèmes susceptibles d'être décrits par un modèle mathématique peuvent être optimisés. Grâce à l'optimisation, on peut trouver la conception optimale d'un tel système, sans la nécessité d'examiner tous les cas possibles et comment chaque cas affecte la conception optimale souhaitée. Afin de faciliter la compréhension de principe de l'optimisation, quelques définitions fondamentales qui sont liées à un problème d'optimisation doivent être présentées. Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée [28]

- ***Fonction objective***

C'est le nom donné à la fonction f (on l'appelle aussi fonction de coût ou critère d'optimisation). C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (trouver un optimum) [28]. La fonction objective représente le but à atteindre pour le décideur.

- ***Variables de décision***

Les variables de décision sont des quantités numériques pour lesquelles des valeurs sont à choisir. Cet ensemble de n variables est appelé vecteur de décision : (x_1, x_2, \dots, x_n) . Les différentes valeurs possibles prises par les variables de décision x_i constituent l'ensemble des solutions potentielles.

- ***Algorithme d'optimisation***

Un algorithme d'optimisation est une procédure mathématique qui permet d'obtenir le minimum ou le maximum de la fonction.

IV.2.1.1 Optimisation mono-objective

L'optimisation mono-objectif se base sur la minimisation (ou la maximisation) d'une seule fonction objective. Dans ce cas la solution optimale est clairement définie, c'est celle qui a le coût optimal (minimal ou maximal). De manière formelle, à chaque instance d'un tel problème est associé un ensemble Ω des solutions potentielles respectant certaines contraintes et une fonction objectif $f : \Omega \rightarrow \Psi$ qui associe à chaque solution admissible $s \in \Omega$ une valeur $f(s)$. Résoudre l'instance (Ω, f) du problème d'optimisation consiste à trouver la solution optimale $s^* \in \Omega$ qui optimise (minimise ou maximise) la valeur de la fonction objective f .

IV.2.1.2 Optimisation multi-objective

La plupart des problèmes d'optimisation réels sont décrits à l'aide de plusieurs objectifs ou critères souvent contradictoires devant être optimisés simultanément. L'optimisation multi-objectif permet de rechercher les valeurs des variables d'un problème qui maximisent ou minimisent plusieurs fonctions objectives simultanément. Contrairement à l'optimisation mono-objectif, la solution d'un problème multi-objectif (PMO) n'est pas une solution unique, mais un ensemble de solutions qui sont des compromis, cet ensemble est généralement dénommé l'ensemble des solutions optimales de Pareto (figure IV.13).

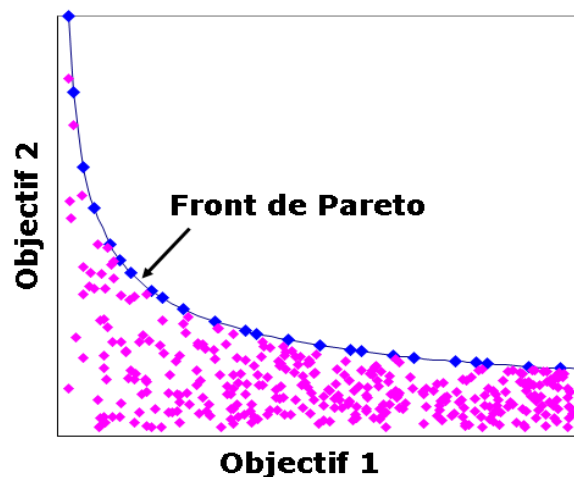


Figure IV.13 : Frontière de Pareto d'un problème d'optimisation bi-objectif

IV.2.1.3 Optimisation par essaim particulaire

Plusieurs techniques de recherche ont été proposées dans la littérature pour traiter des problèmes d'optimisation mono-objective et multi-objective. Parmi ces méthodes, les algorithmes génétiques, la méthode de recuit Simulé, la recherche Taboue, et l'optimisation par essaim de particules. Pour le système considéré dans cette étude, la technique d'optimisation par essaim particulaire est utilisée comme outil d'optimisation (figure IV.14). Malgré son jeune âge, cette technique a été appliquée avec succès à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie [29, 30] et elle est actuellement en plein essor.

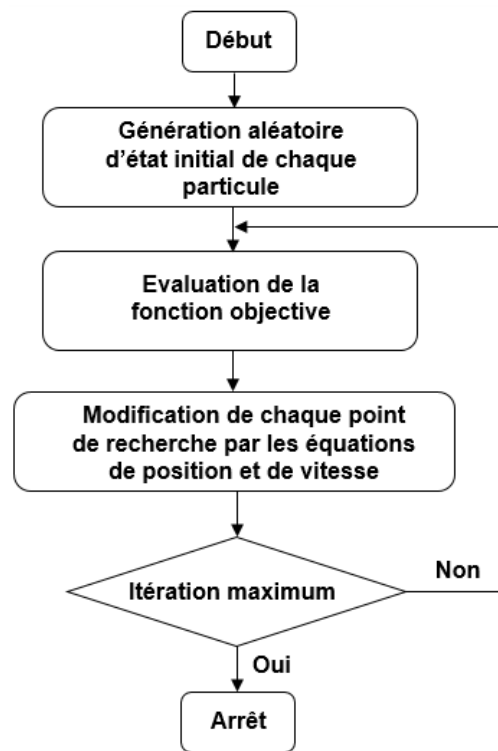


Figure IV.14 : Organigramme général de PSO

IV.2.2 Optimisation mono-objective des indicateurs de performance

Les variables de décision sélectionnées pour l'optimisation monocritère de chaque indicateur de performance sont le débit massique du fuel gas (\dot{m}_{FG}), le débit massique d'huile (\dot{m}_{Huile}), et la température de l'air comburant (T_{Air}). Par contre, les paramètres opératoires fixes sont le pouvoir calorifique inférieur du fuel gas (PCI) et la masse volumique de ce dernier ($\rho_{Fuel\ gas}$).

Le tableau IV.1 résume le domaine de variation des paramètres opératoires utilisés pour l'optimisation monocritère.

Tableau IV.1 : Domaine de variation des paramètres opératoires pour l'optimisation monocritère

Variable	Domaine de variation
Débit du fuel gas (kg/h)	150 – 400
Débit d'huile (kg/h)	1345000 – 1445000
Température de l'air comburant (°C)	50 – 700

IV.2.2.1 Optimisation de l'indicateur économique IE :

Le point optimal de l'indicateur économique de performance ajuste une valeur de **0,2579 DZD/tonne d'huile**, le positionnement de ce point est représenté en figure IV.15 ci-dessous.

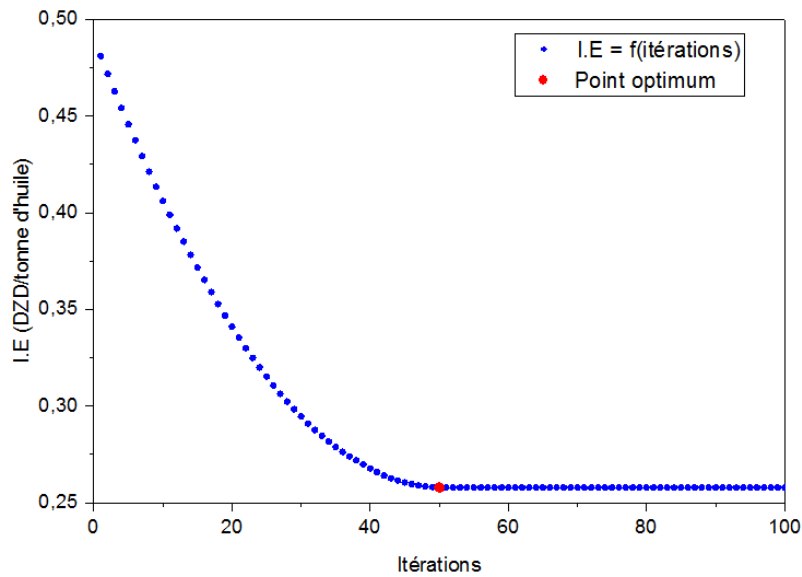


Figure IV.15 : Courbe de PSO pour l'optimisation de l'IE

IV.2.2.2 Optimisation du facteur d'émission équivalent F_{CO_2} :

Le point optimal du facteur d'émission F_{CO_2} ajuste une valeur de **0,0250 g CO_2 /tonne d'huile**, le point optimal F_{CO_2} est représenté en figure IV.16 ci-après.

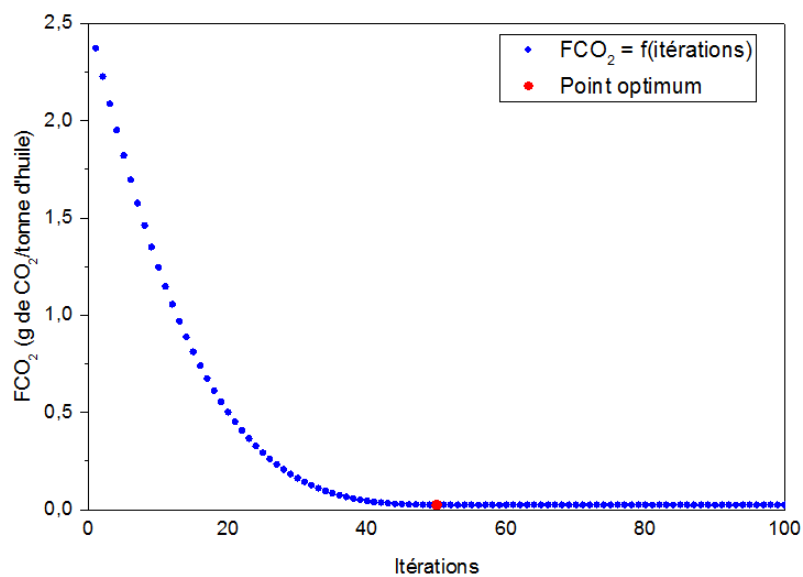


Figure IV.16 : Courbe de PSO pour l'optimisation de F_{CO_2}

IV.2.2.3 Optimisation du rendement du four η :

Le point optimal du rendement énergétique ajuste une valeur de **96,63 %**, la position de ce point est donné en figure IV.17.

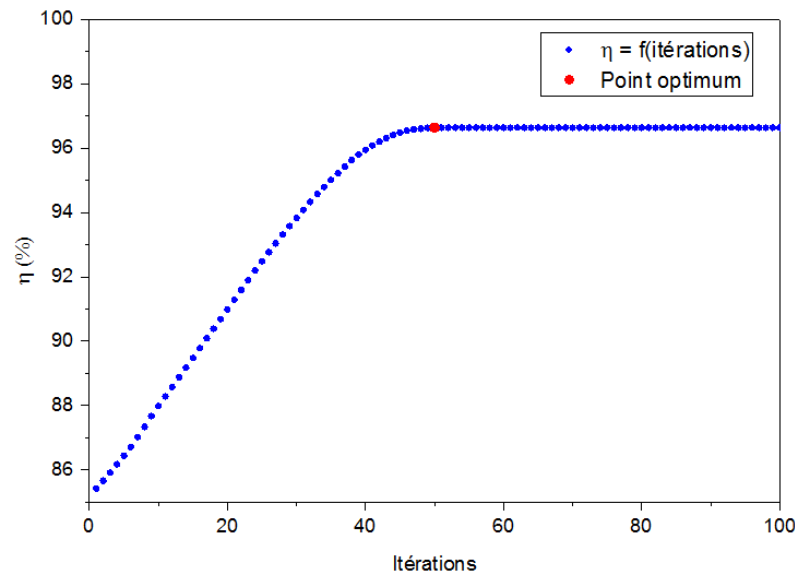


Figure IV.17 : Courbe de PSO pour le rendement du four

Le tableau IV.2 rassemble les valeurs des paramètres opératoires donnant les indicateurs optimaux monocritères de performance. Pour le rendement (η) et le facteur d'émission (F_{CO_2}), on constate que leur optimisation a été obtenue pour des mêmes valeurs des paramètres décisifs, ce qui montre que l'optimisation d'un critère entraîne l'optimisation de l'autre. Par contre, pour l'optimisation de l'indicateur économique (IE), le préchauffage de l'air comburant intervient dans la minimisation de ce critère.

Tableau IV.2 : Valeurs des paramètres donnant les indicateurs optimaux

Variable	IE optimal = 0,2579 DZD/tonne d'huile	F_{CO_2} optimal = 0,025 g CO_2 /tonne d'huile	η optimal = 96,63%
Débit du fuel gas (Kg/h)	150	150	150
Débit d'huile (Kg/h)	1445000	1445000	1445000
Température d'air ($^{\circ}C$)	207,7	50	50

IV.2.2.4 Optimisation multicritère des indicateurs de performance :

Les variables de décision et leur domaine de variation, considérées pour l'optimisation multicritère sont les mêmes que celles de l'optimisation monocritère. Les résultats de

cette optimisation dans laquelle les trois indicateurs de performance sont considérés simultanément sont représentés en figure IV.18. La figure montre que les solutions trouvées sont bien réparties sur le front de Pareto. La valeur optimale multicritère ainsi que les paramètres opératoires correspondants au point final sélectionné par la procédure FCPRN sont données au tableau IV.3 ci-dessous. On constate que la considération simultanée des trois critères en interaction dans l'optimisation conduit à un optimum différent de ceux obtenus par l'optimisation de chaque critère pris seul indépendamment.

Tableau IV.3: Valeur optimale multicritère et paramètres opératoires correspondants

Indicateur de performance	Point optimal
IE (DZD/tonne d'huile)	0,2582
FCO ₂ (g CO ₂ /tonne d'huile)	0,0929
η (%)	89,37
Débit du fuel gas (kg/h)	150
Débit d'huile (kg/h)	1445575
Température de l'air comburant (°C)	482,7642

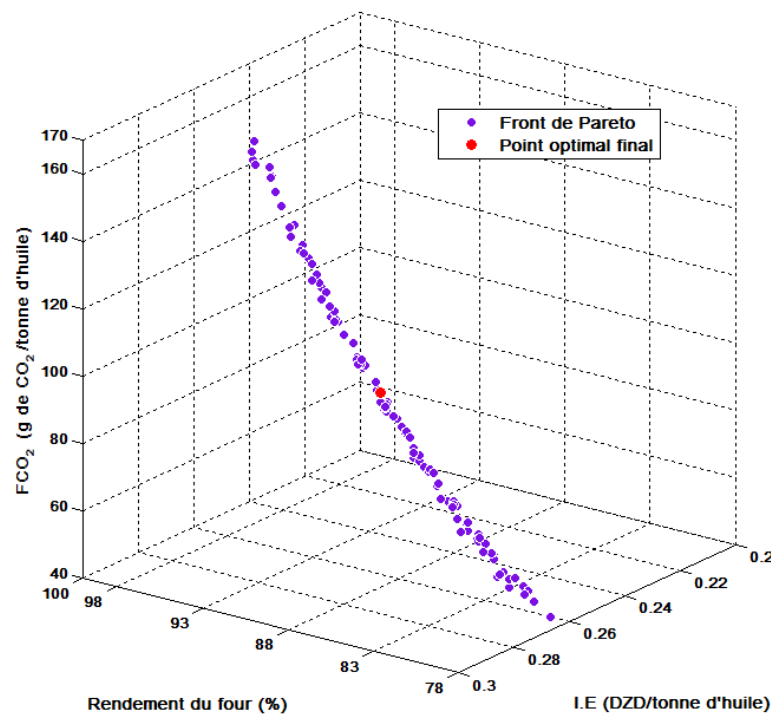


Figure IV.18 : Front de Pareto d'optimisation multicritère

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été réalisé après avoir effectué un stage pratique qui a duré plus de 2 mois au niveau du site **Sonatrach** situé dans la région de Rhourde-Nouss de la wilaya d'Illizi. Ceci nous a permis de mieux comprendre le processus industriel de traitement de gaz naturel et d'acquérir des compétences professionnelles.

Le but de ce travail est d'étudier l'effet des paramètres opératoires du fonctionnement du four industriel de chauffage d'huile caloporteuse sur la sensibilité des performances énergétique, économique et environnementale de ce système.

Le modèle utilisé dans cette simulation est développé à partir des bilans massiques, thermiques, ainsi que les cinétiques de formation des polluants générés lors de la combustion du fuel gas. Le modèle est validé par des analyses des produits de combustion et des mesures de température du fluide à la sortie du four effectués in situ. Il permet ensuite d'effectuer une étude d'optimisation du four pour déterminer les conditions de fonctionnement optimales.

De la multitude des algorithmes d'optimisation disponibles, nous avons choisi de tester l'algorithme à essaim de particules qui est l'un des algorithmes les plus cités dans la littérature. Ainsi, deux optimisations ont été réalisées afin de minimiser le coût de traitement d'huile, le facteur d'émission de CO₂ et de maximiser le rendement énergétique du four. La première optimisation est monocritère où chaque critère est considéré seul, la seconde prend en compte les trois critères simultanément afin d'avoir le meilleur compromis possible.

A travers les résultats obtenus pour les deux optimisations, nous avons constaté que l'optimisation multicritère est une démarche très importante dans la conception et la conduite des fours industriels. Elle permet de considérer plusieurs objectifs simultanément et présente en sortie l'ensemble des solutions possibles qui révèlent être les différents compromis entre les objectifs considérés.

En outre, les résultats obtenus par le modèle nous permettent pas d'apprécier l'utilisation et l'ajustement des cinétiques de formation des polluants obtenus expérimentalement pour la combustion du méthane dans un lit fluidisé [20] dans la simulation du four de réchauffage d'huile étudié.

Par ailleurs, il s'est avéré par l'étude paramétrique que le débit du fuel gas, le débit et la température de l'air comburant ont une influence très importante sur l'indicateur économique IE, le rendement énergétique η et les concentrations des polluants. Par contre, les autres paramètres n'affichent qu'une légère influence sur la variation des trois critères de performance.

Enfin, l'étude présentée dans ce mémoire se situe dans un domaine d'actualité, de nouvelles idées peuvent être proposées et suggérées pour la continuation de l'avancement de ce travail telles que :

- L'utilisation des modèles cinétiques de combustion du gaz naturel spécifiques au four étudié pour permettre de quantifier réellement les émissions des polluants émis par ce procédé
- L'étude d'incorporation d'une unité de préchauffage d'air comburant par les fumées de combustions sortantes de la cheminée afin d'augmenter le rendement énergétique du four, la diminution de l'indicateur économique et les émissions des polluants.
- Elargir cette approche d'étude à d'autres procédés et installations industrielles

ANNEXE

Paramètres opératoires du four d'huile caloporteuse

Date	Heure	T _{air ambiant} (°C)	Température en zone de convection (°C)	T des fumées (°C)	T de l'huile (entrée) (°C)	T de l'huile (sortie) (°C)	Débit fuel gas (Kg/h)	Débit d'huile (Kg/h) 10 ⁻⁶
27/02/2018	8h	19,25	343,9	179,6	137,03	142,9	202,135	1,353
	18h	22,7	343,9	177,4	136,64	142,8	207,987	1,345
28/02/2018	8h	12,6	334,8	179,5	136,51	142,27	200,67	1,358
	18h	26,22	342,8	178,5	136,49	142,27	208,85	1,354
01/03/2018	8h	16,8	340,8	177,9	135,22	141,05	200,131	1,353
	18h	32,46	347,7	177,8	136,67	142,58	209,147	1,353
02/03/2018	8h	19,46	339,9	180,3	136,86	142,78	201,346	1,347
	18h	27,82	344,9	178,7	136,55	142,55	207,77	1,354
03/03/2018	8h	19	344,3	179,7	136,27	142,34	200,686	1,352
	18h	28,88	345,7	178,6	136,71	142,65	207,714	1,352
04/03/2018	8h	20,98	345,9	179,6	136,59	142,59	200,171	1,353
	18h	28	346,4	177,4	136,24	142,38	207,166	1,356
05/03/2018	8	17,3	340,9	179,2	136,14	142,09	201,056	1,354
	18h	27,47	346,3	178,2	135,53	141,48	207,424	1,353

Résultats de l'analyse des gaz de combustion

Temps (s)	T _{amb} (°C)	T _{gaz} (°C)	CO (mg/Nm ³)	NO ₂ (mg/Nm ³)	NO (mg/Nm ³)	C _x H _y (mg/Nm ³)	CO ₂ (g/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)
8	25,1	181	25,66	0,131	16,04	0	13,32	16,43
50	25,3	181	26,17	0,131	15,90	0	13,51	16,03
70	25,4	181	26,17	0,196	15,50	0	13,37	15,70
90	25,5	181	27,18	0,196	15,11	0	13,35	15,30
110	25,5	181	28,20	0,196	14,31	12,03	13,27	14,51
130	25,4	181	26,42	0,262	14,71	36,11	13,50	14,97
150	25,3	181	24,39	0,327	14,71	56,18	13,58	15,03
170	25,3	181	25,40	0,392	14,31	86,27	13,48	14,70
190	25,3	181	26,17	0,458	14,31	114,36	13,51	14,77
210	25,4	181	26,17	0,523	14,51	138,44	13,45	14,03
230	25,4	181	27,69	0,523	13,11	168,54	13,40	13,64
250	25,4	181	27,18	0,588	13,11	186,60	13,47	13,70
270	25,5	181	28,45	0,654	13,11	208,67	13,41	13,77
290	25,5	181	27,94	0,719	13,11	224,72	13,39	13,83
310	25,4	181	27,69	0,719	13,11	236,76	13,61	13,83
435	25,4	181	28,20	1,046	11,91	294,95	13,61	12,96

443	25,4	181	28,20	1,046	11.91	298,96	13,58	12,96
451	25,5	181	27,94	1,046	11.91	300,97	13,52	12,96
453	25,5	181	27,44	1,046	11.91	300,97	13,53	12,96
479	25,5	181	28,45	1,112	11.52	311	13,48	12,63
515	25,5	181	27,44	1,117	11.52	315,01	13,47	12,69
535	25,6	181	26,17	1,117	11.52	311	13,68	12,69
555	25,6	181	26,17	1,117	11.52	308,99	13,64	12,69

Estimation du coefficient de transfert de chaleur global U_4 entre les fumées et le milieu extérieur dans la zone de convection

1- Détermination du coefficient de transfert de chaleur coté fumées h_{int} :

La formule donnée par l'équation (3.13) [21] est utilisée pour l'estimation de h_{int} tel que :

$$h_{int} = \frac{Q}{L_3 \times (T_{gaz} - T_{paroi}) + \sigma \times L_3 \times \varepsilon_{paroi} \times \varepsilon_{gaz} \times (T_{gaz}^4 - T_{paroi}^4)}$$

2- Coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance h_{ext} ou k_e :

Pour une température de la paroi externe de la zone de convection prise égale à $T_e = 55$ °C, le coefficient h_{ext} (k_e) peut être déterminé par extrapolation de T_e sur l'abaque (figure III.4) introduit dans le chapitre III.

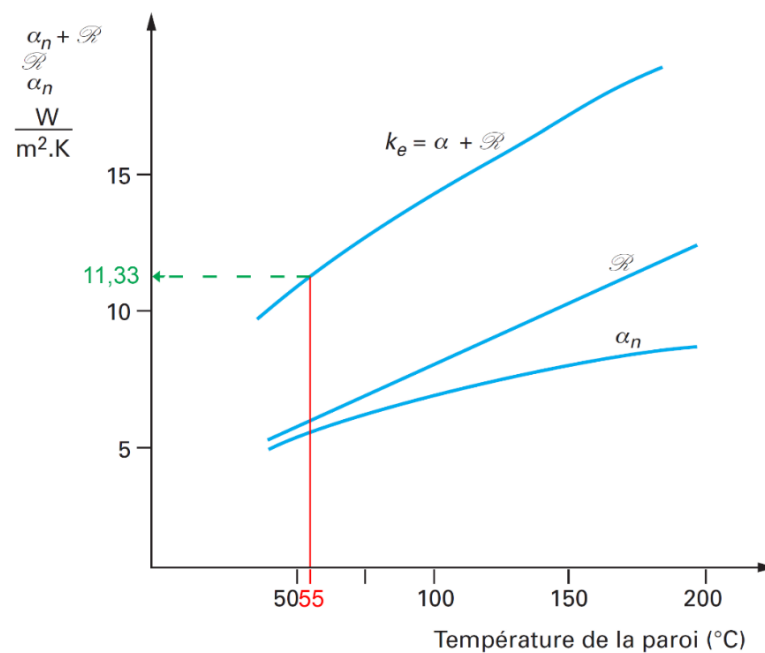


Figure : Abaque de détermination de k_e

3- Résistance due à la conduction sur les parois de la zone de convection

L'équation suivante (3.12) permet de déterminer la résistance de transfert thermique due à la conduction entre les parois interne et externe dans la zone de convection :

$$R_{\text{conduction}} = \frac{\sum e_i}{\lambda_i}$$

Enfin, le coefficient global U_4 entre les fumées dans la zone de convection et le milieu externe peut être déterminé par l'équation (3.11) suivante :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + R_{\text{conduction}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}}$$

Principe de l'approche FCPRN

Afin d'établir le meilleur compromis entre les trois critères, la méthode d'aide à la décision FCPRN (Fuzzy Cardinal Priority Ranking Normalized) est utilisée dans cette étude. Cette méthode est basée sur le classement des solutions de front de Pareto. Pour cela, une fonction d'appartenance normalisée doit être calculée. Le principe de cette méthode est décrit comme suit [31, 32] :

1. Pour chaque fonction objective, trouver f_i^{\max} et f_i^{\min}
2. Modéliser chaque solution suivant chaque objectif par une fonction d'appartenance définie par :

$$\mu_i^j = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i^j}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\max} \leq f_i \leq f_i^{\max} \\ 0 & f_i \geq f_i^{\max} \end{cases}$$

3. Pour chaque solution Pareto, normaliser la fonction d'appartenance par l'expression suivante :

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i^j}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \mu_i^j}$$

Où M et N représentent le nombre de solutions Pareto et le nombre des objectifs. Le meilleur compromis est la solution dont la fonction d'appartenance normalisée est maximale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Richard TILAGONE, Bertrand LECOINTE, Techniques de l'ingénieur, Article : Gaz naturel- Énergie fossile, Réf : BM 2591 v1, 10 juillet 2014
- [2] Key World Energy Statistics 2017 », AIE - www.iea.org - Rapport de 2017
- [3] (IEA, Key World Energy Statistics, International Energy Agency, www.iea.org, (August 2011) – Rapport de 2011).
- [4] (AIE 2016 : Agence d'information sur l'énergie www.iea.org - Rapport de 2016)
- [5] BALIOUZE Khadidja, Mémoire de master “Stratégie et développement de l'industrie gazière à l'horizon 2040”, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2014
- [6] <http://crudeoilpeak.info/crude-oil-peak-in-algeria>
- [7] Manuel Opérateur du CPF, volume I (description du procédé) SONATRACH, SNC LAVALAIN, installations de traitement de Rhourde Nouss QH
- [8] LAMIRI Kamel, ISSIAKHEM Mourad, TOUIL Djamel, rapport d'audit énergétique unité CPF de RHOURE NOUSS, APRUE 2016
- [9] <https://www.ametek-land.com>
- [10] Jean-Pierre WAUQUIER, Raffinage du pétrole Tome 2 (Procédés de séparation), Edition TECHNIP 1998
- [11] ZdeněkJegla , JiříVondál,JiříHájek , Article :Standards for fired heater design : An assessment based on computational modelling , ScienceDirect, Volume 89, 5 October 2015, Pages 1068-1078
- [12] Analyses des fumées du four T20, laboratoire UTBS, SONATRACH, division production, direction régionale Hassi-Messaoud direction exploitation service contrôle, aout 2016
- [13] Ramirez W.F, Logiciel MathWorks MATLAB, Computational Methods for Process Simulation, Second Edition Page 53
- [14] Jean-Pierre WAUQUIER le pétrole, RAFFINAGE ET GENIE CHIMIQUE Tome 1, Edition 1972, page 306)
- [15] Gavin Towler, Ray Sinnott, Chemical Engineering Design Principles, Practice and Economics of plant and process Design, Second Edition. Pages 1181 & 1182

- [16] Haslam R. T. and M. W. Boyer, “Radiation from luminous flames Department of chemical engineering”, Massachusetts institute of technology, Cambridge, Mass ,1927
- [17] <https://www.sigmathermal.com/direct-fired-heaters/>
- [18] Jean-Paul GOURLIA, Technique de l’ingénieur, Article : Modélisation en génie des procédés REF. J1022, 10 mars 2008
- [19] Isidore JACUBOWIEZ, Technique de l’ingénieur, Article : Fours industriels réf. BE 8842, 10 janvier 1998
- [20] D. Touil, M. Fedailaine et S. Belaadi, K. Moussi, Modèle d’échange d’énergie et de matière dans un four rotatif, incluant la combustion, 2013
- [21] Pascaline PRE-GOUBELLE, “Contribution à l’étude expérimentale et a la modélisation de la combustion du gaz naturel en réacteur a lit fluidisé” Thèse doctorale, institut national polytechnique de Toulouse, 1997
- [22] [Baskakov A.P, Berg B.V, Vitt O.K, Filipbvsy N.F, Kikakoshyan V.A, Goldobin J.M, Maskaev V.K, 'Heat transfer to objects immersed in a fluidized bed', Powder Techn., 8, 273, (1973).]
- [23] [Borisov A.A, Dragalova E.V, Lisyanskii V.V, Skachkov G.I, Zamanskii V.M, ”Kinetics and mechanism of methane oxidation at high temperature”, Oxidation Communication, 4, 45, (1983).
- [24] Centre national de la recherche scientifique CNRS.FR, Propriétés dynamiques des fronts de flammes (PDF téléchargeable sur le site <http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/Archives-1975-1989/1980-81/1980-81-22-26.pdf>)
- [25] Commission de Régulation de l’Electricité et du Gaz (CREG) Recueil des textes législatifs et réglementaires - Textes publiés à fin juillet 2008
- [26] Zineb FERGANI, “Optimisation paramétrique d’un cycle organique de Rankine pour la récupération énergétique des gaz de rejets d’une cimenterie, thèse doctorale (université Saad Dahleb de Blida) 2016
- [27] Benabid, R., “Optimisation multiobjectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques”, Mémoire de Magister, Université Amar Telidji, Laghouat, (2007.)

- [28] Chalermchaiarbha, S. et Ongsakul, W., “Elitist Multi-objective Particle Swarm Optimization with Fuzzy Multi-attribute Decision Making for Power Dispatch”, *Electric Power Components and Systems*, V.40, n° 14, (October 2012), 1562–1585.
- [29] Li, M., Wang, J., Li, S., Wang, X., He, W. and Dai, Y., “Thermo-economic analysis and comparison of a CO₂ transcritical power cycle and an organic Rankine cycle”, *Geothermics*, V. 50, (April 2014), 101–111.
- [30] Sayyaadi, H., Babaie, M. and Farmani, M.R., “Implementing of the multi-objective particle swarm optimizer and fuzzy decision-maker in exergetic, exergoeconomic and environmental optimization of a benchmark cogeneration system”, *Energy*, V. 36, n° 8, (August 2011), 4777–4789.
- [31] Tan, Y., Shi, Y. and Coello, C. C., (2014), “Advances in Swarm Intelligence”, 5th International Conference, Proceedings, Part I, ICSI, Hefei, China, (October 2014).
- [32] Panigrahi, B.K., Pandi, V.R., Sharma, R. and Das, S., “Multiobjective bacteria foraging algorithm for electrical load dispatch problem”, *Energy Conversion and Management*, V. 52, n° 2, (February 2011), 1334–1342.