

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique

Département Génie Chimique

Mémoire du Projet de Fin d'Études d'Ingénieur

**VÉRIFICATION ET OPTIMISATION D'UN FOUR DE
REBOUILLAGE SUITE À L'APPARITION
D'UN PHÉNOMÈNE DE CONDENSATION**

Proposé par :

Mr L.BRAHIMI

Présenté par:

Mounir BOUDRIFA
Hamza Nazim AGRANE

Dirigé par :

Mme F.MEZIANI
Mme S.HADDOUM
Mr L.BRAHIMI

Soutenu le 1 Juillet 2010 devant le jury composé de :

Mr C.E.CHITOUR
Mme F.SOUAHI
Mr A.SELATNIA
Mme F.MEZIANI
Mme S.HADDOUM
Mr L.BRAHIMI

Professeur à ENP
Professeur à ENP
Professeur à ENP
Chargée de cours à ENP
Chargée de cours à ENP
Directeur du Champ BRN

Président
Examinatrice
Examinateur
Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur

Promotion 2010

À mes parents, puisse dieu me les garder,

À mes chères sœurs,

À mes amis,

À toutes les personnes qui comptent pour moi,

Je dédie ce travail.

Mounir

À mes parents, ma sœur, mes amis et toute ma famille,

À mes camarades et mes enseignants,

À tous ceux qui me sont chers,

Je dédie ce travail.

Nazim

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord Madame F.Meziani et Madame S.Haddoum, nos promotrices et enseignantes au Département Génie Chimique à l'École Nationale Polytechnique pour nous avoir encadré, orienté et conseillé tout au long de notre projet.

Nous tenons aussi à remercier le Professeur C.E.Chitour d'avoir accepté de présider le jury, ainsi que les Professeurs A.Selatnia et F.Souahi pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions également Monsieur L.Brahimi, l'initiateur de ce projet, pour son accueil, et les moyens mis à notre disposition

Nos remerciements s'adressent aussi à Messieurs : Abderrahmani, Boucenna, Hazmoune, Herouini, Bouadjmine, les ingénieurs process au Groupement Sonatrach-AGIP, ainsi que tous les travailleurs du département exploitation (chefs de département, chefs de service, superviseurs, et opérateurs...) qui ont fait de ce stage un moment agréable.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet.

ملخص:

الهدف من وراء هذا العمل هو تحديد مصدر مشكل تكاثف الماء في فرن معالجة البترول الخام، و إيجاد حل نهائي. من أجل ذلك، قمنا في البداية بتقييم المردود الحراري للفرن. بعد ذلك، إعتدنا على الملاحظات الفيزيائية التي قمنا بها من أجل تأسيس نظريتنا بخصوص هذا المشكل، و إقتراح الحلول المناسبة. في النهاية، قمنا بإقتراحات من أجل تحسين مردودية الفرن.

الكلمات المفتاحية:

المردود الحراري، تكاثف الماء، العازل الحراري، الكثافة، المسامية.

Résumé :

Notre travail a pour but d'identifier la source du problème de condensation d'eau dans un four de rebouillage, et d'y trouver une solution définitive. Pour répondre à ces objectifs, nous avons au début effectué un calcul du rendement thermique du four. Ensuite, nous nous sommes basés sur des constatations physiques pour fonder notre hypothèse et proposer à la fin des solutions. Dans la dernière partie, nous avons proposé des changements pour réduire la consommation du four.

Mots clés :

Rendement thermique, condensation d'eau, calorifuge, porosité.

Summary:

The purpose of our work is to identify the source of the water condensation in the reboiler heater, and to find a permanent solution. To reach these objectives, we have firstly calculated the heater efficiency. After that, we have used our physical observations to make our hypothesis, and then suggested some appropriate solutions. At the end, we have suggested some changes in order to optimize the heater efficiency.

Key words:

Thermal efficiency, water condensation, heat-insulating, porosity.

Sommaire

LISTE DES FIGURES	I
LISTE DES TABLEAUX	II
INTRODUCTION	1
PREMIER CHAPITRE : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET SES SOCIÉTÉS MÈRES.....	2
I. LA SONATRACH	3
I.1. Ses Activités	3
I.2. Sonatrach dans le monde.....	8
I.3. Sonatrach en chiffre	9
II. ENI.....	10
II.1. Historique.....	10
II.2. Filiales	11
III. LE GROUPEMENT SONATRACH-AGIP	12
III.1. Organisation	13
DEUXIEME CHAPITRE : LE CENTRE DE TRAITEMENT D'HUILE ET PRESENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE.....	14
I. CENTRE DE TRAITEMENT D'HUILE (CTH).....	15
I.1. Situation géographique.....	15
I.2. Ses activités.....	15
I.3. Description du procédé	16
I.4. Historique du champ de Bir Rebaâ Nord (BRN).....	19
II. CADRE DU PROJET ET PROBLEMATIQUE.....	20
II.1. Cadre du projet	20
II.2. Problématique.....	20
II.3. Méthode et planning de travail	22
TROISIEME CHAPITRE : PARTIE THEORIQUE	23
I. LES FOURS TUBULAIRES	25
I.1. Introduction	25
I.2. Généralités	25
I.3. Description d'un four tubulaire	25
I.4. Les différents types de fours	27
I.5. La constitution d'un four tubulaire	29
I.6. Le rendement thermique des fours tubulaires.....	33
II. CALCUL DES FOURS TUBULAIRES.....	36
II.1. Étude de la combustion.....	36
II.2. Calculs thermique.....	38
II.3. L'hydrodynamique dans le four.....	40
II.4. Calculs mécaniques des structures.....	42
III. CONTROLE ET MARCHE DES FOURS	43
QUATRIEME CHAPITRE : VÉRIFICATION DU FOUR ÉTUDIÉ.....	44
I. DESCRIPTION DU FOUR ETUDIÉ	46
II. DIMENSIONS ET CARACTERISTIQUES.....	47
III. CALCULS D'APRÈS LES DONNÉES DU CONSTRUCTEUR (DESIGN).....	48
III.1. Quantité de chaleur absorbée par le brut.....	48

III.2. Quantité de chaleur dégagée par le combustible	49
III.3. Quantité de chaleur des fumées sortant par la cheminée	51
III.4. Perte de chaleur par les parois	53
IV. CALCUL D'APRES LES DONNEES ACTUELLES	54
IV.1. Quantité de chaleur absorbée par le brut	55
IV.2. Quantité de chaleur dégagée par le combustible	56
IV.3. Quantité de chaleur des fumées sortant par la cheminée	57
IV.4. Perte de chaleur par les parois	58
V. CONCLUSION	59
CINQUIEME CHAPITRE : IDENTIFICATION DE LA CAUSE DE LA CONDENSATION ET PROPOSITION DE SOLUTIONS	60
I. L'EXPLICATION DU PHENOMENE DE CONDENSATION	61
I.1. Hypothèse	61
I.2. Vérification de l'hypothèse	61
I.3. Conclusion	64
II. L'ISOLATION THERMIQUE DES PAROIS VERTICALES DU FOUR	65
II.1. Les normes API	65
II.2. La fibre céramique actuelle	65
II.3. Comparaison	66
III. ÉCOULEMENT DES FUMÉES DANS LE FOUR	67
IV. ÉTUDE DE LA SOLUTION DU CONSTRUCTEUR	68
IV.1. Avantage	68
IV.2. Inconvénients	68
V. SOLUTIONS PROPOSÉES	70
V.1. Changement du calorifuge de la zone de radiation	70
V.2. Déposition d'une barrière à vapeur	70
V.3. Pose de déflecteurs	71
VI. CONCLUSION	73
SIXIEME CHAPITRE : OPTIMISATION DU FOUR ÉTUDIÉ	74
I. LES REACTIONS DE COMBUSTION	76
II. L'EFFICACITE THERMIQUE	81
III. DETERMINATION DE LA HAUTEUR DE LA FLAMME	85
IV. LE SOUTIRAGE DE L'AIR	86
V. ÉVALUATION ECONOMIQUE DU FOUR	86
VI. CONCLUSION	87
CONCLUSION GENERALE	88
ANNEXES	89
ANNEXE I : COMPOSITION DU FUEL GAZ	90
ANNEXES II : LES DIFFÉRENTS TYPES DE DISPOSITION DE BRÛLEURS	91
ANNEXES III : NORMES CONCERNANT LA FIBRE CÉRAMIQUE	92
ANNEXES IV : LA TENSION DE VAPEUR DE L'EAU EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE	93
BIBLIOGRAPHIE	94
AUTRE DOCUMENTS CONSULTÉS	94

Liste des figures

FIGURE 1: SITUATION DES GISEMENTS D'HUILE ET DE GAZ.....	4
FIGURE 2: RESEAU DE TRANSPORT PAR CANALISATIONS.....	5
FIGURE 3: SITUATION DES INSTALLATIONS ET PROJETS DE L'ACTIVITE AVAL	7
FIGURE 4: ROUTES D'EXPLOITATION GN-GNL	8
FIGURE 5: LES ACTIVITES DE SONATRACH DANS LE MONDE.....	9
FIGURE 6: ORGANIGRAMME DU GROUPEMENT SONATRACH-AGIP.....	13
FIGURE 7: SITUATION GEOGRAPHIQUE DU CTH	15
FIGURE 8: CHAMPS PETROLIFERES & PUIITS ALIMENTANT LE CTH.....	16
FIGURE 9: SCHEMA SYNOPTIQUE DU TRAIN 3	18
FIGURE 10: LE FOUR DE REBOUILLAGE DU TRAIN 3	20
FIGURE 11: RUISSELEMENT DU CONDENSAT ENTRE LA PAROI ET LE CALORIFUGE.....	21
FIGURE 12: LES EQUIPEMENTS DE REGULATION DETERIORES PAR LA CONDENSATION	21
FIGURE 13: DEBORDEMENT DE L'EAU SUR LE SOL	21
FIGURE 14: SCHEMA DESCRIPTIF D'UN FOUR TUBULAIRE	26
FIGURE 15: FOURS CYLINDRIQUES VERTICAUX	29
FIGURE 16: FAISCEAUX TUBULAIRES EN ZONE DE RADIATION	29
FIGURE 17: CALORIFUGEAGE EN FIBRES CERAMIQUES.....	31
FIGURE 18: BRULEURS EN MARCHÉ	32
FIGURE 19: BRULEUR ETEINT ET SON OUVREAU	32
FIGURE 20: VUE EXTERIEUR D'UN BRULEUR.....	33
FIGURE 21: SCHEMA FONCTIONNEL D'UN BRULEUR	33
FIGURE 22: ETUDE ECONOMIQUE D'UN FOUR DE REBOUILLAGE	35
FIGURE 23: TEMPERATURE DES FUMÉES EN FONCTION DU POURCENTAGE DE CHALEUR RESTANT DANS LES FUMÉES	53
FIGURE 24 : DONNEES LUES SUR LE DCS.....	54
FIGURE 25: LE POURCENTAGE DE LA CHALEUR RESTANTE DANS LES FUMÉES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	58
FIGURE 26: LA PARTIE INFERIEURE DE LA ZONE DE RADIATION	62
FIGURE 27: LA PARTIE SUPERIEURE DE LA ZONE DE RADIATION (COTE OUEST)	62
FIGURE 28: LA PARTIE SUPERIEURE DE LA ZONE DE RADIATION (COTE EST)	62
FIGURE 29: LA PARTIE SUPERIEURE DE LA ZONE DE RADIATION (COTE NORD-EST).....	63
FIGURE 30 : LA TEMPERATURE AUX EXTREMITES DU BRULEUR.....	63
FIGURE 31: LA TEMPERATURE SUR LE PLAFOND DE LA ZONE DE RADIATION.....	63
FIGURE 32: LE CHEMIN DES FUMÉES A L'INTERIEUR DU FOUR	64
FIGURE 33: LE CALORIFUGE VU A PARTIR DE LA LUCARNE	65
FIGURE 34: LE CALORIFUGE DE LA ZONE DE RADIATION	66
FIGURE 35: FORMATION DE VOLUMES MORTS.....	67
FIGURE 36: L'EMPLACEMENT DE L'ANNEAU EN BETON	69
FIGURE 37: EXEMPLE D'UNE BARRIERE A VAPEUR.....	72
FIGURE 38: L'EMPLACEMENT DES DEFLECTEURS ET LEUR INFLUENCE SUR L'AERODYNAMIQUE DU FOUR	72
FIGURE 39: L'EXCES D'AIR EN FONCTION DE L'EXCES D'OXYGENE.....	79
FIGURE 40: EFFICACITE THERMIQUE EN FONCTION DES TEMPERATURES DE L'AIR ET DES FUMÉES	82
FIGURE 41: PRECHAUFFAGE DIRECT	83
FIGURE 42: PRECHAUFFAGE INDIRECT	83
FIGURE 43: PRECHAUFFAGE PAR SOURCE EXTERNE	84

Liste des tableaux

TABLEAU 1: LES CONDITIONS OPERATOIRES DU FOUR SELON LE CONSTRUCTEUR	48
TABLEAU 2: COMPOSITION DU FUEL GAZ SELON LE CONSTRUCTEUR	48
TABLEAU 3: DETERMINATION DU VOLUME D'AIR NECESSAIRE POUR LA COMBUSTION ET LA COMPOSITION DES FUMEEES	49
TABLEAU 4: CHALEUR SENSIBLE DE L'AIR ET DU GAZ A 25°C.....	51
TABLEAU 5: TABLEAU RECAPITULATIF DU CAS DESIGN.....	53
TABLEAU 6: LES CONDITIONS OPERATOIRES ACTUELLES.....	54
TABLEAU 7: LA COMPOSITION DU FUEL GAZ SELON LA DERNIERE ANALYSE DU CRD	55
TABLEAU 8: LE CALCUL DE LA COMPOSITION DES FUMEEES	56
TABLEAU 9: CHALEUR SENSIBLE DE L'AIR ET DU GAZ A 25°C.....	57
TABLEAU 10: TABLEAU RECAPITULATIF DU CAS ACTUEL.....	58
TABLEAU 11: LES CARACTERISTIQUES DES COUCHES DE FIBRE CERAMIQUE.....	66
TABLEAU 12: COMPARAISON ENTRE LA FIBRE CERAMIQUE UTILISEE ET LES NORMES API	66
TABLEAU 13: LES SOLUTIONS AVEC LEURS AVANTAGES ET INCONVENIENTS.....	73
TABLEAU 14 : CALCUL DE L'HYDROCARBURE EQUIVALENT	77
TABLEAU 15: TABLEAU RECAPULATIF	80

Introduction

Qu'elles soient sous forme solides, liquides, ou gazeuses, les matières n'existent pas dans la nature à leurs états purs, mais sous forme de mélanges. Le pétrole brut par exemple, lors de son extraction, est en mélange avec de l'eau très salée et du gaz naturel.

Afin de pouvoir le transporter, le brut doit être séparé de toute sorte d'agents corrosifs, comme l'eau et le sel, qui détériorent les conduites. De plus la présence des bulles gazeuses nuit au bon fonctionnement des pompes centrifuges.

De nombreux procédés de séparation et de stabilisation doivent être mis en œuvre afin de répondre aux spécifications de transport. Ces opérations sont effectuées dans des centres de traitement d'hydrocarbure, proche des puits exploités afin d'éviter au maximum l'utilisation des pompes multiphasiques onéreuses, et de pouvoir réinjecter le gaz et l'eau extraits dans les gisements, ceci dans le but d'augmenter leurs pressions et optimiser ainsi l'exploitation.

Pour pouvoir procéder à ces séparations, un apport de chaleur important est nécessaire. Cet apport est obtenu grâce à des échangeurs de chaleur, situés à des endroits stratégiques de l'unité, mais surtout grâce à des fours tubulaires conçus et dimensionnés afin d'augmenter au maximum leur rendement.

La bonne conception des fours est d'autant plus importante que ces derniers jouent un rôle important dans la rentabilité des unités. Éléments clés dans les unités de traitement d'hydrocarbure, leur défaillance entraîne des arrêts de l'unité qui, si répétés, peuvent engendrer de grosses pertes économiques.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés à l'un des fours d'une unité de traitement d'hydrocarbure, situé à Bir Rebaâ Nord(Hassi Messaoud). En effet, celui-ci présente un problème de condensation d'eau, qui coule à travers les extrémités de sa base. Cette condensation nuit à la bonne marche du four et pourra conduire à sa mise hors service.

Notre objectif est donc d'identifier les causes de cette condensation et de proposer d'éventuelles solutions.

Premier Chapitre :

**PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET
SES SOCIÉTÉS MÈRES**

Dans ce premier chapitre, nous présenterons sommairement l'historique du Groupement Sonatrach-AGIP à travers ses 17ans d'existence et ces deux sociétés mères Sonatrach et ENI.

I. La *Sonatrach* [1]

La **Société Nationale** pour la Recherche, la Production, le **Transport**, la Transformation, et la **Commercialisation des Hydrocarbures s.p.a.**, est une entreprise publique algérienne et un acteur majeur de l'industrie pétrolière. Elle intervient dans l'exploration, la production, le transport par canalisations, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés.

Adoptant une stratégie de diversification, *Sonatrach* se développe dans les activités de génération électrique, d'énergies nouvelles et renouvelables, de dessalement d'eau de mer, de recherche et d'exploitation minière. Poursuivant sa stratégie d'internationalisation, *Sonatrach* opère en Algérie et dans plusieurs régions du monde : en Afrique (Mali, Niger, Libye, Égypte), en Europe (Espagne, Italie, Portugal, Grande Bretagne), en Amérique Latine (Pérou) et aux USA.

I.1. Ses Activités

Comme tout groupe pétrolier, les activités de *Sonatrach* peuvent-être subdivisées en quatre parties :

I.1.a. L'amont

L'activité Amont recouvre les activités de recherche, d'exploration, de développement et de production d'hydrocarbures. Celles-ci sont assurées par *Sonatrach* seule ou en association avec d'autres compagnies pétrolières.

Sonatrach a réalisé 16 nouvelles découvertes en 2009, dont 9 sans partenaire extérieur. Presque la totalité des réserves découvertes à ce jour se situe dans la partie Est du Sahara. La répartition géographique sur la base d'un découpage du domaine minier en plusieurs provinces pétrolières plus ou moins homogènes, donne ce qui suit :

- 67% des réserves en huile et en gaz sont renfermées dans les provinces de Oued Mya et de Hassi Messaoud, où sont situés les deux gisements géants de Hassi Rmel (gaz) et Hassi Messaoud (huile) ;
- Le bassin d'Illizi occupe la 3ème position avec 14% des réserves initiales en place ;
- Puis viennent les bassins de Rhourde Nouss (9%), Ahnet Timimoun (4%) et le bassin de Berkine.

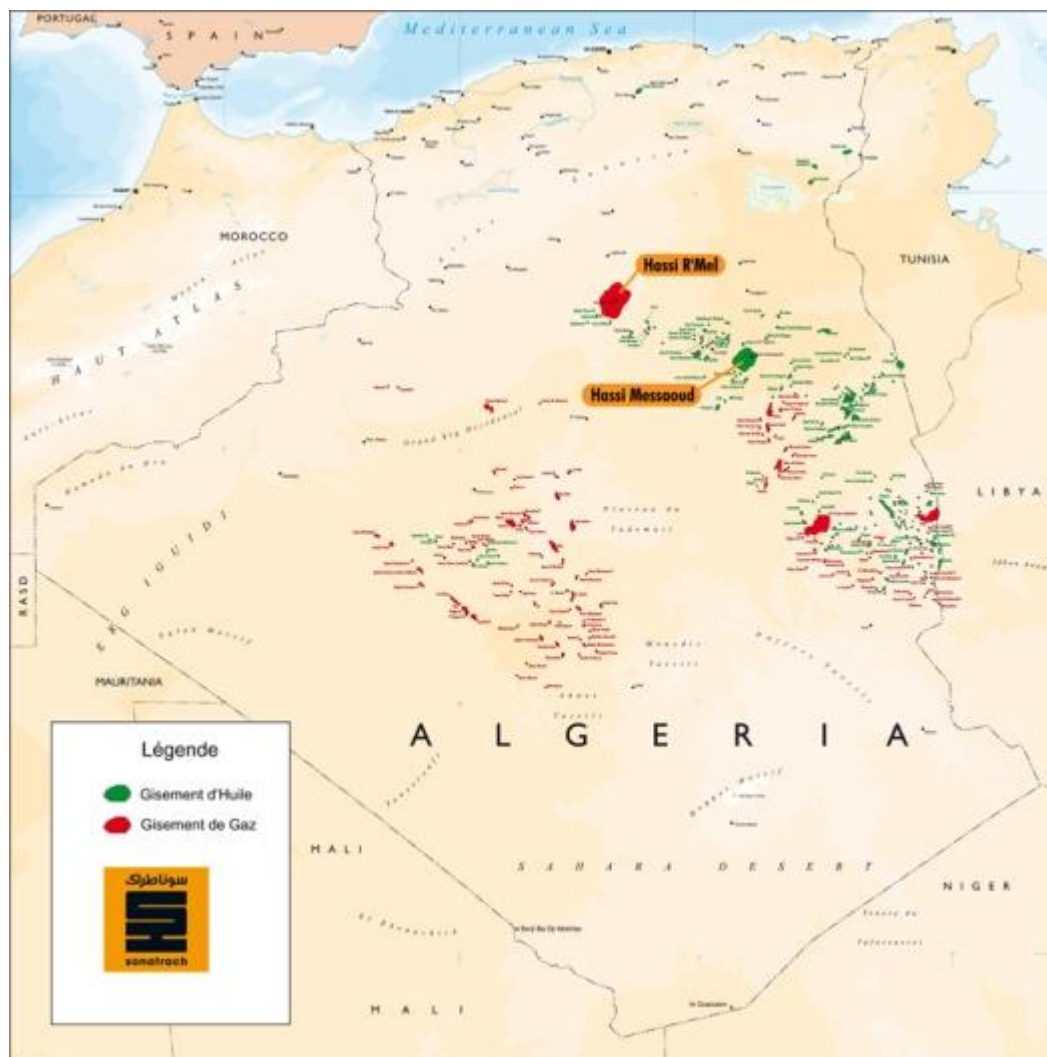


Figure 1: Situation des gisements d'huile et de gaz

I.1.b. Le transport par canalisation

L'Activité Transport par Canalisation assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, gaz naturel, GPL et condensat) et dispose d'un réseau de canalisations de près de 16 200 km. À travers ce réseau d'oléoducs et de gazoducs, 244,5 millions de TEP (tous produits confondus) ont été transportés en 2007.

Le réseau de transport par canalisation compte 12 gazoducs d'une longueur totale de 7459 km, avec une capacité de transport de 131 milliards de m³/an dont 39 milliards de m³ destinée à l'exploitation.

Depuis la mise en service des 02 gazoducs transcontinentaux, Enrico Mattei (reliant l'Algérie à l'Italie via la Tunisie) et Pedro Duran Farrel (reliant l'Algérie à l'Espagne via le Maroc), de nouveaux projets de construction de gazoducs sont en cours de réalisation afin de répondre notamment à une demande croissante du marché européen.

L'activité Transport par Canalisation dispose de :

- 79 stations de pompage et de compression équipées de plus de 290 machines principales d'une puissance totale de plus de 02 millions de CV.
- Une capacité de stockage de près de 3.4 millions de m³.
- Une capacité de chargement portuaire de près de 210 MTA.
- Une infrastructure de maintenance et d'entretien articulée autour de 03 bases principales de maintenance et 03 bases régionales d'intervention.
- Un centre national de dispatching gaz (CNDG) à Hassi R'mel.
- Un centre de dispatching des hydrocarbures liquides (CDHL) à Haoud El Hamra.

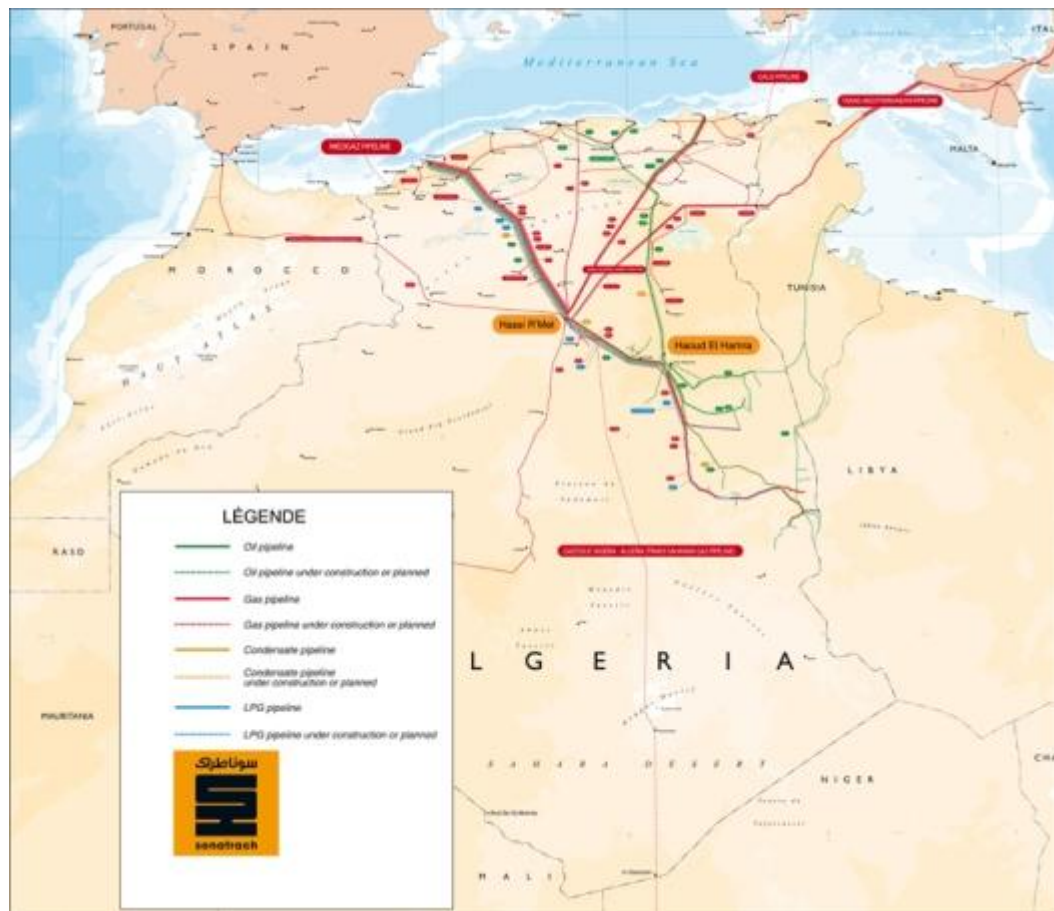


Figure 2: Réseau de transport par canalisations

Plusieurs projets de gazoduc sont en cours de réalisation, on peut citer :

- Le projet Medgaz est une canalisation de transport de gaz naturel qui traverse la mer Méditerranée et reliant l'Algérie à l'Europe via l'Espagne. Partant de Béni-Saf, près d'Arzew, la canalisation traverse la Méditerranée sur une longueur d'environ 200 km à une profondeur atteignant 2160 mètres. Le gazoduc acheminera, dans sa première phase, un volume de 8 milliards de m³ par an à partir de juillet 2009.
- Le projet Galsi est un projet qui consiste en la réalisation d'un gazoduc sur une distance de 1 470 km environ, prenant son point de départ de Hassi-R'mel pour aboutir à

Castiglione Della Pescaia, au Nord de Rome (Italie). Le tronçon offshore devra relier El Kala (côte algérienne) à l'Italie via la Sardaigne. D'une capacité initiale de 8 milliards de m³/an, il pourra desservir l'Italie, le Sud de la France et les pays européens au Nord des Alpes.

- Le projet TSGP, long de 4200 km dont 2310 km sur le territoire algérien et 1037 km sur le territoire du Nigeria, reliera le terminal départ de Warri (Nigeria) au terminal d'arrivée sur la côte algérienne et permettra de transporter un volume de gaz naturel estimé entre 18 et 20 milliards de m³/an.

I.1.c.L'aval

L'activité Aval a en charge le développement et l'exploitation de la liquéfaction de gaz naturel, la séparation de GPL, le raffinage, la pétrochimie et la valorisation des gaz industriels.

La *Sonatrach* dispose à travers son activité aval de :

- Quatre (04) complexes de GNL, 3 à Arzew et 1 à Skikda, d'une capacité totale de production de 44 milliards m³ de GNL/an,
- Deux (02) complexes de GPL à Arzew, d'une capacité totale de production de 9 millions de tonnes / an,
- Deux (02) complexes pétrochimiques, l'un à Arzew et le second à Skikda,
- Une (01) unité de PEHD (polyéthylène haute densité) appartenant à la filiale ENIP,
- Deux (02) unités d'extraction d'hélium: une à Arzew et une à Skikda.

Elle dispose aussi de cinq (05) raffineries :

- Une (01) à Alger avec une capacité de traitement de pétrole brut de 2,7 millions de tonnes par an,
- Une (01) à Skikda avec une capacité de traitement de pétrole brut de 7,5 millions de tonnes par an,
- Une (01) à Arzew avec une capacité de traitement de pétrole brut de 2,5 millions de tonnes par an,
- Une (01) à Hassi Messaoud avec une capacité de traitement de pétrole brut de 1,1 millions de tonnes par an,
- Une (01) Adrar en partenariat avec une capacité de traitement de pétrole brut de 600 000 tonnes par an.

D'autres projets sont en cours de réalisation :

- Un (01) train de liquéfaction de gaz naturel à Skikda d'une capacité de 4,7 millions de tonnes,
- Un (01) train de liquéfaction de gaz naturel à Arzew d'une capacité de 4,5 millions de tonnes,
- trois (03) nouveaux trains de GPL à Arzew,

- Une (01) raffinerie à Tiaret,
- Les complexes d'ammoniac et d'urée d'Arzew,
- Un (01) complexe de vapocraquage d'éthane à Arzew,
- Un (01) complexe oléfine à Skikda.



Figure 3: Situation des installations et projets de l'Activité Aval

I.1.d. La commercialisation

L'Activité Commercialisation a en charge le management des opérations de vente et de shipping dont les actions sont menées en coopération avec les filiales Naftal pour la distribution des produits pétroliers, Shipping Hyproc Company pour le transport maritime des hydrocarbures et Cogiz pour la commercialisation des gaz industriels. La politique de partenariat développée par *Sonatrach* lui a permis la commercialisation des hydrocarbures en direction des marchés internationaux.

Les exportations ont généré en 2007 un chiffre d'affaires record de l'ordre de 59,5 milliards de US\$, soit une augmentation de 11% par rapport à l'année qui a précédé. *Sonatrach* a exporté 134 millions de TEP d'hydrocarbures. Le marché national a bénéficié de 31 millions de TEP.

Afin d'honorer ses engagements envers ses clients, *Sonatrach*, à travers ses filiales *Hyproc Shipping Company* et *Sonatrach Petroleum Corporation*, dispose d'une flotte maritime importante. Elle se répartit comme suit :

- **Le transport maritime des GPL :** *Sonatrach* dispose d'une flotte de dix (10) transporteurs de GPL à travers ses filiales *Hyproc Shipping Company* et *Sonatrach Petroleum Corporation* (SPC).
- **Le transport maritime du GNL :** *Sonatrach* dispose d'une flotte de neuf (09) méthaniers à travers sa filiale *Hyproc Shipping Company*.
- **Transport maritime du brut (Mesdar):** supertanker de transport de pétrole brut de type VLLC (Very Large Crude Carrier), acquis dans le cadre d'un partenariat entre la Compagnie Japonaise Kawasaki Ship Building et *Sonatrach Petroleum Corporation* Bvi, filiale à 100 % du Groupe *Sonatrach*. Le Mesdar à une capacité de 315 000 m³ (soit plus de 02 millions de barils).



Figure 4: Routes d'exploitation GN-GNL

I.2. *Sonatrach* dans le monde

Adoptant une stratégie d'internationalisation et de partenariat, *Sonatrach* renforce sa position en tant qu'acteur majeur dans l'industrie pétrolière et gazière. Ses activités à l'international connaissent un développement intense qui se caractérise par une diversification aussi bien sur le plan géographique que sur le plan des activités. Ainsi, les activités que le groupe *Sonatrach* développe sur le plan international sont les suivantes :

- Amont
- Transport par canalisation
- Aval
- Commercialisation des produits pétroliers
- Transport maritime
- Autres Services.



Figure 5: Les activités de SONATRACH dans le monde

I.3. Sonatrach en chiffre

Avec un chiffre d'affaires de près de 64,975 milliards de US\$ réalisé en 2008, *Sonatrach* est classée 1ère compagnie en Afrique et 12ème compagnie dans le monde. Elle est également 4ème exportateur mondial de GNL, 3ème exportateur mondial de GPL, et 5ème exportateur de Gaz Naturel

- 1ère Compagnie Africaine,
- 12ème Compagnie pétrolière Mondiale,
- 13ème Compagnie Mondiale concernant les hydrocarbures liquides (réserves et production)
- 6ème Compagnie Mondiale en matière de Gaz Naturel (réserves et production)
- 25ème Compagnie pétrolière sur le plan des effectifs. (Source : PIW Top 50 / 2008)
- 5ème exportateur mondial de Gaz Naturel
- 4ème exportateur mondial de GNL
- 3ème exportateur mondial de GPL.

II. ENI [2]

L'**Ente Nazionale Idrocarburi (ENI)** est la société nationale italienne des pétroles, créée le 10 février 1953 sous la présidence d'*Enrico Mattei* et privatisée en 1998. L'État italien conserve une minorité du capital (environ 30 %).



Elle est présente dans les secteurs du pétrole, du gaz naturel, de la pétrochimie, de la génération d'énergie électrique et de l'ingénierie. Présente dans 70 pays, son effectif est de 78420 salariés. Son chiffre d'affaires s'est élevé à 84.35 milliards d'euros en 2009 pour un bénéfice de 4.367 milliards d'euros.

ENI est la première société italienne par sa capitalisation boursière, est le cinquième groupe pétrolier mondial (classement par chiffre d'affaires) derrière ExxonMobil, BP, Royal Dutch Shell, Total, et devant Chevron et ConocoPhillips.

II.1. Historique

Immédiatement après la première guerre mondiale, l'Italie a lancé une politique de recherche de pétrole et de gaz sur son territoire. Pour cette raison, la société AGIP (*Agenzia Generale Italiana Petroli*) a été créée en 1926. Les prospections d'hydrocarbures commencent en Italie ainsi qu'en Roumanie, Albanie et Irak qui ont confié pareille mission à AGIP sur leurs territoires. Les recherches se poursuivent jusqu'en 1939 et sont interrompues avec la seconde guerre mondiale. Elles reprennent dès la libération de l'Italie.

- **Les années 50-60** : Incorporation de l'ENI et l'expansion des activités en Italie et à l'étranger. E.N.I. "Ente Nazionale Idrocarburi" a été créée dans le but de fournir de l'énergie à l'Italie, en contribuant au développement industriel du pays. D'importantes découvertes sont effectuées dans la mer Adriatique : près de Ravenne le premier gisement de gaz offshore européen et en Tunisie le gisement de "El Borma", un des plus importants d'Afrique.
- **Les années 70-80**: "Gas as a Solution to the Oil Crisis and the Algerian Gas Pipeline". Les dirigeants de l'ENI voient dans le gaz naturel la source d'énergie pour faire face à la crise provoquée par le premier choc pétrolier et signent des accords pour importer du gaz de l'Union Soviétique et des Pays-Bas. La SNAM "Società Nazionale Metanodotti", créée en 1941, a inauguré le gazoduc Transmed qui, avec plus de 2500 km de longueur, relie Hassi-R-Mel, dans le désert algérien, à la vallée du Po. Le Transmed traverse le canal de Sicile où il est posé à plus de 650 mètres de profondeur.

- **Les années 90 :** *ENI*, qui était jusqu'alors une société publique, détenue intégralement par l'État italien, va être privatisée et devient une société anonyme. AGIP accroît ses activités internationales par de nouvelles acquisitions en Algérie, Chine, Angola, en mer du Nord et en Égypte. La société signe des contrats importants avec le Kazakhstan, l'Azerbaïdjan, le Nigéria et l'Angola. Dans ces deux derniers pays, les accords concernent le développement d'activités en eaux profondes. Le groupe ENI SpA incorpore Agip qui devient la Division Exploration & Production. La production atteint 1 million de barils équivalent pétrole (bep) par jour.
- **Le nouveau millénaire :** ENI consolide sa position dans les activités de prospection et de production par l'acquisition des sociétés British Borneo et Lasmo. Achèvement de la réalisation du Blue Stream, un gazoduc de 1250 km qui relie la Russie à la Turquie en traversant la Mer Noire. L'importante découverte du gisement géant Kashagan est le premier d'une série de succès dans la Mer Caspienne.

II.2. Filiales

Le groupe pétrolier italien *ENI* est tourné à la fois vers la production et la distribution d'hydrocarbures. Le groupe comprend cinq filiales principales :

- Snam rete Gas SpA, 50,07 % - gestion du réseau de gaz naturel en Italie,
- Italgas SpA, 100 % - production et vente de gaz naturel, est un groupe de 21 sociétés,
- Enipower SpA, 100 % - production d'électricité en Italie, 1 400 MW installés,
- Snamprogetti SpA, 100 % - ingénierie dans les secteurs du pétrole, de la chimie et des infrastructures énergétiques,
- Saipem SpA, 43 % - services aux sociétés pétrolières : forage, construction et installation de plates-formes en mer, pose de canalisations....

III. Le groupement Sonatrach-AGIP

Le groupement *Sonatrach-AGIP* a été créé en 1993 de l'association de la société nationale *Sonatrach* et l'entreprise italienne *ENI* dans l'unique but d'exploiter tous les gisements pétrolifères existants dans 5 blocs : 401,402, 403a, b et c, durant une période de 30 ans.



Ce fut la première association entre *Sonatrach* et une société étrangère, les travaux de construction ont duré 2 ans, et le groupement a démarré la production en 1995.

Le groupement *Sonatrach-AGIP* opère un centre de traitement de l'huile au milieu de sa zone d'exploitation.

III.1.Organisation

Le groupement *Sonatrach-AGIP* s'organise comme suit :

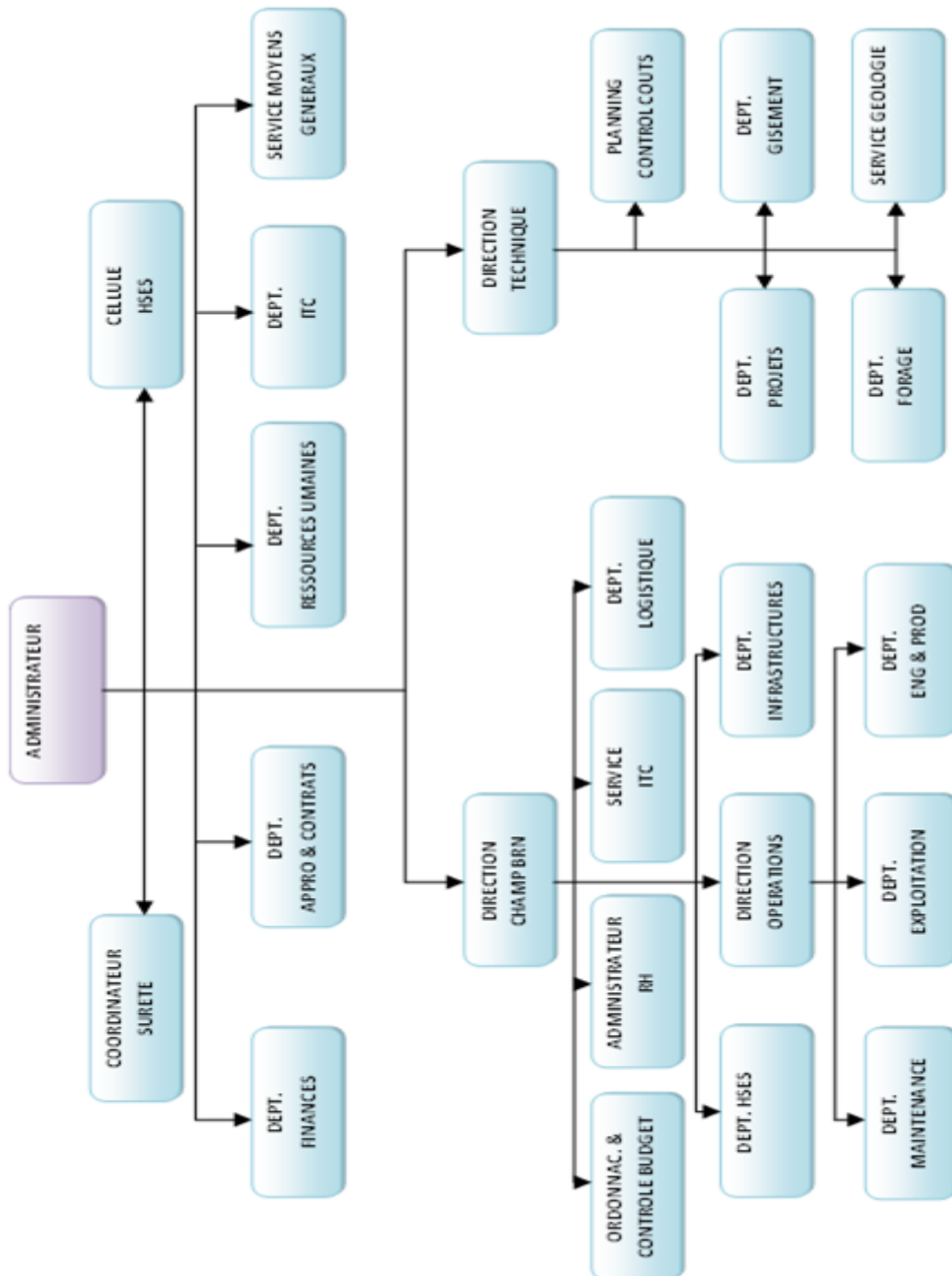


Figure 6: Organigramme du groupement Sonatrach-AGIP

Deuxième Chapitre :

**LE CENTRE DE TRAITEMENT D'HUILE ET
PRESENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE**

I. Centre de traitement d'huile (CTH)

I.1. Situation géographique

Centre de Traitement des Huiles est situé à *Bir Rebaâ Nord* (BRN) à environ 340 km à l'est de *Hassi Messaoud*. Cette position stratégique lui permet d'être au milieu des différents puits exploités.



Figure 7: Situation géographique du CTH

I.2. Ses activités

Ce site est alimenté par des champs pétrolifères situés aux alentours (BRN, ROD et ROM), dans l'objectif est de dessaler, déshydrater et stabiliser l'huile avant l'expédition vers Masdar éloigné de 230 km. L'eau et le gaz sont injectés dans les puits afin d'optimiser le rendement des gisements.

Donc nous pouvons citer 3 activités principales :

- Production de l'huile.
- Réinjection de gaz.
- Injection d'eau.

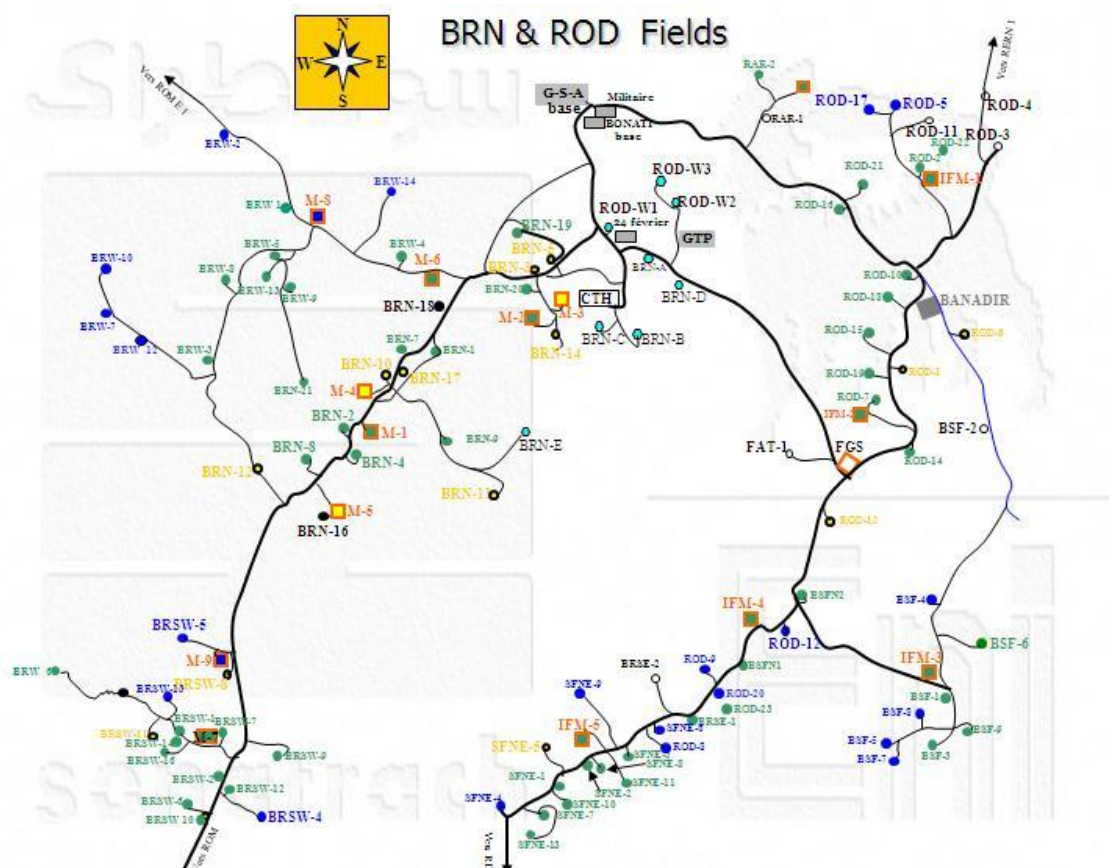


Figure 8: Champs Pétrolifères & Puits Alimentant le CTH

Le centre de traitement de *GSA*¹ de *Bir Rabaâ Nord* contenait initialement une seule chaîne de production (train) avec une capacité de traitement de 41 000 Bbl/j. Ensuite, l'unité a évolué avec la mise en place d'un deuxième train en 2002 d'une capacité avoisinant les 39 000 Bbl/j, puis enfin d'un troisième train en 2005 traitant en moyenne 70 000 Bbl/j.

I.3. Description du procédé

Chaque train se compose de trois circuits, dont deux pour le traitement d'huile (chaud et froid), et un pour le gaz :

Le circuit froid : il est composé de plusieurs séparateurs tri-phasiques fonctionnant à différentes pressions ainsi que des pompes.

Le circuit chaud : il est composé d'un séparateur tri-phasique, d'un dessaleur, d'une colonne de stabilisation, d'échangeurs de chaleur, d'aéroréfrigérants et d'un four de rebouillage.

Le circuit de traitement de gaz : comprend plusieurs compresseurs et une unité de déshydratation du gaz avec le TEG².

Le pétrole brut arrivant des puits producteurs à différentes pressions passe par les collecteurs (manifolds) d'entrée, les arrivées qui ont une haute pression sont envoyées vers le

¹ Groupement Sonatrach-AGIP

² Tri Éthylène Glycol

séparateur HP et celles à basse pression sont envoyées vers le séparateur BP où l'on sépare les trois produits principaux (huile, gaz, eau). À sa sortie, l'huile BP est pompée pour atteindre la pression de l'huile HP, puis collectée avec ce dernier.

L'huile est envoyée ensuite vers le séparateur tri-phasique en passant par l'échangeur de chaleur pour augmenter sa température jusqu'à 65-70°C. L'huile sortant du tri-phasique est envoyée vers le dessaleur électrostatique en passant par le ballon dégazeur et en injectant un produit désémulsifiant qui aide à détruire le film d'huile entourant les grains de sel afin qu'ils puissent se dissoudre dans l'eau douce injectée à l'entrée du dessaleur.

L'huile dessalée est envoyée vers la colonne de stabilisation en passant par l'échangeur de chaleur. Pour être prête au stockage, l'huile subit une opération de rectification de la TVR³ à l'aide du four de rebouillage.

Le gaz est envoyé vers l'unité de déshydratation à l'aide des compresseurs. Ensuite il est divisé en deux parties : fuel gaz et gaz de réinjection. Le fuel gaz est utilisé comme combustible pour les fours et les turbines, le gaz de réinjection est envoyé vers les unités de réinjection de gaz.

L'eau est envoyée vers l'unité de traitement des eaux huileuse qui a pour objet d'enlever les traces d'huile entraînées avec l'eau de purge des séparateurs. L'eau purifiée est envoyée vers le bassin évaporateur.

Le schéma suivant montre le procédé détaillé d'un train.

³ Tension de Vapeur Reid

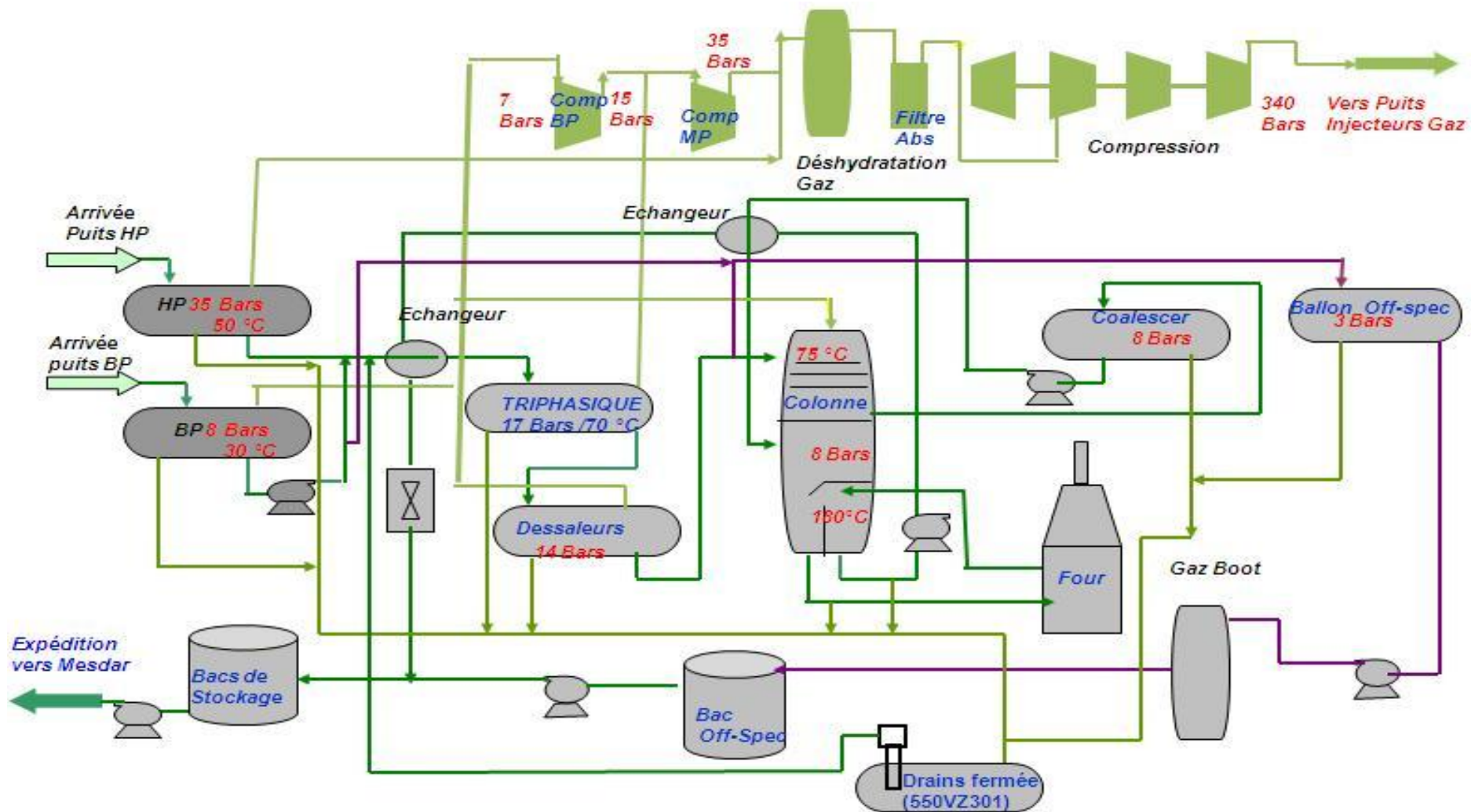


Figure 9: Schéma synoptique du train 3

I.4. Historique du champ de Bir Rebaâ Nord (BRN)

- Juin 1995: Démarrage de l'usine BRN.
- Août 1995: Expédition de l'huile vers MESDAR.
- Octobre 1995: Début de l'exploitation du gisement BRW.
- Décembre 1995: Début de l'exploitation du gisement BRSW.
- Décembre 1995: Visite inaugurale.
- Octobre 1999: Démarrage de la réinjection du gaz associé.
- Novembre 1999: Démarrage du C.T.H. ROM.
- Février 2000: Début de l'exploitation du gisement ZEK.
- Avril 2000: Démarrage de l'unité d'injection d'eau à BRN.
- Février 2002 : Démarrage du deuxième train de traitement huile à BRN.
- Septembre 2002 : Mise en production du gisement ZEA
- Juillet 2003 : Mise en production du champ ROME
- Décembre 2004 : Démarrage du troisième train de traitement huile à BRN

II. Cadre du projet et problématique

II.1. Cadre du projet

Notre projet s'intéresse au four de rebouillage du train 3 (ROD). Une des unités les plus importantes et les plus chères, ce four est de type cylindrique vertical, à tirage naturel, il se compose d'un serpentin vertical de chauffage radiant à huit passes et d'un serpentin horizontal de chauffage par convection à huit passes.



Figure 10: Le four de rebouillage du Train 3

II.2. Problématique

Deux ans après la première mise en service en 2004, une condensation d'eau qui s'écoule du fond du four du train 3 a été constatée, le problème s'aggrava au fur et à mesure, et on est arrivé à une condensation de plus de 02 litres/heure en hiver 2008. Cette condensation endommage les parois du four ainsi que ses installations de régulation (voir figure 11, 12, 13).



Figure 11: Ruissèlement du condensat entre la paroi et le calorifuge



Figure 12: Les équipements de régulation détériorés par la condensation



Figure 13: Débordement de l'eau sur le sol

Plusieurs actions ont été engagées dans le but d'éliminer cette condensation d'eau. Dans un premier temps, l'entreprise a pensé à un problème de combustion. N'ayant pas pu

résoudre ce problème, l'entreprise a invité l'entrepreneur Saipem⁴ à prendre en charge la levée de ce point de réserve.

Une première intervention a eu lieu en Janvier 2009 par un spécialiste de BIH (Boosted International Heaters). Son objectif était l'optimisation de la combustion par l'analyse des fumées. En conclusion le rapport remet en cause le système de combustion (brûleurs).

Une deuxième intervention a eu lieu du 12 au 20 Août 2009, par un spécialiste de Hamworthy-Combustion (fournisseur du système de combustion du four). Une certaine amélioration a été observée après changement des 08 brûleurs (la qualité de flamme et l'analyse des fumées montrent une combustion complète), mais cela n'a pas contribué à solutionner le problème de condensation d'eau.

II.3. Méthode et planning de travail

Après ces interventions, et vu la persistance de la condensation, une étude approfondie du four s'avère nécessaire pour identifier la source du problème en premier lieu, puis proposer des solutions, tout en spécifiant leurs avantages et inconvénients.

Les grandes étapes du projet sont :

- Le calcul du rendement thermique du four et des pertes par les parois, selon les données du constructeur et les données actuelles.
- L'interprétation des résultats trouvés.
- La proposition d'hypothèse et vérification de sa validité.
- La recherche des solutions, leurs avantages et inconvénients.
- Le réglage des paramètres du four pour optimiser son rendement.

⁴ Une filiale d'ENI

Troisième Chapitre :

PARTIE THEORIQUE

Abréviations :

Symbole	Définition	Unité
A	Surface noire absorbant la même quantité de chaleur que les tubes	m^2
A_m	Surface des murs de la zone de convection	m^2
A_t	Surface extérieure des tubes	m^2
C_p	Chaleur spécifique moyenne des fumées	kcal/kg.°C
D	Diamètre extérieur des tubes	M
E	Facteur d'émission des murs	
E	Effet de la radiation des murs	%
F	Facteur global d'échange en radiation	
G_{max}	Vitesse massique des fumées à la section minimale de passage	kg/h.m ²
h_c	Coefficient de convection pure	kcal/h.m ² .K
H_c	Enthalpie de combustion	kcal/h
H_f	Enthalpie des fumées	kcal/h
h_m	Coefficient de radiation des murs	kcal/h.m ² .K
h_{rg}	Coefficient de radiation des gaz	kcal/h.m ² .°C
h_o	Coefficient global de film	kcal/h.m ² .K
L_v	Chaleur latente de vaporisation	kJ/kg
m	Quantité de vapeur	Kg
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	kJ/kg
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	kJ/kg
Q_A	Quantité de chaleur absorbée par les tubes	kcal/h
T	Température moyenne des fumées	K
t	Température moyenne des fumées	°C
T'	Température moyenne des tubes	K
T_A	Température de la surface des tubes	K
T_g	Température des gaz de combustion dans la zone de radiation	K
ϵ_A	Facteur d'émission de la surface équivalente des tubes	
ϵ_F	Facteur d'émission nette des gaz	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	kcal/h.m ² .K ⁴
η	Rendement du four	%

I. Les fours tubulaires

I.1. Introduction

Le rôle joué par les fours dans les unités pétrolières, pétrochimiques et carbochimiques est important. Dans bien des cas, la défaillance du four ou tout simplement de l'un de ses accessoires entraîne des arrêts de l'unité.

Les conséquences économiques de ces arrêts sont d'autant plus grandes que l'unité est importante.

Les fours sont incorporés au train d'échange afin d'apporter la chaleur complémentaire pour réchauffer un fluide ou produire une réaction de dissociation des molécules d'une charge. Ils doivent également absorber les variations résiduelles des transferts de chaleur dans l'unité.

I.2. Généralités [3]

Un four tubulaire est conçu et calculé pour permettre de transférer au fluide une quantité de chaleur donnée par heure, le débit et les températures d'entrée et de sortie étant fixés à l'avance. Il faut donc faire apparaître dans le four une quantité de chaleur suffisante pour réchauffer le fluide et compenser les pertes, sans pour cela entraîner une détérioration de certains éléments du four.

Cette quantité de chaleur est fournie par combustion grâce à des brûleurs alimentés en combustible. Le comburant provient de l'air qui rentre grâce à la dépression qui règne à l'intérieur du four et qui est due au tirage de la cheminée.

Les échanges thermiques à l'intérieur du four se font à la fois par les trois mécanismes de transfert de chaleur: le rayonnement, la convection et la conduction. Les produits de la combustion cèdent leur chaleur aux tubes par radiation et convection. Les pertes calorifiques à travers les murs du four se font par conduction. Le phénomène le plus important à prendre en considération est la radiation des produits de la combustion.

I.3. Description d'un four tubulaire [4]

Un four tubulaire est constitué d'une enveloppe métallique de formes diverses, souvent parallélépipédique ou cylindrique.

Le four comporte deux zones :

- Une zone dite de radiation où les tubes sont directement exposés à la flamme et reçoivent la chaleur principalement par radiation des produits de la combustion. Cette zone est aussi appelée chambre de combustion où se développe la flamme. C'est en général, devant les parois de cette zone que sont disposés les tubes en une ou parfois en deux rangées.

- La zone de convection est installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion. Elle est constituée d'un faisceau de tubes placés en quinconce, perpendiculairement ou parallèlement à la direction des fumées. Dans les deux cas, on cherche à obtenir une vitesse assez grande pour les fumées, de façon à augmenter, le coefficient d'échange. Les tubes placés en zone de convection ont quelquefois leur surface extérieure dans la partie en contact avec les fumées, recouverte d'ailettes ou d'aiguilles qui augmentent considérablement la surface d'échange.

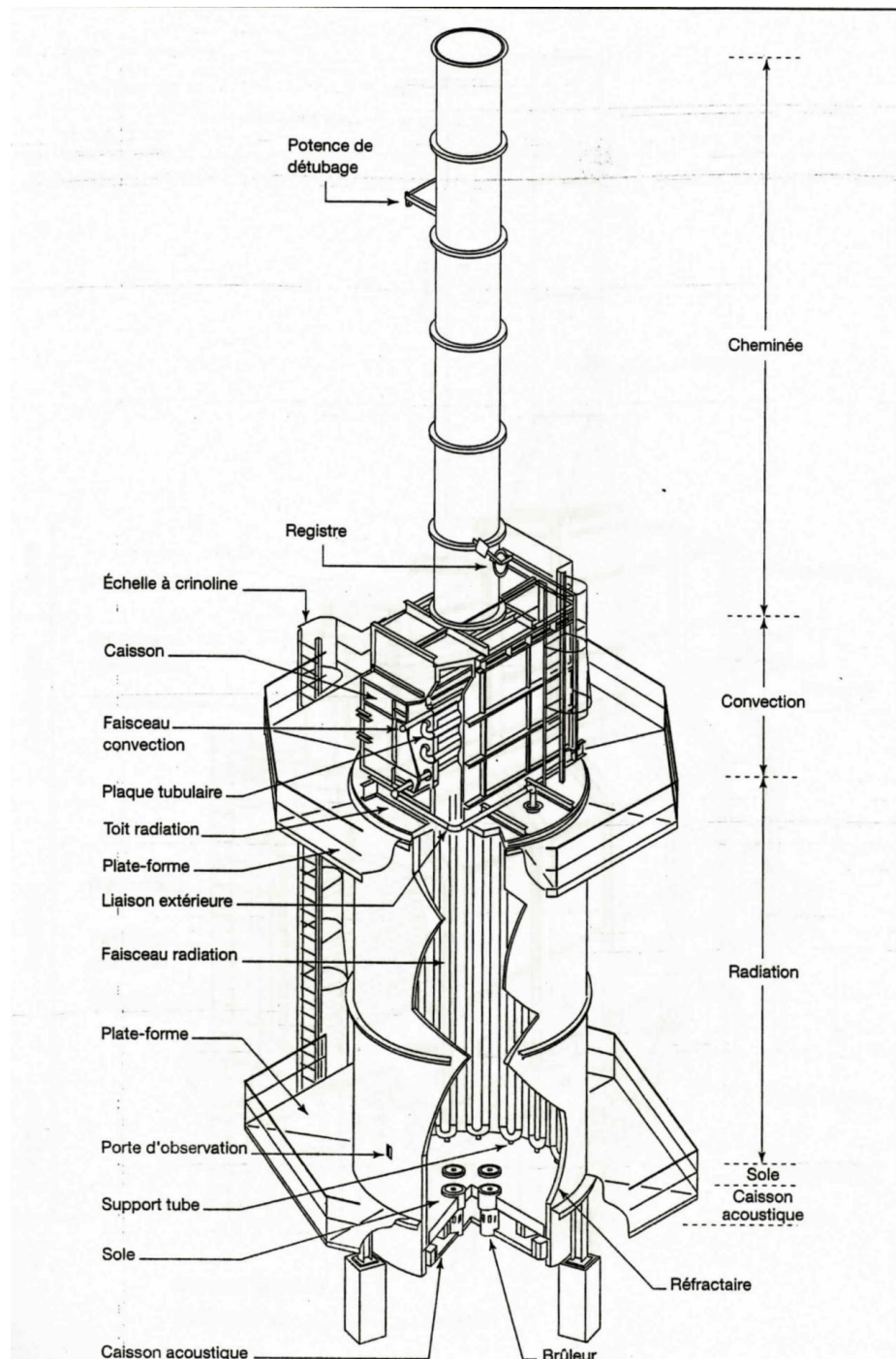


Figure 14: Schéma descriptif d'un four tubulaire

L'enveloppe métallique du four doit être suffisamment renforcée pour résister aux actions du vent et supporter l'ensemble du faisceau tubulaire. Elle est constituée d'une ossature en charpente et de tôles boulonnées ou soudées sur cette charpente. Comme, en général, la chambre de combustion est en dépression par rapport à l'atmosphère du fait du tirage de la cheminée, cette enveloppe doit être suffisamment étanche pour éviter des entrées d'air parasites qui auraient un effet préjudiciable sur le rendement du four.

Les parois intérieures du four, particulièrement celles de la chambre de combustion, sont protégées contre les effets de la température par un garnissage réfractaire et isolant qui, en outre, a pour but de réduire les pertes calorifiques à l'extérieur. Le plancher de la zone de combustion constitue la sole du four, celle-ci est aussi recouverte d'une couche réfractaire et isolante.

Les parois verticales (ou la sole dans les fours verticaux) sont munies d'orifices dans lesquels sont placés les brûleurs. Un certain nombre de regards permettent d'observer la combustion, la forme des flammes, la tenue des tubes. Des portes d'accès à l'intérieur du four sont aussi ménagées dans les parois. Ces regards et ces portes doivent être hermétiquement clos lorsque le four est en service.

Enfin, les fumées quittent le four par l'intermédiaire de la cheminée en passant par le réchauffeur d'air. La cheminée de forme cylindrique peut être située directement sur le four ou sur une fondation séparée. Le conduit amenant les fumées à la base de la cheminée s'appelle carneau.

Le rôle de la cheminée est multiple :

-d'une part elle permet de conduire les fumées dans l'atmosphère à une hauteur telle, qu'elles ne risquent pas de gêner le voisinage, ceci est important, en particulier dans les installations très resserrées où les cheminées des fours doivent être plus élevées que les colonnes voisines.

-d'autre part, la cheminée, par son tirage, met la chambre de combustion en dépression et provoque ainsi l'entrée de l'air nécessaire à la combustion par les volets d'air des brûleurs. Ses dimensions, hauteur et diamètre, doivent donc être calculées de manière à obtenir ce tirage.

La cheminée est souvent protégée intérieurement, au moins dans sa partie basse où les fumées sont encore très chaudes, par une couche de béton réfractaire, ce qui permet de la construire en acier ordinaire. Quand la cheminée est de grande hauteur, elle est quelquefois construite en béton. A sa base, on trouve souvent un registre qui permet de régler le tirage. Ce registre doit être construit en acier résistant à la température des fumées.

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

Les différents types de fours résultent des nombreuses dispositions de tubes, dans les zones de radiation et de convection. On peut, toutefois, distinguer les catégories suivantes :

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.

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

Les fours dits « cabines » à tubes horizontaux : 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, ou encore sur les murs d'extrémités ne recevant pas les tubes.

Les fours à chauffage par murs radiants : la surface d'échange est placée dans le plan médian de la chambre de combustion. Les brûleurs sont répartis sur les parois latérales longitudinales.

Les fours dits à double chauffe : dans ces derniers, le plan des tubes constituant la surface d'échange est dans le plan médian des rangs de brûleurs.

Le choix d'un type de four dépend de différents facteurs tels que la nature du produit à chauffer et les conditions de services (débits, température, pression), de la présence ou non de catalyseur dans les tubes, du combustible, de l'encombrement, de la facilité de construction et de transport, et enfin du coût pour une application donnée.

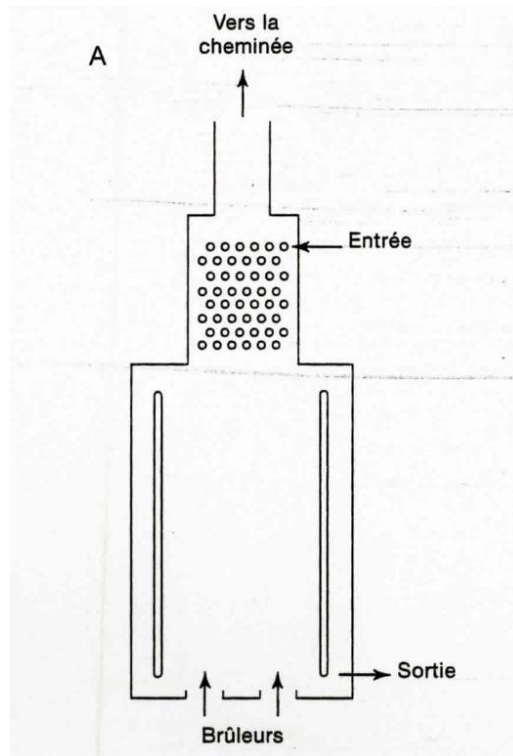


Figure 15: Fours cylindriques verticaux

I.5. La constitution d'un four tubulaire [4]

I.5.a. Faisceaux tubulaires

Les faisceaux tubulaires sont généralement constitués de tubes droits, sans soudure, reliés entre eux par des coudes à 180° soudés sur les tubes, ou par des liaisons spéciales, appelées boîtes de retour, comportant un ou deux orifices fermés par des bouchons. Ces dispositifs permettent l'observation et le nettoyage de l'intérieur des tubes.



Figure 16: faisceaux tubulaires en zone de radiation

Le choix du matériau pour les faisceaux des tubes repose sur les critères suivants :

- Résistance à la corrosion par le fluide chauffé ;
- Résistance à l'oxydation par les fumées chaudes ;
- Résistance mécanique en température à la pression intérieure du fluide chauffé et aux contraintes mécaniques dues au poids du faisceau tubulaire et du fluide qu'il contient.

I.5.b. Support des faisceaux tubulaires

La libre dilatation des éléments du faisceau tubulaire est à la base des principes de support.

Les matériaux utilisés doivent résister aux fumées, à l'oxydation, à la corrosion par les cendres de combustibles liquides (vanadates, sulfates...) et présenter une bonne résistance mécanique à chaud (domaine élastique et fluage).

Dans certains cas, on utilise des métaux peu ou pas alliés, mais ils sont alors protégés de l'action des fumées (température, oxydation) par un garnissage réfractaire. C'est notamment le cas des supports d'extrémités dans les zones de convection.

I.5.c. Garnissage des parois du four

L'enveloppe des fours (chambre de combustion, zone de convection, cheminée) est constituée d'une paroi métallique revêtue intérieurement d'un garnissage isolant et réfractaire.

Les propriétés requises pour un garnissage isolant réfractaire sont variées :

- Conductivité thermique faible ;
- Température pyroscopique élevée ;
- Résistance mécanique élevée ;
- Bonne résistance aux variations de température ;
- Facilité de mise en œuvre.

Certaines propriétés sont parfois contradictoires et la sélection d'un matériau pour une application particulière est le résultat d'un compromis. Dans certains cas, c'est un garnissage multicouche qui permettra d'allier les propriétés opposées de plusieurs matériaux.



Figure 17: Calorifugeage en fibres céramiques

Les différents types de garnissage sont:

➤ **Matériaux utilisables directement au contact des fumées :**

Briques réfractaires: elles sont constituées d'argiles réfractaires (silicate d'aluminium hydraté) ou de terres de diatomées et possédant une structure poreuse naturelle ou artificiellement provoquée. Les briques sont obtenues le plus souvent par moulage et cuisson. Elles sont posées avec un coulis d'assemblage à prise à l'air.

Béton isolant réfractaire : il est constitué d'un mélange de ciment alumineux fondu et d'agréats réfractaires qui sont mis en place par coulée ou par projection. La prise est hydraulique. Ils sont fixés par des ancrages en V soudés sur la tôle de l'enveloppe du four.

Fibres céramiques : ces fibres céramiques, d'un diamètre de $3\mu\text{m}$, sont obtenues par soufflage d'une masse réfractaire silico-alumineuse fondue à base de produits extra purs. Elles sont conditionnées sous les formes suivantes :

- Matelas de fibres fixés sur les parois du four par des ancrages soudés sur la tôlerie et constitués, par exemple, de tige et rondelle,
- Modules préfabriqués, assemblage de nappes de fibres céramiques sous forme de cube que l'on ancre côte-à-côte sur la tôlerie. Une variante peut être constituée de bandes découpées de nappes de fibres céramiques, assemblées entre elles au montage du four pour constituer l'équivalent de modules.

➤ **Matériaux utilisables en deuxième couche :**

Fibres minérales: ces fibres sont obtenues par soufflage d'une masse réfractaire de roches synthétiques fondues. Les panneaux constitués de ces fibres sont très isolants et utilisés derrière des murs constitués de briques.

Panneaux rigides de silicate de calcium: très isolants, utilisés en 2eme couche derrière une paroi de briques ou de béton réfractaire.

I.5.d. Brûleurs

Les brûleurs ont pour fonction de réaliser la combustion et donc d'assurer :

- Le mélange du combustible et du comburant, de façon à ce que chaque molécule de l'un puisse trouver la ou les molécules de l'autre, auxquelles elle va s'associer ;
- L'inflammation du mélange ;
- La stabilité de la combustion, tout en assurant une combustion complète.

Les figures suivantes (18, 19, 20, 21) montrent respectivement des brûleurs en marche, l'ouverture d'un brûleur, la vue extérieure d'un brûleur et le schéma fonctionnel d'un brûleur.



Figure 18: brûleurs en marche



Figure 19: Brûleur éteint et son ouverture



Figure 20: vue extérieur d'un brûleur

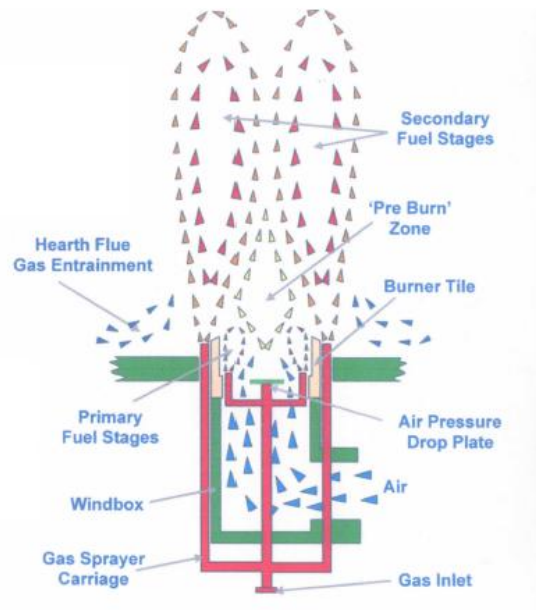


Figure 21: Schéma fonctionnel d'un brûleur

Les combustibles utilisés dans les brûleurs peuvent être soit liquide (la pulvérisation du liquide est effectuée par de la vapeur d'eau ou par une pulvérisation mécanique, ou les deux), soit gazeux.

Les polluants principaux sont les imbrûlés (CO , CH_4), les oxydes de soufre SO_x ($\text{SO}_2 + \text{SO}_3$), les oxydes d'azote NO_x (NO , NO_2 , N_2O).

La teneur en imbrûlés est faible et n'apparaît généralement que pour des excès d'air trop faibles. Le soufre du combustible est totalement transformé, principalement en anhydride sulfureux SO_2 . Seuls les oxydes d'azote NO et NO_2 sont formés en quantités significatives. Le NO (environ 90% des NO_x), formé dans la chambre de combustion, se transforme à l'émission (cheminée) et NO_2 par réaction photochimique avec l'oxygène de l'air.

I.5.e. Préchauffeurs d'air

Ce sont des échangeurs de chaleur tubulaires ou à plaques qui réchauffent l'air de combustion avec les fumées sortantes de la cheminée. Leur présence n'est pas indispensable.

I.6. Le rendement thermique des fours tubulaires [5]

Les pertes de chaleur à travers les parois du four dépendent de l'épaisseur et de la matière du garnissage réfractaire isolant. Toutefois, pour un garnissage isolant économiquement optimum, ces pertes sont faibles.

Les pertes de chaleur les plus importantes sont celles dues au rejet des fumées chaudes par la cheminée. Celles-ci sont le résultat de deux facteurs : le débit de fumées et leur température. Le débit de fumées s'accroît avec l'excès d'air. Il y a donc lieu de fonctionner avec un excès d'air aussi faible que possible, tout en veillant à obtenir une combustion complète, sans

imbrûlés. Un fonctionnement à excès d'air trop bas peut conduire à des pertes par imbrûlés plus importantes que le gain réalisé par la réduction de l'excès d'air. Indépendamment de la perte due à la chaleur latente des imbrûlés, ceux-ci entraînent l'encrassement des surfaces d'échange et, par conséquent, une élévation de la température des fumées qui persiste après le retour à un fonctionnement sans imbrûlés.

La température des fumées constitue le facteur principal des pertes de chaleur d'un four. Pour refroidir les fumées, il est nécessaire de disposer d'un fluide froid à réchauffer. Si le fluide à réchauffer est à une température qui ne permet pas d'obtenir une température de fumées suffisamment basse (c'est-à-dire un rendement thermique satisfaisant), on peut recourir aux solutions suivantes :

- **Production de vapeur d'eau:** cette solution ne réduit pas la consommation de combustible, mais elle peut être intéressante si la vapeur d'eau peut être valorisée.
- **Recyclage de la chaleur des fumées par réchauffage de l'air de combustion :** les fumées, à leur sortie de la zone de convection, sont refroidies dans un échangeur de chaleur dont le fluide froid est l'air nécessaire au four pour brûler le combustible.

I.7. Données économiques [5]

Les fours entrent, pour un pourcentage non négligeable, dans le prix de revient d'une unité de fabrication (cette valeur peut atteindre 20% environ).

En outre, ils consomment jusqu'à 95% et plus du combustible utilisé dans l'unité, ce qui, par exemple, situe environ le coût d'énergie consommée entre 30 et 40 fois le prix du four dans un calcul de pay-out⁵ sur trois ans (figure 22).

Par ailleurs, il est normal d'introduire dans ce calcul économique les notions du prix de revient de l'exploitation et de l'entretien, afin de se serrer de plus près encore la réalité industrielle.

⁵ Taux de distribution des bénéfices

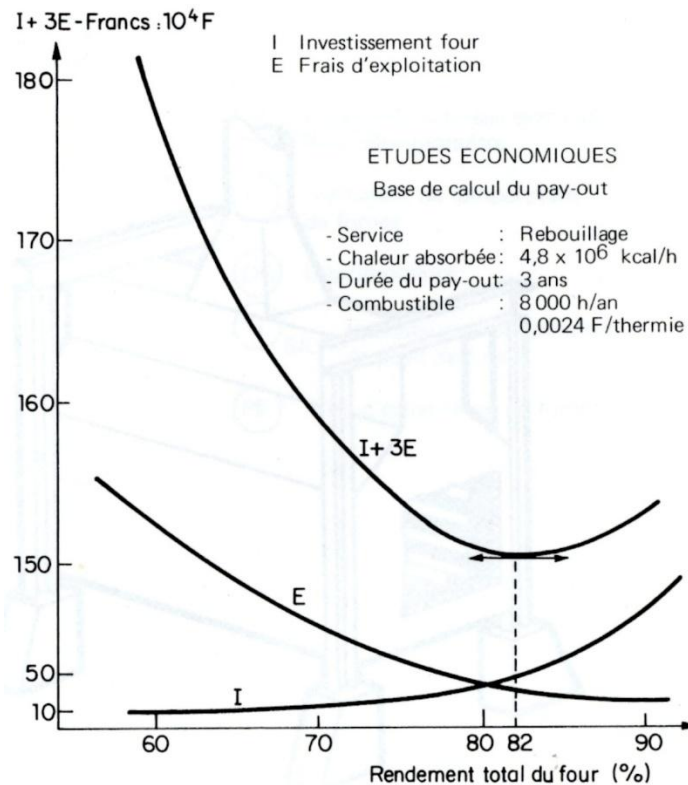


Figure 22: Etude économique d'un four de rebouillage

I.8. Dimensionnement [5]

Le dimensionnement d'un four pétrochimique fait appel aux lois de la thermique, de la mécanique des fluides et de la thermodynamique, appliquées aux hydrocarbures et autres fluides complexes.

Nous devons toutefois souligner que ces lois sont corrigées par des coefficients pratiques éprouvés durant de longues années d'expérience. Cette expérience repose principalement sur un suivi des installations réalisées dans le cadre du service après-vente et, plus généralement, sur les études statistiques qui visent à utiliser scientifiquement les informations reçues et l'enseignement acquis à tous les niveaux.

La création et la détermination d'unités nécessitent des connaissances techniques et économiques éprouvées, au sens le plus large du terme, afin de permettre des études poussées pour la recherche de l'investissement optimal compte tenu du programme de production envisagé.

L'ensemble de ces connaissances et études doit être respectivement utilisé et effectué dans le cadre d'une étroite collaboration entre tous les participants. La préoccupation principale est le dilemme prix, qualité et fiabilité.

II. Calcul des fours tubulaires

L'industrie pétrolière mettait au point ses premiers fours à partir de tâtonnement basés sur des théories générales difficilement applicables. Les premiers travaux pour se dégager d'un trop grand empirisme sont dus en particulier à *Lovo et Evans* pour la radiation et à *Monrad* pour la convection : ils restent la base des connaissances actuelles.

Le calcul d'un four de réchauffage de fluide comporte différents aspects qui interfèrent entre eux :

Combustion :

- Composition des fumées à partir des combustibles.
- Chaleur disponible dans les fumées en fonction de leur température.

Thermique :

- Bilan des chaleurs entrantes et sortantes.
- Transfert de chaleur (surfaces d'échange, garnissage isolant).

Hydrodynamique :

- Perte de pression subie :
 - Par le fluide chauffé ;
 - Par l'air et les fumées (tirage du four).

Mécanique :

- Tenue à la température et à la pression des surfaces d'échange.
- Support des faisceaux tubulaires.
- Résistance de la structure du four aux poids morts (réfractaire, surface d'échange) et aux extérieurs (vent, tremblement de terre).

II.1. Étude de la combustion [3]

Les combustibles utilisés dans les fours de raffinerie sont des gaz (gaz naturel ou gaz de raffinerie provenant des opérations de distillation ou de craquage ou de réformation) ou des liquides (distillats, résidus de distillation ou fuel-oils commerciaux). Ces combustibles contiennent souvent des impuretés, en particulier du soufre dont la teneur peut être négligeable suivant l'origine du combustible. Ces combustibles sont des mélanges d'hydrocarbures.

II.1.a. Pouvoirs calorifiques [6]

Dans les domaines d'application (fours, brûleurs, moteurs à combustion interne, lutte contre incendie), on utilise souvent la notion de pouvoir calorifique, qui est l'enthalpie de réaction par unité de masse de combustible ou l'énergie obtenue par la combustion d'un kilogramme de combustible.

La combustion d'hydrocarbures dégage de l'eau sous forme de vapeur. Cette vapeur d'eau contient une grande quantité d'énergie. Ce paramètre est donc pris en compte de manière spécifique pour l'évaluation du pouvoir calorifique, et l'on définit :

- **Le pouvoir calorifique supérieur (PCS):** « Quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée ».
- **Le pouvoir calorifique inférieur (PCI):** « Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non récupérée ».

La différence entre le PCI et le PCS est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (L_v) multipliée par la quantité de vapeur produite (m). On a la relation: $PCS = PCI + m \times L_v$.

Comme dans les fours industriels les fumées sortent à des températures supérieures au point de condensation de la vapeur d'eau, on considère pour les calculs de fours et, en particulier, les calculs de rendement, uniquement le pouvoir calorifique inférieur.

II.1.b. Excès d'air

Pour avoir une combustion complète, c'est-à-dire sans présence d'oxyde de carbone dans les fumées sortant du four, il est nécessaire d'introduire dans le four une quantité d'air supérieure à celle strictement nécessaire à la combustion. Cette quantité est appelé excès d'air.

Cet excès d'air augmente la consommation du combustible vu qu'il va être rejeté à la température des fumées. La perte de rendement due à l'excès d'air est d'autant plus forte que la température des fumées est élevée, donc que le rendement thermique du four est bas. À la limite, pour un four qui aurait un rendement de 100%, l'excès d'air n'aurait pas d'importance.

Si l'on réduit l'excès d'air en dessous de la valeur qui conduit à la combustion complète, la teneur en imbrûlés croît et fait perdre le gain que l'on escomptait en réduisant l'excès d'air, et ceci instantanément (on perd la chaleur de combustion des imbrûlés), ou dans le temps par effet cumulatif (les imbrûlés peuvent encrasser les surfaces d'échange, ce qui conduit à une élévation de température des fumées et donc à une perte de chaleur sensible).

Les fours modernes, lorsqu'ils sont équipés de brûleurs bien adaptés au combustible utilisé, peuvent être conduits avec un excès d'air de 20 à 30%, si l'on y brûle du gaz, et 30 à 40%, si l'on y brûle du fuel avec une pulvérisation correcte.

II.1.c. Analyse des fumées

Le contrôle de la combustion et en particulier la détermination de l'excès d'air, se fait par l'analyse des fumées. Cette analyse est effectuée à l'aide de l'appareil d'Orsat ou d'appareils qui en sont dérivés qui permettent de mesurer par absorption dans des réactifs adéquats les teneurs en CO_2 , O_2 et CO des fumées sèches, c'est à dire après élimination de la vapeur d'eau.

II.1.d. Température théorique de combustion (ou de la flamme)

C'est la température idéale à laquelle s'élèveraient les produits de la combustion dans le cas d'une combustion instantanée dans une enceinte parfaitement athermane. Les températures atteintes dans un four sont toujours inférieures à cette température théorique parce que la combustion n'est jamais instantanée et que les gaz commencent à rayonner dès que leur température est supérieure à celle des tubes du four.

On peut facilement calculer cette température théorique quand on a tracé la courbe de l'enthalpie des gaz de combustion en fonction de la température. Elle correspond au point où l'enthalpie des fumées est égale à la chaleur libérée par la combustion (pouvoir calorifique inférieur du combustible + chaleur sensible du combustible + chaleur sensible de l'air de combustion).

II.1.e. Chaleur perdue par les fumées et rendement d'un four

On peut déterminer rapidement le rendement d'un four quand on connaît l'excès d'air et la température des fumées.

Soit en effet H_f l'enthalpie des fumées, calculée d'après leur composition à la température d'entrée de la cheminée.

Soit H_c l'enthalpie de combustion (pouvoir calorifique + chaleur sensible du combustible + chaleur sensible de l'air de combustion) à laquelle on ajoute la quantité de chaleur apportée le cas échéant par la vapeur d'atomisation que l'on retrouve dans les fumées.

$H_c - H_f$ est, aux pertes par les parois du four près, la quantité de chaleur absorbée dans le four.

$$\eta = 100 \times \frac{(H_c - H_f)}{H_c}$$

II.2. Calculs thermiques [3]

II.2.a. Zone de radiation

Évaluation de la quantité de chaleur transmise en radiation

Les caractéristiques dimensionnelles ainsi que le nombre et la disposition des tubes de zone de radiation étant fixés, il nous est possible de calculer la fraction de la quantité de chaleur libérée par la combustion qui sera transmise par radiation au fluide circulant dans les tubes. On pourra également déterminer la température des fumées à la sortie de cette zone de radiation. Nous négligerons les phénomènes de convection à l'intérieur de la chambre de combustion.

Pour effectuer ce calcul, on est amené à faire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

On admet tout d'abord que la surface des tubes (surface absorbante ou surface froide) et la surface des produits de la combustion (surface émettrice) peuvent être assimilées à des surfaces planes, de dimensions très grandes par rapport à leur distance, et que les températures de chacune de ces surfaces sont uniformes.

L'hypothèse de la température constante des gaz de combustion suppose une combustion lente, comme dans le cas des brûleurs à flamme de diffusion.

On suppose aussi que les réfractaires sont parfaitement isolants, c'est-à-dire qu'ils rayonnent vers l'intérieur du four la totalité du rayonnement qu'ils reçoivent. Cette hypothèse revient à admettre que la quantité de chaleur transmise à l'extérieur par les parois réfractaires est égale à celle qu'elles reçoivent par convection des gaz à l'intérieur du four. Dans ces conditions, les lois du rayonnement permettent d'écrire l'équation :

$$Q_A = \sigma F A (T_g^4 - T_A^4)$$

Avec : $\sigma = 4,96 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/h.m}^2 \cdot \text{K}^4$ (Constante de Stefan-Boltzmann)

F étant un facteur sans dimensions qui dépend du facteur d'émission de la flamme, du facteur d'absorption de la surface des tubes et de coefficients géométriques liés à la disposition et à l'étendue de la surface absorbante et des réfractaires.

Si les tubes sont assimilés à une surface plane et la « surface » des gaz assimilée à une surface parallèle, si de plus ces deux surfaces étaient noires, le coefficient d'échange serait :

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_A} + \frac{1}{\varepsilon_F} - 1}$$

Si on tient compte du rayonnement des réfractaires, le coefficient d'échange devient :

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_A} + \frac{A}{A_R + A} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_F} - 1 \right)}$$

I.1.a. Zone de convection

La zone de convection est constituée d'un faisceau de tubes placés sur le trajet des fumées sortant de la zone de radiation et allant à la cheminée.

Le calcul du coefficient de convection des fumées sur les tubes est un calcul classique; cependant, le problème se complique du fait que les tubes des premières rangées peuvent recevoir directement la radiation des flammes. Ces tubes sont donc soumis à la fois aux effets de la radiation et aux effets de la convection. Leur taux de transfert est donc très important et

des précautions particulières doivent être pris pour éviter qu'ils ne soient surchauffés ; ces tubes sont toujours lisses et la vitesse de circulation du fluide doit y être élevée.

D'autre part, la température des gaz est encore telle que les phénomènes de radiation ne sont pas négligeables. Les parois réfractaires participent, elles aussi, à cet échange par radiation.

Monrad a étudié particulièrement le problème du calcul des zones de convection et a établi pour les faisceaux de tubes lisses les formules suivantes, valables en unités métriques :

Coefficient de convection pure h_c :

$$h_c = 0,018 \times Cp \times (G_{max})^{2/3} \times T^{0,3} / D^{1/3}$$

Coefficient de radiation des gaz h_{rg} :

$$\begin{aligned} h_{rg} &= (2,2 \cdot 10^{-2} \times t) - 2 \\ &= (2,2 \cdot 10^{-2} \times T) - 8 \end{aligned}$$

Coefficient de radiation des murs h_m :

$$h_m = 0,195 \times e \times (T'/100)^3$$

avec : e : facteur d'émission des murs = 0,95;

Effet de la radiation des murs:

$$E(\%) = \frac{100 \times h_m \times A_m}{(h_c + h_{rg} + h_m) \times A_t}$$

L'effet des murs peut atteindre 15% du coefficient global.

Coefficient global de film (côté fumées) :

$$h_o = \frac{100 + E}{100} (h_c + h_{rg})$$

II.3. L'hydrodynamique dans le four [4]

II.3.a. Perte de charge dans les faisceaux tubulaires

Le diamètre des tubes utilisés dans les différentes zones du four, ainsi que le nombre de circuits en parallèles (passes) est fonction de la perte de pression que l'on consent à dépenser dans le four.

Une perte de pression élevée permet de réduire le nombre de passes et permet ainsi de réduire les risques d'une mauvaise distribution entre les passes, mais, par contre, elle entraîne une dépense d'énergie conduisant à des frais d'exploitation.

Une perte de pression trop faible conduit à des vitesses de circulation faibles. Le coefficient de convection à l'intérieur des tubes dépend fortement de la vitesse et une faible vitesse ne permet donc pas d'avoir un refroidissement efficace des tubes. Il en résulte des températures de métal élevées qui peuvent entraîner la dégradation du fluide traité, et nécessiter des tubes en matériaux plus nobles.

II.3.b. Perte de pression subie par les fumées (notion de tirage)

Le tirage est l'écoulement des fluides qui permet d'amener l'air au contact du combustible, d'assurer la circulation des fumées sur la surface de chauffe, et aussi d'évacuer les fumées au-dessus du sol.

Le tirage peut-être naturel ou mécanique tout dépend de l'utilisation, ou non, de ventilateur.

Le tirage, ou plus exactement la dépression du tirage, est la différence de pression en un niveau donnée entre le circuit des fumées à l'intérieur du four et celui de l'air à l'extérieur du four. Elle est mesurée avec un déprimomètre constitué par un tube en U. La mesure est fréquemment exprimée en millimètre d'eau. On lui donne une valeur positive pour une pression de fumées inférieure à celle de l'air.

- **Utilité de la notion de tirage :**

Les fours n'ayant pas une étanchéité absolue, un tirage négatif aura pour conséquence la sortie des fumées par les fissures, ce qui entrainera la détérioration de l'enveloppe du four par les fumées chaudes. Si au contraire le tirage est positif, l'air tendra à entrer dans le circuit des fumées. Le résultat ne sera qu'un refroidissement des fumées préjudiciable à l'efficacité, mais la structure du four sera sauvegardée.

Le tirage est influencé par différents facteurs. Il sera plus grand quand la masse volumique de l'air sera plus grande (par temps froid, sec, et à une altitude basse), quand la masse volumique des fumées est plus petite (fumées chaudes), et enfin quand la hauteur et le diamètre de la cheminée seront grands.

- **Réglage du tirage :**

En général, le tirage minimum est localisé à la sortie de la zone de radiation. Les conditions atmosphériques ainsi que l'allure de fonctionnement du four font varier le tirage.

Afin de maintenir le tirage à sa valeur minimum à la sortie de la zone de radiation (environ 2 mm d'eau) il convient d'interposer une résistance variable, c'est le rôle du registre de cheminée.

Le registre devra être réglé par le tirage et non par la teneur en oxygène des fumées. Le réglage de l'excès d'air (ou la teneur en oxygène des fumées) sera effectué par le réglage des registres d'admission d'air aux brûleurs.

Si nous avons un ventilateur de soufflage d'air de combustion, c'est le débit du ventilateur qui permettra de régler l'excès d'air. Il faudra conserver un tirage positif minimum à la sortie de la zone de radiation par action sur le registre de cheminée.

II.4. Calculs mécaniques des structures [4]

Les structures du four sont calculées, pour résister aux efforts du vent, tremblement de terre, poids propre, d'une façon classique, comme tous les ouvrages métalliques. De plus, l'enveloppe doit résister aux différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur, sous l'influence éventuelle des ventilateurs de soufflage et/ou de tirage.

III. Contrôle et marche des fours [4]

La plupart des fours de raffinerie sont équipés d'une régulation automatique de la température de sortie du fluide réchauffé, le débit de combustible étant asservi à cette température. Comme les installations ont toutes un contrôle automatique poussé, les variations de température de sortie sont faibles et il n'est pas nécessaire de prévoir un réglage automatique de la combustion et en particulier de l'excès d'air. Cependant, dans le cas d'une variation importante du débit de combustible, il faut procéder au réglage manuel de l'excès d'air.

La combustion doit être l'objet d'une surveillance continue, en particulier, en ce qui concerne la température des fumées, la dépression dans le four et la forme des flammes. Toute valeur excessive de la température des fumées, de même que la montée en pression à l'intérieur du four, peut provoquer des dommages préjudiciables au fonctionnement ou à la vie du four. Les flammes doivent être vigoureuses, sans étincelles. Elles ne doivent jamais lécher les tubes.

Quatrième Chapitre :

VÉRIFICATION DU FOUR ÉTUDIÉ

Abréviations :

Symbole	Définition	Unité
$C_{p_{air}}$	Chaleur spécifique de l'air de combustion	kcal/kg.°C
$C_{p_{liq}}$	Chaleur spécifique liquide	kcal/kg.°C
$C_{p_{fumées}}$	Chaleur spécifique des fumées	kcal/kg.°C
$C_{p_{gaz}}$	Chaleur spécifique fuel gaz	kcal/kg.°C
$C_{p_{vap}}$	Chaleur spécifique vapeur	kcal/kg.°C
D_b	Débit du brut	kg/h
D_f	Débit des fumées	kg/h
D_g	Débit du fuel gaz	kg/h
e	Excès d'air	%
h	Taux d'humidité relative	%
H_e	Enthalpie d'entrée du brut	kcal/kg
H_f	Enthalpie des fumées	kcal/kg
H_s	Enthalpie de sortie du brut	kcal/kg
$M_{fumées}$	Masse molaire des fumées	g/mol
M_{gaz}	Masse molaire du fuel gaz	g/mol
mf	Masse des fumées	kg
P	Pression	atm
P_{atm}	Pression atmosphérique	atm
PCI	Pouvoir calorifique inférieur	kcal/kg
P_{vap}	Tension de vapeur	atm
Q_a	Quantité de chaleur absorbée par le brut par heure	kcal/h
Q'_{air}	Chaleur sensible de l'air par heure	kcal/h
Q_d	Quantité de chaleur dégagée par la combustion par heure	kcal/h
Q_f	Quantité de chaleur perdue dans les fumées par heure	kcal/h
Q'_{gaz}	Chaleur sensible du gaz par heure	kcal/h
Q_p	Quantité de chaleur perdue dans les parois par heure	kcal/h
T_e	Température d'entrée du brut	°C
T_f	Température de sortie des fumées	°C
T_s	Température de sortie du brut	°C
V_{air}	Volume de l'air	Nm ³
V_{eau}	Volume de l'eau	Nm ³
$\rho_{fumées}$	Masse volumique des fumées	kg/m ³
ρ_{gaz}	Masse volumique du fuel gaz	kg/m ³

Ce chapitre a pour objectif le calcul du rendement du four selon les données de design et les données du fonctionnement actuel, et de comparer les résultats obtenus.

I. Description du four étudié

Le four étudié dans le cadre de ce projet est un four de rebouillage, cylindrique verticale. Les brûleurs sont placés sur la sole, à la base du cylindre. Les tubes sont verticaux en zones de radiation et horizontaux en zone de convection.

Les tubes constituant la surface d'échange de la zone de radiation sont placés devant le garnissage réfractaire isolant de l'enveloppe (fibre céramique). Un espace égal à environ un diamètre de tube est maintenu entre les tubes et cette paroi réfractaire.

L'air de combustion est introduit dans les brûleurs par la dépression régnant dans la chambre de combustion (huit brûleur à tirage naturel).

Pour assurer la combustion complète du combustible, un excès d'air, par rapport à la valeur stœchiométrique, est ajouté. Cet excès d'air dépend du brûleur, de la température de l'air de combustion et principalement du combustible.

Le fluide traité est du pétrole brut déshydraté et dessalé. Son rebouillage a pour but de le stabiliser donc diminuer sa TVR. Le combustible utilisé est du fuel gaz.

II. Dimensions et caractéristiques

Tube :

Diamètre: 0,1683 m

Entraxe: 0,3048 m

Nombre de tube en zone de radiation : 80 tubes

Nombre de tube en zone de convection: 80 tubes

Longueur des tubes en zone de radiation : 20,845m

Longueur des tubes en zone de convection: 7,82 m

Surface d'échange :

Surface des tubes en zone de radiation: 881,26 m

Surface des tubes en zone de convection: 330,61 m

Chambre de radiation :

Hauteur : 21,752 m

Diamètres :

-corps extérieur : 8,388 m

-revêtement : 8,222 m

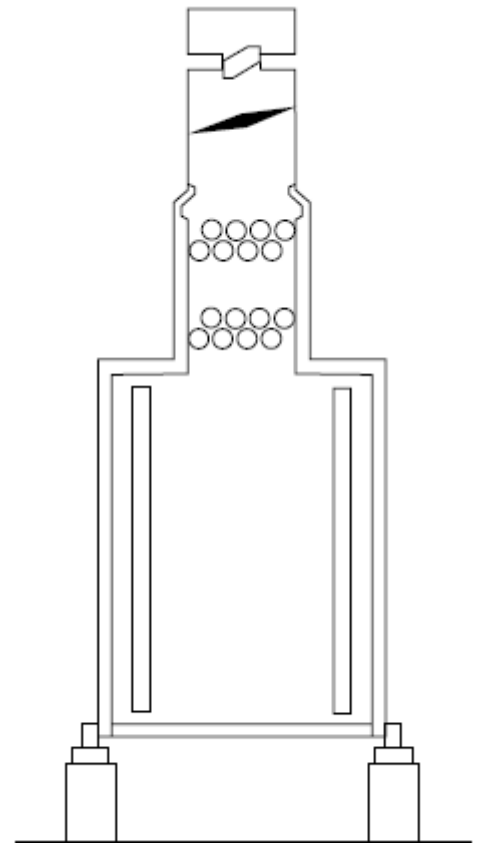
-cercle de tubes : 7,764 m

Chambre de convection :

Hauteur : 4,004 m

Longueur:7,820 m

Largeur: 2,858 m



Dans cette partie nous allons calculer les quantités de chaleur absorbées par le brut, dégagées par le fuel gaz, celles des fumées, puis déduire les pertes par les parois et le rendement du four.

III. Calculs d'après les données du constructeur (Design)

Le calcul des données design, ou données du constructeur, est un calcul pour des valeurs maximums de chauffe et de débit.

Fluide à chauffer :

Débit max : $D_b = 825000$ kg/h

Tableau 1: Les conditions opératoires du four selon le constructeur

	Entrée	Sortie
Température (°C)	158	199
% poids vaporisé :	0	0,1675
$C_{p_{liq}}$ (kJ/kg°C)	2,626	2,740
$C_{p_{vap}}$ (kJ/kg°C)	-	2,500

- **Conditions extérieures :**

Air de combustion :

- ❖ Température: $T_{ext} = 25$ °C
- ❖ Humidité : $h = 50$ %

- **Combustible :**

Tableau 2: Composition du fuel gaz selon le constructeur

composition	N ₂	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂	C ₆ ⁺
Volume (%)	0,71	0,35	0,41	71,54	15,42	7,91	0,68	1,94	0,31	0,39	0,34

- Débit max: $D_g = 2504$ kg/h
- Excès d'air : $e = 15$ %
- Pouvoir calorifique inférieur: PCI = 11356,7 kcal/kg
- Masse molaire: $M_{gaz} = 22,4$ g/mol

III.1. Quantité de chaleur absorbée par le brut

$$Q_a = (H_s - H_e) \times D_b$$

Avec :

$$H_e = C_{p_{liq}} \times T_e$$

$$H_e = 2,626 \times 158$$

$$H_e = 414,91 \text{ kJ kg}$$

$$H_s = (\%vap \times C_{p_{vap}} + \%liq \times C_{p_{liq}}) \times T_s$$

$$H_s = (0,1675 \times 2,5 + 0,8325 \times 2,74) \times 199$$

$$H_s = 537,26 \text{ kJ/kg}$$

Donc :

$$Q_a = (537,26 - 414,91) \times 825000$$

$$Q_a = 100938750 \text{ kJ/h}$$

$$Q_a = 24\,148\,026 \text{ kcal/h}$$

III.2. Quantité de chaleur dégagée par le combustible

Chaleur dégagée = PCI × Débit du gaz + chaleur sensible de l'air + chaleur sensible du gaz

$$Q_d = PCI \times D_g + Q'_{air} + Q'_{gaz}$$

Le PCI du gaz étant donnée, nous calculons les chaleurs sensibles de l'air et du gaz.

$$Q'_{air} = D_{air} \times Cp_{air} \times \Delta T$$

$$Q'_{gaz} = D_{gaz} \times Cp_{gaz} \times \Delta T$$

Pour déterminer D_{air} nous devons déterminer la composition des fumées

- **Composition des fumées :**

On se base sur 100 (Nm³)⁶ de fuel gaz

Tableau 3: détermination du volume d'air nécessaire pour la combustion et la composition des fumées

composants	Volume (%)	O ₂ pour la combustion neutre	Composition des fumées				Composants
			CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	
N ₂	0,71	0,00				0,71	N ₂
H ₂ O	0,35	0,00		0,35			H ₂ O
CO ₂	0,41	0,00	0,41				CO ₂
CH ₄	71,54	143,08	71,54	143,08			CH ₄
C ₂ H ₆	15,42	53,97	30,84	46,26			C ₂ H ₆
C ₃ H ₈	7,91	39,55	23,73	31,64			C ₃ H ₈
iC ₄ H ₁₀	0,68	4,42	2,72	3,40			iC ₄ H ₁₀
nC ₄ H ₁₀	1,94	12,61	7,76	9,70			nC ₄ H ₁₀
iC ₅ H ₁₂	0,31	2,48	1,55	1,86			iC ₅ H ₁₂
nC ₅ H ₁₂	0,39	3,12	1,95	2,34			nC ₅ H ₁₂
C ₆₊	0,34	3,23	2,04	2,38			C ₆₊
Total	100,00	262,46		23,20	39,37	1135,45	Air
O ₂ dans excès d'air (15%)		39,37	142,54	264,21	39,37	1136,16	Total
O ₂ dans l'air de combustion		301,83					% volumique
N ₂ dans l'air de combustion		1135,45	9,01	16,70	2,49	71,81	
Air de combustion		1437,28	1582,28				Volume des fumées

⁶ Normaux mètre cube (Nm³): volume d'un mètre cube de gaz calculé dans les conditions normales : 0°C, 1atm

- **La combustion:**

D'après la composition du gaz, nous calculons la quantité d'oxygène nécessaire pour la combustion neutre. La quantité d'excès d'oxygène représente 15% de cette valeur. L'azote représentant 79% de l'air dans l'atmosphère, on déduit donc la quantité de l'air de combustion.

- **La composition des fumées :**

Connaissant la composition du gaz, et d'après les réactions de combustion de chaque constituant, on trouve les quantités dégagées de CO_2 et d' H_2O pour chaque composant.

On rajoute aux fumées la quantité non brûlée d'oxygène et d'azote, ainsi que la vapeur d'eau dans l'air de combustion, calculées comme suit :

- **Volume de la vapeur d'eau dans l'air de combustion :**

$$\text{L'humidité relative étant } h = \frac{P_{\text{atm}} - P_{\text{vap}}}{P_{\text{vap}}} \times \frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{air}}}$$

Nous aurons :

$$V_{\text{eau}} = h \times \frac{P_{\text{vap}}}{P_{\text{atm}} - P_{\text{vap}}} \times V_{\text{air}}$$

La tension de vapeur de l'eau à 25 °C est de 23,77 mmHg (annexe IV)

$$V_{\text{eau}} = 0,50 \times \frac{23,77}{(760 - 23,77)} \times 1437,28 = 23,20 \text{ Nm}^3$$

- **Quantité de fumées dégagée pour 1 kg de gaz :**

Nous avons trouvé que le débit de fumées pour 100 Nm^3 de gaz est de 1582 Nm^3 (tableau ci-dessus), donc 1 Nm^3 de gaz, nous donne 15,82 Nm^3 .

Nous cherchons à trouver la quantité de fumée en kg pour 1 kg de gaz brûlé.

- **Masse volumique du fuel gaz à 0°C et 1 atm:**

Nous considérons le fuel gaz comme gaz parfait :

$$\rho = \frac{M}{22,4}$$

$$\rho_{\text{gaz}} = \frac{22,4}{22,4} = 1 \text{ kg/Nm}^3$$

- **Masse volumique des fumées:**

Nous considérons les fumées comme gaz parfait :

$$\text{Masse molaire fumées : } M_f = \sum x_i M_i$$

X_i : le pourcentage molaire du constituant i

M_i : La masse molaire du constituant i

$$M_f = 9,01 \times 44 + 16,70 \times 18 + 2,49 \times 32 + 71,81 \times 28 = 27,87 \text{ g/mol}$$

$$\rho_{\text{fumées}} = \frac{27,87}{22,4} = 1,24 \text{ kg/ Nm}^3$$

D'où :

1 Nm³ de gaz = 1 kg de gaz

15,82 Nm³ de fumées = 15,82 × 1,24 = 19,62 kg

Donc 1kg de gaz nous donne: 19,62 kg de fumées.

Il nous faut donc 18,62 kg d'air pour brûler 1kg de gaz.

- **Débit d'air :**

$$D_{\text{air}} = 18,62 \times D_g = 18,62 \times 2504 = 46624,54 \text{ kg/h}$$

- **Débit des fumées :**

$$D_f = 19,62 \times D_g = 19,62 \times 2504 = 49128,5 \text{ kg/h}$$

Tableau 4: Chaleur sensible de l'air et du gaz à 25°C

	Débit (kg/h)	Température (°C)	Cp (kcal/kg.°C)	Q' (kcal/h)
air	46624,54	25	0,24	279747
fuel gaz	2504	25	0,457	28608,2

Donc :

$$Q_d = PCI \times D_g + Q'_{\text{air}} + Q'_{\text{gaz}}$$

$$Q_d = 11356,7 \times 2504 + 279747 + 28608,2 = 28\ 745\ 532 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_d = 28\ 745\ 532 \text{ kcal/h}$$

III.3. Quantité de chaleur des fumées sortant par la cheminée

$$Q_f = D_f \times C_{p_{\text{fumées}}} \times \Delta t$$

- **Chaleur spécifique moyenne des fumées entre 0°C et t (°C) :**

La chaleur spécifique moléculaire des gaz constituant les fumées varie en fonction de la température.

Mallard et Le Chatellier ont déterminé ces chaleurs spécifiques qui sont :

$$O_2, N_2, H_2, CO \dots \dots \dots C_p = 6,8 + 6,10 \times 10^{-4} \times t \text{ cal/mol}$$

$$\text{Vapeur d'eau} \dots \dots \dots C_p = 8,1 + 2,9 \times 10^{-4} \times t \text{ cal/mol}$$

$$\text{CO}_2 \dots \dots \dots C_p = 8,5 + 3,7 \times 10^{-4} \times t \text{ cal/mol}$$

D'après la composition des fumées :

$$C_{p_{\text{fumées}}} = \sum C_{p_i} \times \%i$$

i étant respectivement O_2 , N_2 , H_2O , CO_2

Donc :

$$C_{p_{\text{fumées}}} = 7,097 + 5,501 \times 10^{-4} \times t \text{ kcal/kmol}$$

$$\text{Masse molaire des fumées} = 27,87 \text{ g/mol}$$

$$C_{p_{\text{fumées}}} = 0,2573 + 0,1919 \times 10^{-4} \times t \text{ kcal/kg}$$

$$T_f = 248^\circ\text{C}$$

$$C_{p_{\text{fumées}}} \text{ à } 248^\circ\text{C} = 0,2573 + 0,1919 \times 10^{-4} \times 248 = 0,2621 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

$$Q_f = 49128,5 \times 0,2621 \times 248 = 3\,193\,392 \text{ kcal/h}$$

$Q_f = 3\,193\,392 \text{ kcal/h}$
--

• **Détermination graphique de l'enthalpie des fumées :**

$$C_{p_{\text{fumées}}} = 0,2573 + 0,1919 \times 10^{-4} t \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Quantité de chaleur des fumées pour 1kg de combustible} = m_f \times C_p \times t$$

$$= 19,62 (0,2573 \times t + 0,1919 \times 10^{-4} \times t^2)$$

$$Q_d \text{ pour 1 kg de combustible} = \frac{Q_d}{D_{\text{gaz}}} = \frac{28745532}{2504} = 11480 \text{ kcal/kg}$$

Nous déduisant la courbe donnant la quantité de chaleur restante dans les fumées en fonction de la température. Pour un rendement de 100% correspondant à l'enthalpie dégagée par le combustible par kg : 11480 kcal/kg, la température théorique de la flamme est **1974°C**:

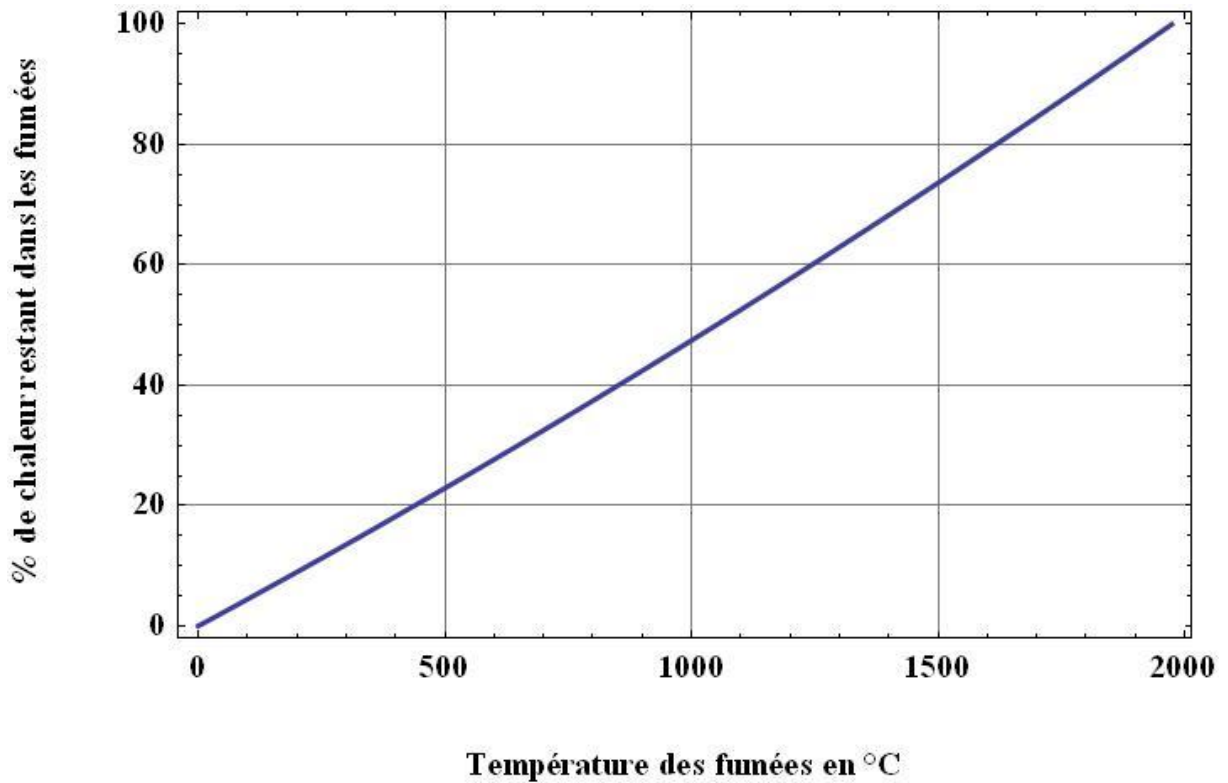


Figure 23: Température des fumées en fonction du pourcentage de chaleur restant dans les fumées

Nous pouvons remarquer que pour une température de sortie des fumées de 248°C, le pourcentage de chaleur restant est de 11%, ce qui se rapproche de la valeur trouvée par calcul.

III.4. Perte de chaleur par les parois

$$Q_p = Q_d - Q_a - Q_f$$

$$Q_p = 1\,404\,114 \text{ kcal/h}$$

Tableau 5: Tableau récapitulatif du cas design

Unité	Q_d	Q_a	Q_f	Q_p
kcal/h	24 148 532	28 745 026	3 193 392	1 404 114
%	100	84	11,1	4,9

Donc le rendement du four est :

$$n = 84\%$$

IV. Calcul d'après les données actuelles

Les données que nous utilisons dans ce calcul ont été relevées du DCS⁷

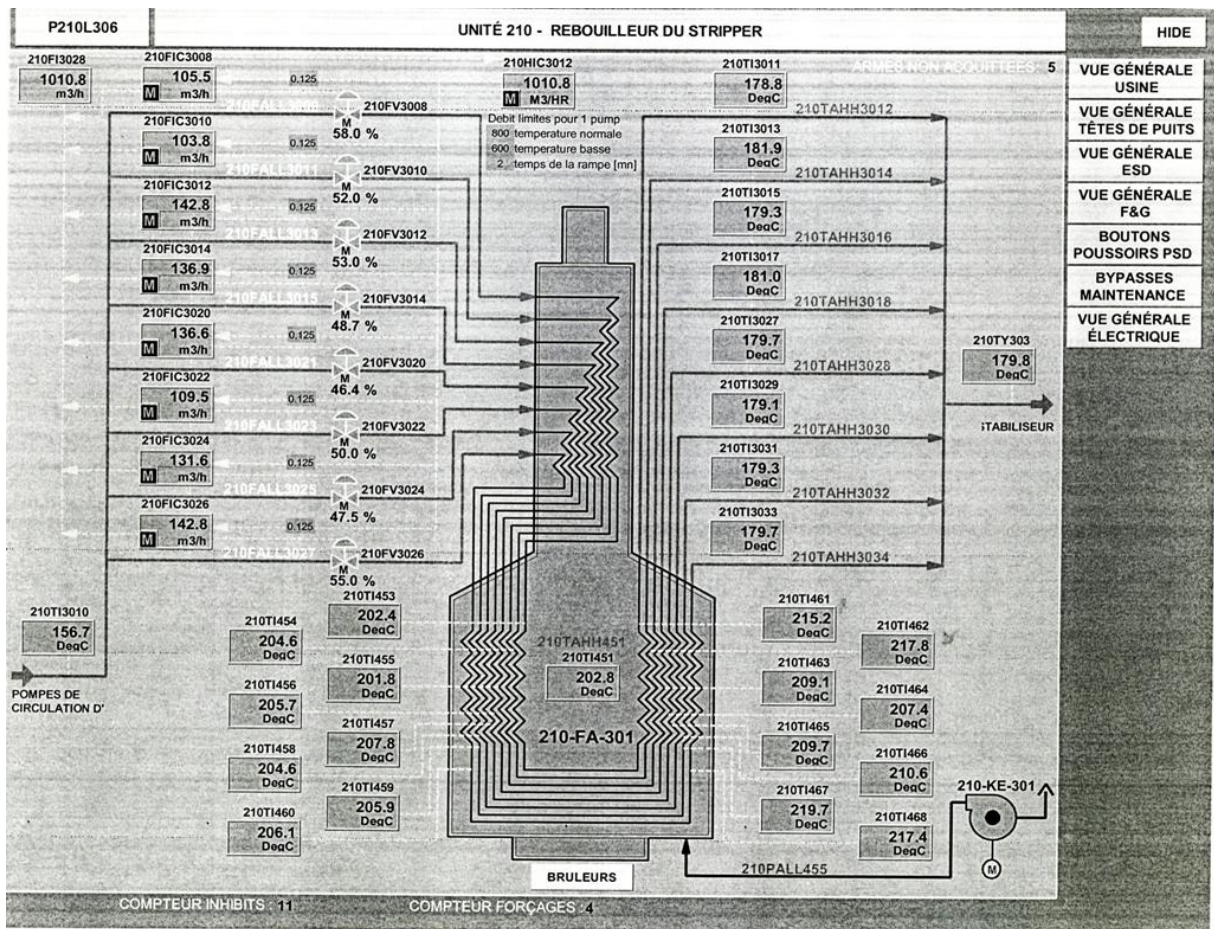


Figure 24 : Données lues sur le DCS

Données :

Huile (pétrole brut):

Débit volumique: 1010,8 m³/h

Masse volumique du brut : 703 kg/m³

Débit massique : $D_b = 1010,8 \times 703 = 710\,600$ kg/h

Tableau 6: Les conditions opératoires actuelles

	Entrée	Sortie
Température (°C)	156,7	179,8
% poids vaporisé	0	0,1237
Cp _{liq.} (kJ/kg°C)	2,6260	2,17400
Cp _{vap.} (kJ/kg°C)	-	2,5000

⁷ Distributed Control System

Conditions extérieures :

- **Air de combustion :**
 - ❖ Température moyenne: $T_{\text{ext}}=25\text{ °C}$
 - ❖ Humidité relative: $h=35\%$

- **Combustible :**

Tableau 7: La composition du fuel gaz selon la dernière analyse du CRD⁸

composition	N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₇ H ₁₆
Volume (%)	0,48	0,38	65,87	17,06	11,36	0,9	2,51	0,44	0,5	0,37	0,13

- Débit : $D_g = 1470\text{ kg/h}$
- Excès d'air : $e = 45\%$
- Masse volumique : $\rho = 1,0249\text{ kg/m}^3$
- Pouvoir calorifique inférieur: $PCI = 11634,27\text{ kcal/m}^3$

$$PCI = \frac{11634,27}{1,0249} = 11340,8\text{ kcal/kg}$$

- Masse molaire: $M = 24,18\text{ g/mol}$

IV.1. Quantité de chaleur absorbée par le brut

$$Q_a = (H_s - H_e) \times D_b$$

$$Q_a = 487,3 - 411,5 \times 710.600$$

$$Q_a = 53\,863\,480\text{ kJ/h}$$

$$Q_a = 12\,886\,000\text{ kcal/h}$$

⁸ Centre de Recherche et Développement

IV.2. Quantité de chaleur dégagée par le combustible

Tableau 8: Le calcul de la composition des fumées

composants	Volume (%)	O ₂ pour la combustion neutre	Composition des fumées				Composants
			CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	
N ₂	0,48					0,48	N ₂
CO ₂	0,38		0,38				CO ₂
CH ₄	65,87	131,74	65,87	131,74			CH ₄
C ₂ H ₆	17,06	59,71	34,12	51,18			C ₂ H ₆
C ₃ H ₈	11,36	56,8	34,08	45,44			C ₃ H ₈
iC ₄ H ₁₀	0,9	5,85	3,6	4,5			iC ₄ H ₁₀
nC ₄ H ₁₀	2,51	16,315	10,04	12,55			nC ₄ H ₁₀
iC ₅ H ₁₂	0,44	3,52	2,2	2,64			iC ₅ H ₁₂
nC ₅ H ₁₂	0,5	4	2,5	3			nC ₅ H ₁₂
C ₆ H ₁₄	0,37	3,515	2,22	2,59			C ₆ H ₁₄
C ₇ H ₁₆	0,13	1,43	0,91	1,04			C ₇ H ₁₆
Total	100,00	262,46		22,07	127,30	1543,04	Air
O ₂ dans excès d'air		127,30	155,92	276,75	127,30	1543,52	Total
O ₂ dans l'air de combustion		410,18					% volumique
N ₂ dans l'air de combustion		1543,04	7,41	13,16	6,05	73,38	
Air de combustion		1953,22	2103,5				Volume des fumées

- **Quantité de fumées dégagée pour 1 kg de gaz :**

1 Nm³ de gaz, nous donne 21,03 Nm³

Masse volumique du f à 0°C et 1 atm:

à 15°C et 1 atm : $\rho_{15^\circ\text{C}} = 1,0249 \text{ kg/m}^3$:

$$\rho_{0^\circ\text{C}} = \rho_{15^\circ\text{C}} \times \frac{288}{273} = 1,0249 \times \frac{288}{273} = 1,08 \text{ kg/Nm}^3$$

- **Masse volumique des fumées:**

$$\rho_{\text{fumées}} = \frac{M}{22,4} = \frac{28,11}{22,4} = 1,25 \text{ kg/Nm}^3$$

1 Nm³ de gaz = 1,08 kg.

21,03 Nm³ de fumées = 21,03 × 1,25 = 26,3 kg

Donc 1kg de gaz nous donne : 26,3 / 1,08 = 24,4 kg de fumées

Il nous faut donc 23,4 kg d'air pour brûler 1kg de gaz.

- **Débit des fumées :**

$$D_f = 24,4 \times D_g = 24,4 \times 1470 = 35868 \text{ kg/h}$$

- **Débit de l'air :**

$$D_a = 23,4 \times D_g = 23,4 \times 1470 = 34398 \text{ kg/h}$$

Tableau 9: Chaleur sensible de l'air et du gaz à 25°C

	Débit (kg/h)	Température (°C)	Cp (kcal/kg.°C)	Q' (kcal/h)
air	34398	25	0,24	206388
fuel gaz	1470	25	0,457	16794,75

$$Q_d = PCI \times D_g + Q'_{air} + Q'_{gaz}$$

$$\boxed{Q_d = 16\,894\,159 \text{ kcal/h}}$$

IV.3. Quantité de chaleur des fumées sortant par la cheminée

Nous supposons dans les calculs suivant que toutes les fumées sortent par la cheminée.

Chaleur spécifique moyenne des fumées entre 0°C et t (°C) :

$$Cp = 0,2525 + 0,1957 \times 10^{-4} t \text{ kcal/kg}$$

$$Cp_{fumées} \text{ à } 202,8^\circ\text{C} = 0,2525 + 0,1957 \times 10^{-4} \times 202,8$$

$$= 0,2565 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_f = D_f \times Cp \times t$$

$$Q_f = 35868 \times 0,2565 \times 202,8$$

$$Q_f = 1865789 \text{ kcal/kg}$$

$$\boxed{Q_f = 1\,865\,789 \text{ kcal/h}}$$

- **Détermination graphique de l'enthalpie des fumées :**

$$Cp = 0,2525 + 0,1957 \times 10^{-4} t \text{ kcal/kg}$$

Enthalpie des fumées pour 1kg de combustible: $H_f = mf \times Cp \times t$

$$H_f = 24,416 (0,2525 \times t + 0,1957 \times 10^{-4} \times t^2)$$

$$Q_d \text{ par kilogramme de gaz} = \frac{16894159}{1470} = 11492,6 \text{ kcal/kg}$$

Nous déduisons la courbe donnant la quantité de chaleur restante dans les fumées en fonction de la température. Pour un rendement de 100% correspondant à l'enthalpie dégagée par le combustible pour 1 kg : 11492,6 kcal/kg, la température théorique de la flamme est : **1652°C**

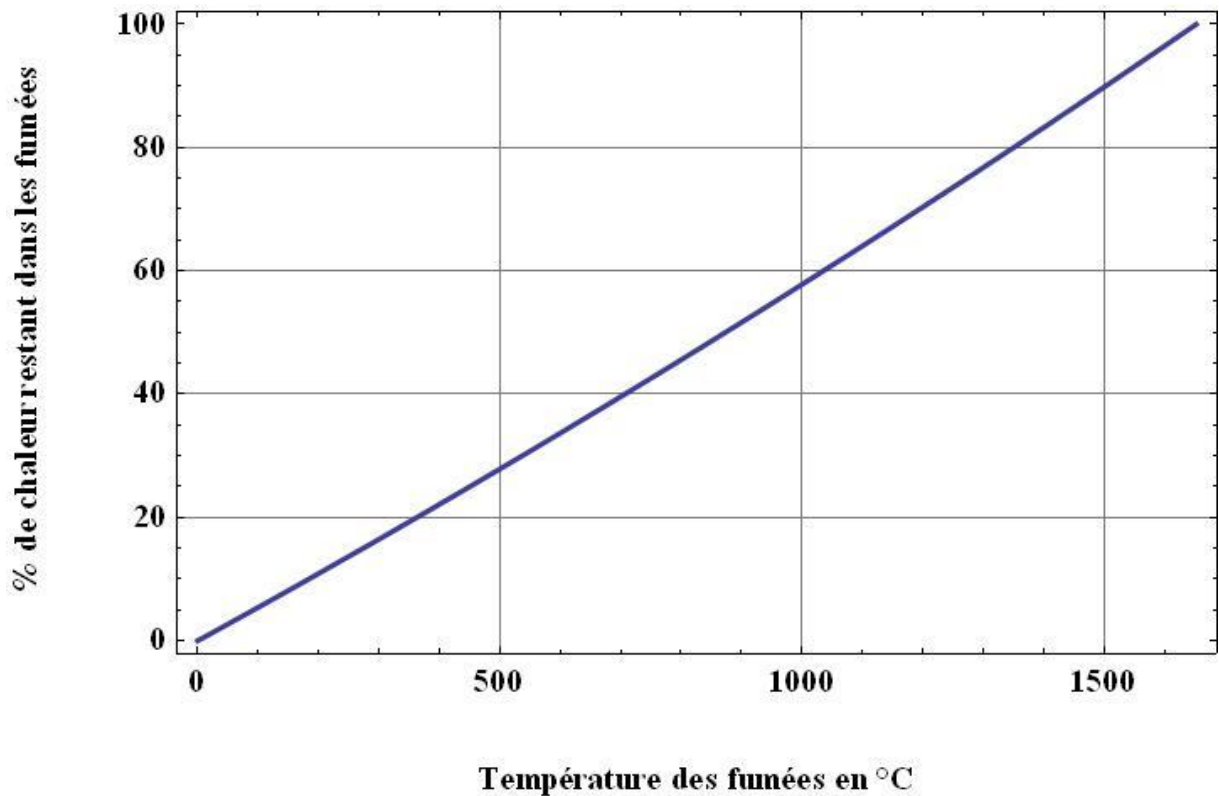


Figure 25: Le pourcentage de la chaleur restant dans les fumées en fonction de la température

Nous pouvons remarquer que pour une température de sortie des fumées de 202,8°C, le pourcentage de chaleur restant est d'environ 10%, ce qui se rapproche de la valeur trouvée par calcul.

IV.4. Perte de chaleur par les parois

$$Q_p = Q_d - Q_a - Q_f$$

$$Q_p = 2.142.370 \text{ kcal /h}$$

Tableau 10: Tableau récapitulatif du cas actuel

Unité	Q_d	Q_a	Q_f	Q_p
kcal /h	16 894 159	12 886 000	1 865 789	2 142 370
%	100	76,3	11	12,7

Donc le rendement du four est :

$$n = 76,3 \%$$

V. Conclusion

Le rendement pour les données du constructeur est de 84%, avec une perte de 4,9 % dans les parois et 11,1% dans les fumées. Ces valeurs sont des valeurs qu'on retrouve habituellement dans le calcul des fours.

Dans le cas actuel, le rendement du four est plus faible : 76,3 % avec 12,7 % dans les parois et 11% de perte dans les fumées. Cependant, pour les calculs effectués dans le cas actuel, nous avons supposé que toutes les fumées sortaient par la cheminée, ce que n'est probablement pas le cas vu que nous avons une condensation qui ne peut être due qu'à une infiltration de matière.

Cinquième Chapitre :

**IDENTIFICATION DE LA CAUSE DE LA
CONDENSATION ET PROPOSITION DE
SOLUTIONS**

I. L'explication du phénomène de condensation

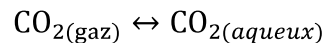
I.1. Hypothèse

Nous avons remarqué que la condensation a lieu entre le calorifuge et la paroi, et que la peinture est détériorée dans certaines zones, ces remarques nous conduisent à supposer que la condensation d'eau entre le calorifuge et la paroi est due à l'infiltration d'une partie des fumées à travers les deux couches de calorifuge.

I.2. Vérification de l'hypothèse

I.2.a. Le pH du condensat [7]

Lors du contact eau-gaz carbonique, celui-ci se dissout :



Le $\text{CO}_{2 \text{ aqueux}}$ réagit avec l'eau, nous pouvons représenter cette réaction par la formation d'un acide : l'acide carbonique (H_2CO_3) qui lui-même réagit pour former l'ion carbonate CO_3^{2-} et l'ion hydrogénocarbonate (couramment nommé ion bicarbonate) HCO_3^- .

L'acide carbonique n'existe aux conditions usuelles sous la forme indiquée qu'en concentration extrêmement faible. De plus lors de sa dissolution le CO_2 va plus ou moins s'hydrater.

Le pH du condensat collecté en bas du four est acide, il varie entre 3 et 6. Cette acidité est peut-être due à une dissolution partielle du CO_2 dans l'eau. Ce qui peut confirmer l'hypothèse.

I.2.b. Les photos thermiques

Pour mesurer la température extérieure de la paroi et vérifier sa distribution, nous avons eu recours à la thermographie infrarouge. Cette technologie nous a permis de prendre des photos thermiques extérieures du four et de voir les zones chaudes et les zones froides. Ces photos thermiques ont été prises à une heure où il faisait froid, pour minimiser l'influence du rayonnement du soleil absorbé par les parois.

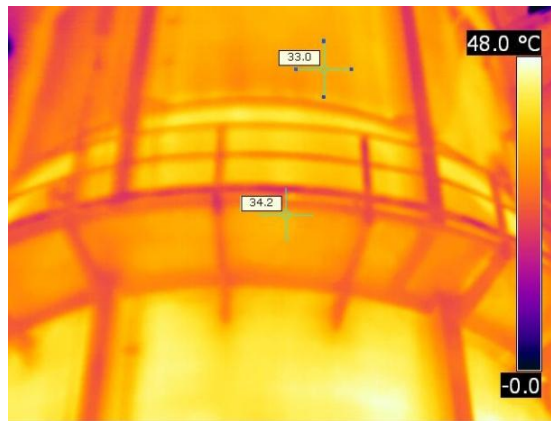


Figure 26: La partie inférieure de la zone de radiation



Figure 27: La partie supérieure de la zone de radiation (côté ouest)

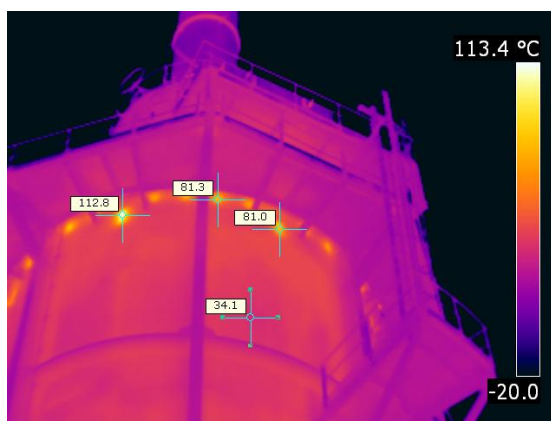


Figure 28: La partie supérieure de la zone de radiation (côté est)

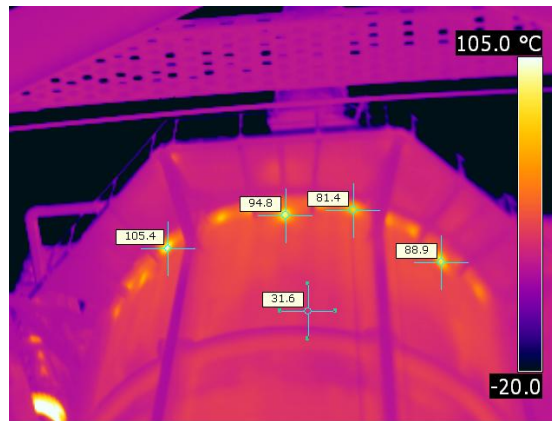


Figure 29 La partie supérieure de la zone de radiation (côté nord-est)

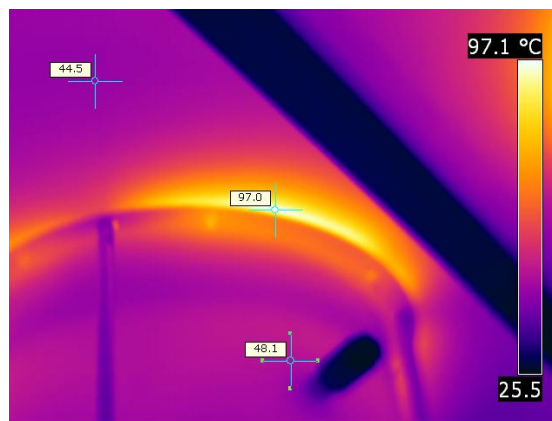


Figure 30 : La température aux extrémités du brûleur

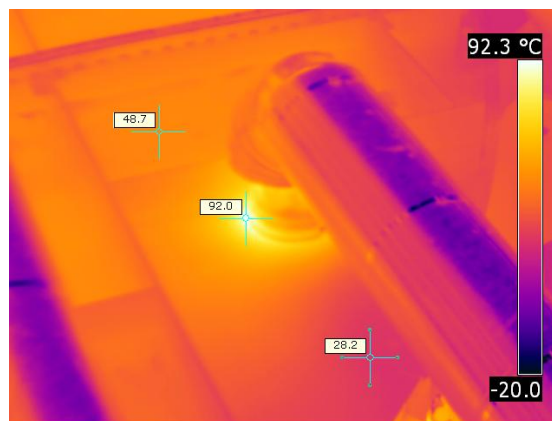


Figure 31: La température sur le plafond de la zone de radiation

Les pertes de chaleur aux extrémités des brûleurs sont dues à la grande température de la flamme.

Nous remarquons que la température de la paroi est homogène, sauf en haut de la zone de radiation où on trouve des zones très chaudes, atteignant même 118°C, malgré que les fumées soient plus chaudes en bas du four qu'en haut.

I.3. Conclusion

Le pH et la distribution de la température de la paroi nous confirment l'hypothèse que la condensation est due à une infiltration des fumées à travers le calorifuge, ce qui nous conduit d'un côté à vérifier la conformité du calorifuge et de l'autre à trouver une explication à cette infiltration qui se produit dans des zones bien déterminées.

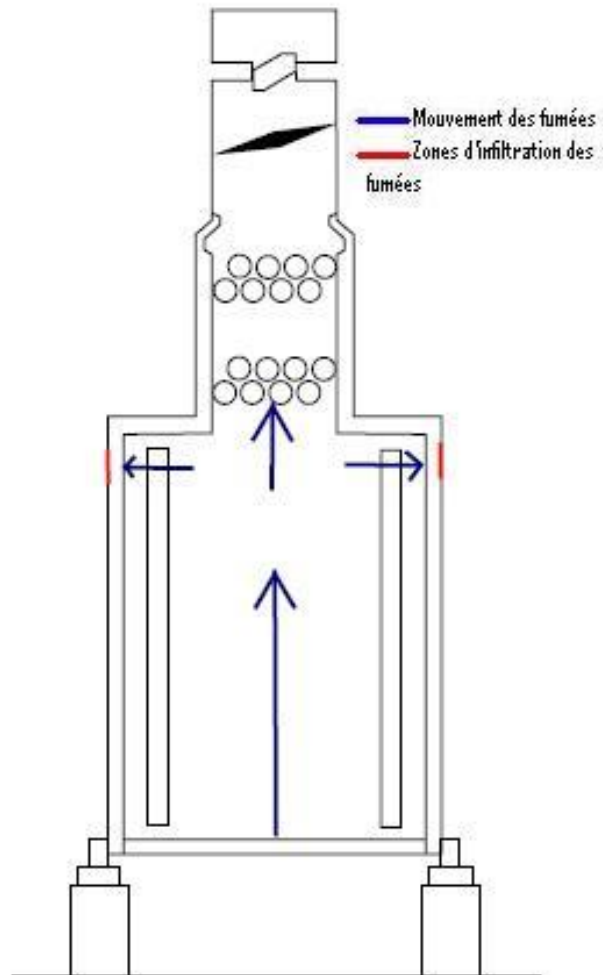


Figure 32: Le chemin des fumées à l'intérieur du four

II. L'isolation thermique des parois verticales du four

Le calorifugeage de la zone de radiation est conçu en fibre céramique. Pour vérifier sa conformité, nous allons faire une comparaison entre la norme internationale, et le calorifuge actuel.

II.1. Les normes API⁹ [8]

L'API fournit des documents très détaillés concernant toutes normes de construction des fours pétroliers.

Les normes API nous fournissent les limites inférieures de la densité, l'épaisseur et les dimensions des plaques de fibre céramiques, en fonction de la température de l'unité.

- Les fibres céramiques peuvent être utilisées dans toutes les régions sauf au niveau de la cheminée, des conduites et du sol. Le panneau de fibres de céramique, lorsqu'il est utilisé du côté chaud, doit être au minimum de 38 mm d'épaisseur, et 240 kg/m³ de densité. La couche de support de la couverture en fibre de céramique doit avoir au minimum une densité de 96 kg/m³.
- La taille du panneau de fibres lorsque la couche est utilisée du côté chaud, ne doit pas dépasser 610×610 mm lorsque la température est inférieure à 1093°C, et 460×460 mm lorsque la température est supérieure à 1093°C.
- Les fibres céramiques ne doivent pas être utilisées nues lorsque la vitesse des fumées dépasse les 12,2 m/s. Dans le cas échéant, la couche de fibre céramique doit être couverte d'une barrière à vapeur.

II.2. La fibre céramique actuelle

La fibre céramique utilisée dans ce four est disposée en deux couches (figure 33).



Figure 33: Le calorifuge vu à partir de la lucarne

⁹ American Petroleum Institute

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des deux couches

Tableau 11: les Caractéristiques des couches de fibre céramique

N° de la couche	Coté	Densité (kg/m ³)	Épaisseur (cm)
1	Chaud	96	5
2	Froid	128	2,5

De plus, on remarque dans la photo ci-dessous que les fibres céramiques utilisées sont des bandes de largeur inférieur à 60 cm et d'une très grande longueur.



Figure 34: Le calorifuge de la zone de radiation

II.3. Comparaison

À partir de ces constatations, on remarque la non-conformité en termes de disposition, densité, et dimension des plaques.

Tableau 12: Comparaison entre la fibre céramique utilisée et les normes API

	Les normes API	La fibre actuelle
Densités (kg/m ³)	240/96	96/128
Emplacement de la couche la plus dense	La couche la plus dense du côté de la flamme	La couche la plus dense contre la paroi
Dimensions maximales (m×m)	0,61×0,61	0,60×10

III. Écoulement des fumées dans le four

Les fumées sont émises tous le long de la surface des flammes, ce qui leur donne une direction tridimensionnelle et non pas verticale. On déduit alors que l'écoulement à l'intérieur du four est un écoulement turbulent.

De plus, lors du passage des gaz de la zone de radiation vers la zone de convection, on remarque une restriction très brusque de la section du four (figure 35) ce qui non seulement augmente considérablement les turbulences dans le haut de la zone de radiation, mais aussi elle augmente la pression de fumées dans cette zone ce qui peut expliquer l'infiltration des vapeurs à travers le calorifuge vu sa porosité.

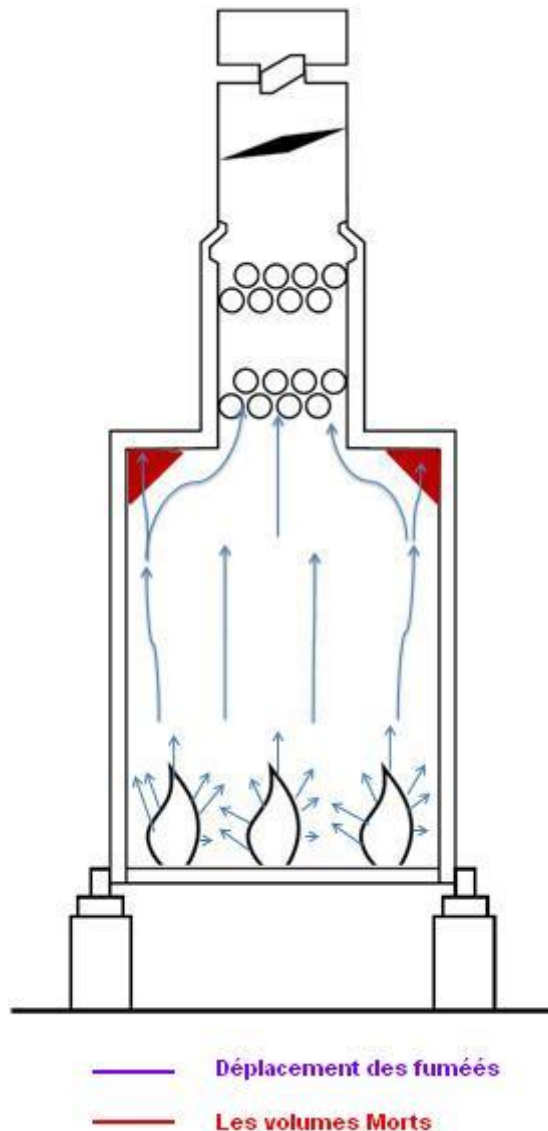


Figure 35: Formation de volumes morts

IV. Étude de la solution du constructeur

Le constructeur propose de placer un anneau de ciment en bas de la zone de radiation. Ce dernier jouera le rôle de plan incliné dont le but est d'acheminer les gouttes d'eau condensée vers les brûleurs afin qu'elles se vaporisent. Le phénomène de condensation ne sera plus constaté à l'extérieur du four. Le schéma ci-dessous montre l'emplacement de l'anneau et la circulation des fumées et du condensat.

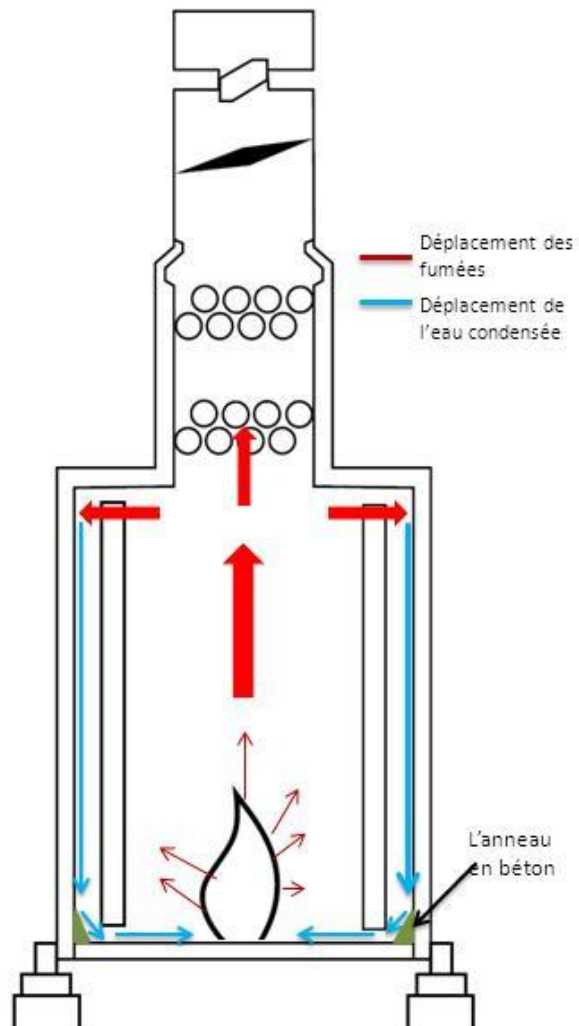


Figure 36: L'emplacement de l'anneau en béton

IV.1. Avantage

- Les appareils de régulations situés sous le four ne seront pas endommagés par l'eau condensée.

IV.2. Inconvénients

- Cette solution masque le problème de condensation, elle ne le résout pas.

- Même si le ciment empêche l'eau de s'écouler en bas du four et de corroder la paroi métallique inférieure, cette solution n'est que temporaire car avec le temps l'eau pourra s'infiltrer à travers la couche de ciment.
- L'eau à force d'être condensée puis vaporisée, devient de plus en plus acide. Sa nuisance aux parois du four et aux conduites sera plus grande.
- L'eau recyclée baissera le rendement thermique du four, du fait qu'on doit chauffer plus pour vaporiser cette eau.

V. Solutions proposées

V.1. Changement du calorifuge de la zone de radiation

La nouvelle couche de fibre céramique doit répondre aux spécifications de l'API, que ce soit dans la densité (pour empêcher les vapeurs de s'infiltrer), dans l'ordre et l'épaisseur minimale (pour diminuer la perte par conduction), et dans les dimensions des plaques.

Cette opération nécessite le démontage et le remontage de plusieurs parties du four notamment les brûleurs et les tubes de la zone de radiation.

I.1.a. Avantages

Cette solution permet d'une part de mieux isoler le four du point de vue thermique, et d'autre part de diminuer l'infiltration des fumées à travers le calorifuge.

I.1.b. Inconvénients

Les inconvénients du changement de l'isolation thermique de la zone de radiation sont d'ordre économique :

- Le prix élevé du calorifuge: il a été estimé à 10% du prix du four complet, soit 120000€ pour un four de 1200000 € (sans tenir compte du coût de la main d'œuvre).
- La durée des travaux: cette opération nécessite le démontage de plusieurs parties du four, et leur remontage.
- L'arrêt du four : il impliquera l'arrêt du train pendant les travaux qui peuvent durer plusieurs semaines, ce qui causera des pertes économiques.

V.2. Déposition d'une barrière à vapeur

La barrière à vapeur est une feuille en métal ou en alliage de métaux. Elle est placée soit entre les deux couches de calorifuge soit face à la flamme. Elle est utilisée dans le but d'empêcher les fumées de s'infiltrer vers la paroi.[8]



Figure 37: Exemple d'une barrière à vapeur

V.2.a. Avantages

- On peut monter la barrière à vapeur sans démonter le calorifuge.

V.2.b. Inconvénients

- Pour la pose de cette barrière, il faudra démonter les tubes.
- La barrière nécessite un investissement financier.

V.3. Pose de déflecteurs

Les déflecteurs sont des plaques métalliques placées d'une façon inclinées à l'intérieur de la zone de radiation, dans le but de diriger les fumées vers la zone de convection et ainsi d'éviter les turbulences dues à la restriction brusque de la section du four.

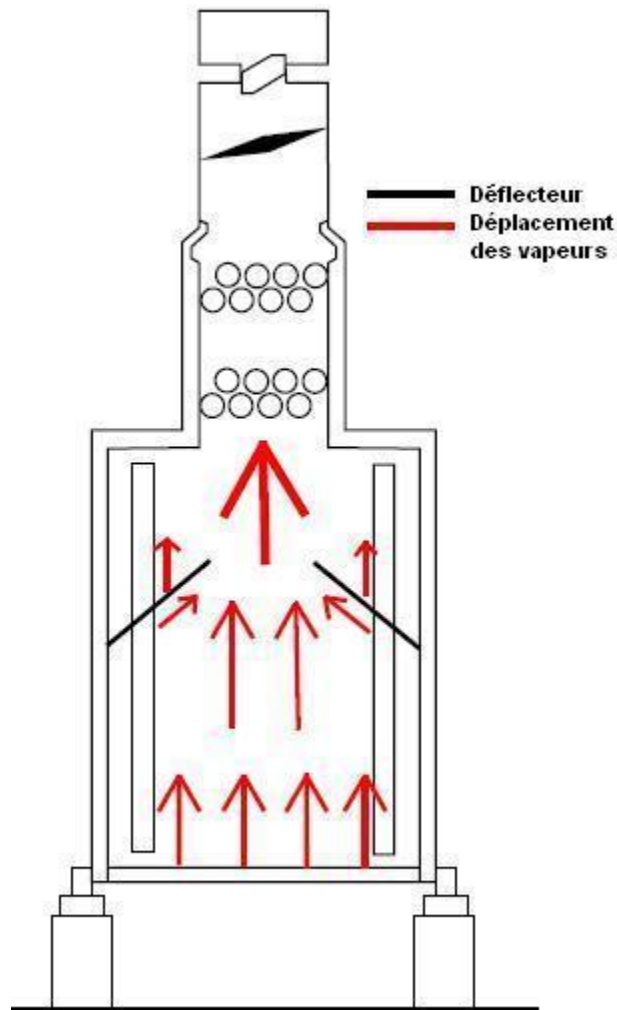


Figure 38: L'emplacement des déflecteurs et leur influence sur l'aérodynamisme du four

V.3.a. Avantages

Plusieurs avantages de cette méthode peuvent-être cités :

- La pose des déflecteurs est nettement moins coûteuse que le changement de calorifuge.
- Elle nécessite un temps d'arrêt beaucoup moins long, donc un impact minimal sur le fonctionnement de l'usine.

V.3.b. Inconvénients

- L'utilisation des déflecteurs réduira le phénomène de condensation sans pour autant l'éliminer.

VI. Conclusion

Le non-respect des normes de calorifugeage citées dans l'API entraîne non seulement une perte par conduction mais aussi une perte par transfert de matière. Cette dernière détériore l'état des parois, des équipements de régulation au-dessous du four, et même des parties en béton qui constituent la base et les piliers.

Afin de réduire l'infiltration des vapeurs à travers le calorifuge, plusieurs solutions sont mises à l'étude. Le tableau ci-dessous résume les différentes solutions ainsi qu'une estimation de la durée des travaux, leur(s) avantage(s) et inconvénient(s).

Tableau 13: Les solutions avec leurs avantages et inconvénients

Solution	Durée des travaux	Avantages	Inconvénients
Pose d'un anneau en béton	Longue	<ul style="list-style-type: none"> • Protection appareils de régulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûteuse • Temporaire
Changement de calorifuge	Beaucoup plus longue	<ul style="list-style-type: none"> • Élimination du phénomène de condensation et la réduction de la perte par conduction 	<ul style="list-style-type: none"> • Très coûteuse • Nécessite un temps d'arrêt très long (plus d'un mois)
Pose d'une barrière à vapeur	Courte	<ul style="list-style-type: none"> • Élimination de la condensation d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Très coûteuse
Pose de déflecteurs	Plus courte	<ul style="list-style-type: none"> • Rapide • Moins coûteuse 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduit partiellement la condensation

Sixième Chapitre :

OPTIMISATION DU FOUR ÉTUDIÉ

Liste des abréviations

Symbole	Définition	Unité
% excès	Excès dans l'air de combustion	%
D	Diamètre de l'ouvrage du brûleur	m
F	Chaleur dégagée par un brûleur par heure	kcal/h
H	Hauteur de la flamme	m
H'	Hauteur de la zone de radiation	m
k	Nombre de brûleurs en marche	
%O ₂	Excès d'oxygène	%
PCI	Pouvoir calorifique inférieur du fuel gaz	kcal/m ³
ΔP_s	Dépression du soutirage	mm
PCS	Pouvoir calorifique supérieur du fuel gaz	kcal/m ³
Q _d	Chaleur dégagée par la combustion	kcal/h
Q _{fumées}	Chaleur perdue par les fumées	kcal/h
Q _{Oxygène}	Chaleur perdue dû à l'excès d'Oxygène	kcal/h
Q _{par}	Chaleur perdue par les parois	kcal/h
T _{air}	Température d'air de combustion	°C
T _f	Température de flamme	°C
T _{fumée}	Température des fumées	°C
V _{air}	Volume d'air de combustion	Sm ³
V _{flamme}	Vitesse de la flamme	m/s
V _{fuel}	Volume de fuel	Sm ³
V _{fumées}	Volume de fumées	Sm ³
η_1	Le rendement du four avec l'excès d'oxygène actuel	%
η_2	Le rendement du four avec l'excès d'oxygène de 2%	%

Dans ce dernier chapitre, nous proposons des mesures visant l'optimisation du rendement. De tels changements auront comme effet la réduction de la consommation en fuel gaz et de l'émission de gaz à effet de serre. Deux types de mesures peuvent être pris :

- Les mesures ne nécessitant pas d'investissements: action sur les paramètres opératoires.
- Les mesures nécessitant des investissements de modernisation des installations.

La méthode que nous utilisons est la méthode de P.G.TALAVERA (Talavera, 2000)

Les fours tubulaires sont très utilisés dans l'industrie pétrolière, ces appareils fonctionnent avec soutirage naturel ou forcé, et une efficacité thermique de 86% et 91% respectivement.

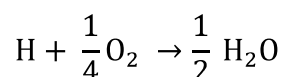
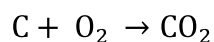
Dans l'industrie, on utilise souvent :

- Le calcul de rendement pour améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité.
- Les réactions de combustions pour déterminer l'air nécessaire et la quantité des fumées générées.
- La hauteur de la flamme pour déterminer la distribution des températures et ainsi prendre les précautions pour que la chaleur ne dépasse pas une certaine limite, ce qui endommagerait les tubes.
- Les données hydrauliques du four afin de connaître ses limites.
- L'élasticité des tubes, l'analyse de leur rupture pour déterminer leur durée de vie et l'épaisseur minimale.
- Une évaluation économique pour optimiser la rentabilité.

I. Les réactions de combustion

Pour pouvoir évaluer le four, les flux entrants (air et carburant) dans la chambre de combustion doivent être connus. Le mélange d'air et de carburant est effectué au niveau des brûleurs, et brûlé dans la chambre de combustion. La chambre de combustion se compose de tubes placés au périmètre du four. La combustion se produit avec un excès d'air, elle est typique pour tous les hydrocarbures : un atome de carbone nécessite une molécule d'oxygène, et un atome d'hydrogène nécessite 0.25 molécule d'oxygène.

La réaction de combustion est résumée comme suit :



Pour procéder à l'achèvement de ces deux réactions, les conditions suivantes doivent être remplies:

- L'air et le carburant doivent être bien mélangés avant la combustion, cette opération est effectuée dans un brûleur à pré mélange.
- Il faut fournir un excès d'oxygène de 2-4% pour brûler complètement le carburant soit un excès d'air de 12-25%. L'insuffisance de l'air entraîne la formation de CO et le dépôt de coke sur les brûleurs.
- Une source de chaleur doit être présente. Cela peut être soit un pilote soit des réfractaires chauds dans le brûleur. Un brûleur correctement conçu tiendra la température du métal ou du réfractaire entre 815 et 980 °C.
- Les vitesses du carburant et de l'air doivent être suffisamment basses pour leur permettre de brûler. La vitesse de propagation de la flamme ne doit pas être dépassée, sinon cette dernière est soulevée du brûleur et finalement soufflée.

Cette méthode consiste à remplacer le gaz combustible utilisé dans un four par un combustible équivalent de molécule $C_m H_n$.

La quantité stœchiométrique d'air pour brûler un mélange d'hydrocarbures est déterminée par la réaction de combustion.

Calculons le combustible équivalent du fuel utilisé:

Tableau 14 : Calcul de l'hydrocarbure équivalent

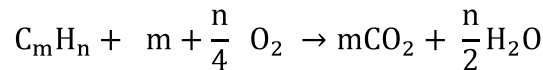
Composants	% mole	$C_{\text{équivalent}}$	$H_{\text{équivalent}}$
N_2	0,48 %	$0,0048 \times 0 = 0$	$0,0048 \times 0 = 0$
CO_2	0,38%	$0,0038 \times 1 = 0,0038$	$0,0038 \times 0 = 0$
CH_4	65,87 %	$0,6587 \times 1 = 0,6587$	$0,6587 \times 4 = 2,6348$
C_2H_6	17,06 %	$0,1706 \times 2 = 0,3412$	$0,1706 \times 6 = 1,0236$
C_3H_8	11,36 %	$0,1136 \times 3 = 0,3408$	$0,1136 \times 8 = 0,9088$
C_4H_{10}	3,41 %	$0,0341 \times 4 = 0,1364$	$0,0341 \times 10 = 0,341$
C_5H_{12}	0,94 %	$0,0094 \times 5 = 0,047$	$0,0094 \times 12 = 0,1128$
C_6H_{14}	0,37 %	$0,0037 \times 6 = 0,0222$	$0,0037 \times 14 = 0,0518$
C_7H_{16}	0,13 %	$0,0013 \times 7 = 0,0091$	$0,0013 \times 16 = 0,0208$
Total	100 %	1,5592	5,0936

La formule de l'hydrocarbure équivalent est : $C_{1,5592}H_{5,0936}$

Le pouvoir calorifique de cet hydrocarbure équivalent est celui du fuel gaz (Annexe I), donc :

$$PCI = 11634,27 \text{ kcal/m}^3$$

Sa réaction de combustion est la suivante :



Vue que dans les conditions standards (15°C et 1 atm) les rapports stœchiométriques volumique et molaire sont les mêmes, et avec 21% d'oxygène dans l'air, le rapport du volume d'air nécessaire pour la combustion sur le volume du combustible est donné par l'expression suivante :

$$\frac{V_{air}}{V_{fuel}} = \frac{m + \frac{n}{4}}{0.21} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{V_{air}}{V_{fuel}} = 13,49$$

De même, le rapport de volume des fumées sur celui du combustible est déduit de la réaction de combustion comme suit :

$$\frac{V_{fumée}}{V_{fuel}} = \text{volume de } N_2 + \text{volume de } CO_2 + \text{volume de } H_2O$$

$$\frac{V_{fumée}}{V_{fuel}} = m + \frac{n}{4} \frac{0,79}{0,21} + m + \frac{n}{2}$$

$$\frac{V_{fumée}}{V_{fuel}} = 4,762m + 1,44n \dots \dots \dots (2)$$

Le rapport entre le débit des fumées et celui du combustible :

$$\frac{V_{fumée}}{V_{fuel}} = 14,76$$

Toutefois, la combustion n'est jamais réalisée avec les montants stœchiométriques de l'air. Pour obtenir une combustion complète, l'appareil de chauffage fonctionne avec 2 à 4% d'excès d'oxygène. La quantité d'air dans un appareil de chauffage fonctionnant avec O_2 en excès deviendra :

$\frac{V_{air}}{V_{fuel}}$ = l'air stœchiométrique pour la combustion + l'excès d'air dans les fumées

$$\frac{V_{air}}{V_{fuel}} = \frac{m + \frac{n}{4}}{0,21} + \frac{4,762m + 1,44n}{1 - \frac{\%O_2}{21}} \square \frac{\%O_2}{21} \dots \dots \dots (3)$$

On suppose un excès d'oxygène de 3%, et on remplace m et n par leurs valeurs, on trouve :

$$\frac{V_{air}}{V_{fuel}} = \frac{1,5592 + \frac{5,0936}{4}}{0,21} + \frac{4,762 \square 1,5592 + 1,44 \square 5,0936}{1 - \frac{3}{21}} \square \frac{3}{21}$$

On déduit l'expression d'excès d'air :

$$\% \text{ excès} = \frac{4,762m + 1,44n}{1 - \frac{\%O_2}{21}} \square \frac{\%O_2}{21} \dots \dots \dots (4)$$

$(m + 0,25n)$

Le graphe ci-dessous montre l'évolution du pourcentage d'excès d'air en fonction de l'excès d'Oxygène

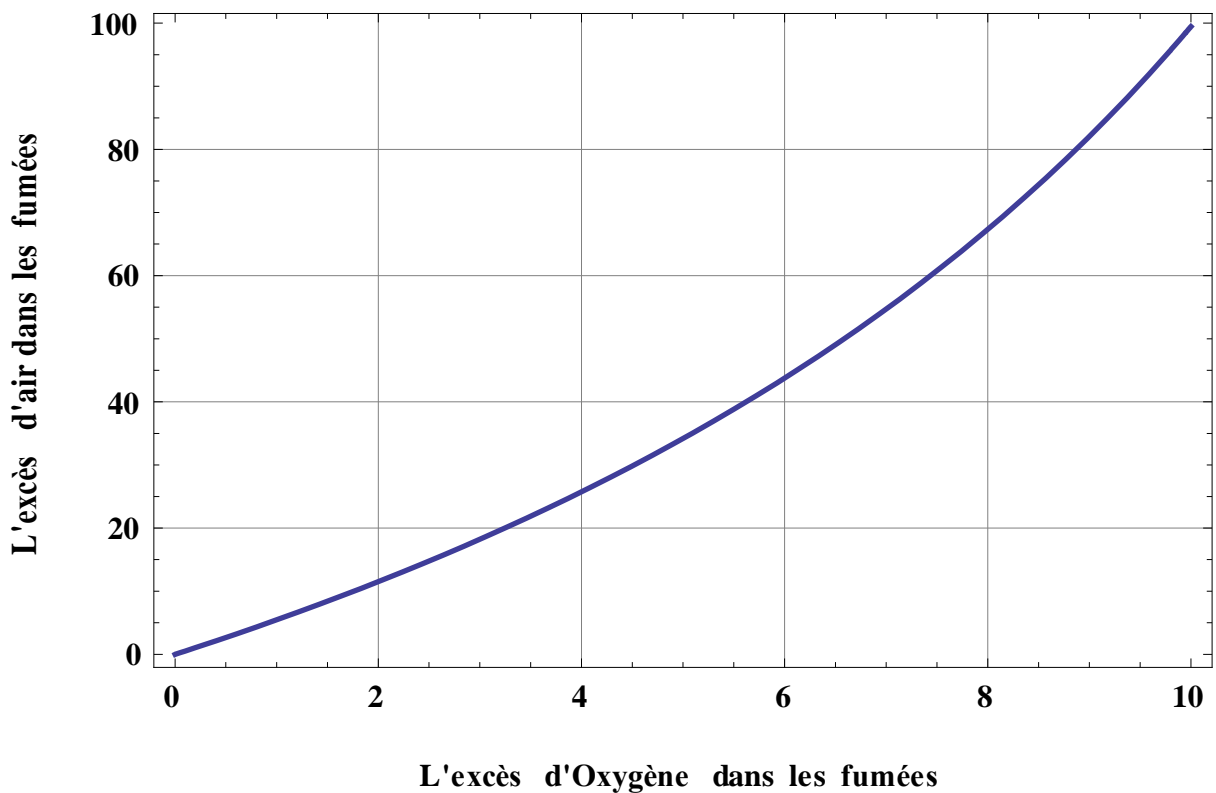


Figure 39: l'excès d'air en fonction de l'excès d'Oxygène

$$\% \text{ excès} = 15,65\%$$

La quantité de fumée dégagée en tenant compte de l'excès d'air :

$$\frac{V_{\text{fumée}}}{V_{\text{fuel}}} = \frac{4,762m + 1,44n}{1 - \frac{\%O_2}{21}} \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{V_{\text{fumée}}}{V_{\text{fuel}}} = \mathbf{16,31}$$

Donc pour un excès d'oxygène de 3% on a :

Tableau 15: Tableau récapitulatif

%excès	$\frac{V_{\text{fumée}}}{V_{\text{fuel}}}$	$\frac{V_{\text{air}}}{V_{\text{fuel}}}$
15,65 %	16,31	20,87

II. L'efficacité thermique

L'efficacité thermique est définie comme le rapport entre la chaleur absorbée dans le four et la chaleur dégagée par la combustion. La chaleur extraite des gaz de combustion se situera entre 0% quand les fumées sont à la température de la flamme et 100% quand leur température est de 15°C. Les variables qui contribuent à diminuer l'efficacité du four sont :

- La présence d'excès d'air
- La perte de chaleur par les parois

L'efficacité opérationnelle de chauffage est exprimée comme suit:

$$\eta = 100 - Q_{\text{par}} - \frac{Q_{\text{fumée}} \square 100}{\text{l'enthalpie de combustion} + \text{chaleur de l'air}} \dots \dots \dots (6)$$

L'enthalpie de combustion est prise à 15°C.

$$\eta = 100 - Q_{\text{par}} - \frac{\frac{V_{\text{fumée}}}{V_{\text{fuel}}} C_{p \text{ fumée}} t_{\text{fumée}} - 15 \rho_{\text{fumée}} \square 100}{\text{PCI}_{\text{fuel}} + \frac{V_{\text{air}}}{V_{\text{fuel}}} C_{p \text{ air}} t_{\text{air}} - 15 \rho_{\text{air}}} \dots \dots \dots (7)$$

En remplaçant ($V_{\text{fumée}}/V_{\text{fuel}}$) et ($V_{\text{fumée}}/V_{\text{fuel}}$) par leur valeur nous trouvons :

$$\eta = 100 - Q_{\text{par}} - \frac{\frac{14,76}{1 - \frac{\%O_2}{21}} 0,2518 t_{\text{fumée}} - 15 0,74 \square 100}{11634,27 + 13,49 + \frac{14,76}{1 - \frac{\%O_2}{21}} \square \frac{\%O_2}{21} 0,24 t_{\text{air}} - 15 1,29} \dots \dots \dots (8)$$

En remplaçant les pourcentages d'excès d'oxygène et de perte à travers les parois par leurs valeurs on trouve :

$$\eta = 96 - \frac{320,8637 t_{\text{fumée}} - 15}{11634,7 + 128,9216 t_{\text{air}} - 15} \dots \dots \dots (9)$$

Le graphe tridimensionnel suivant montre l'influence du préchauffage de l'air et la température des fumées sur l'efficacité thermique du four.

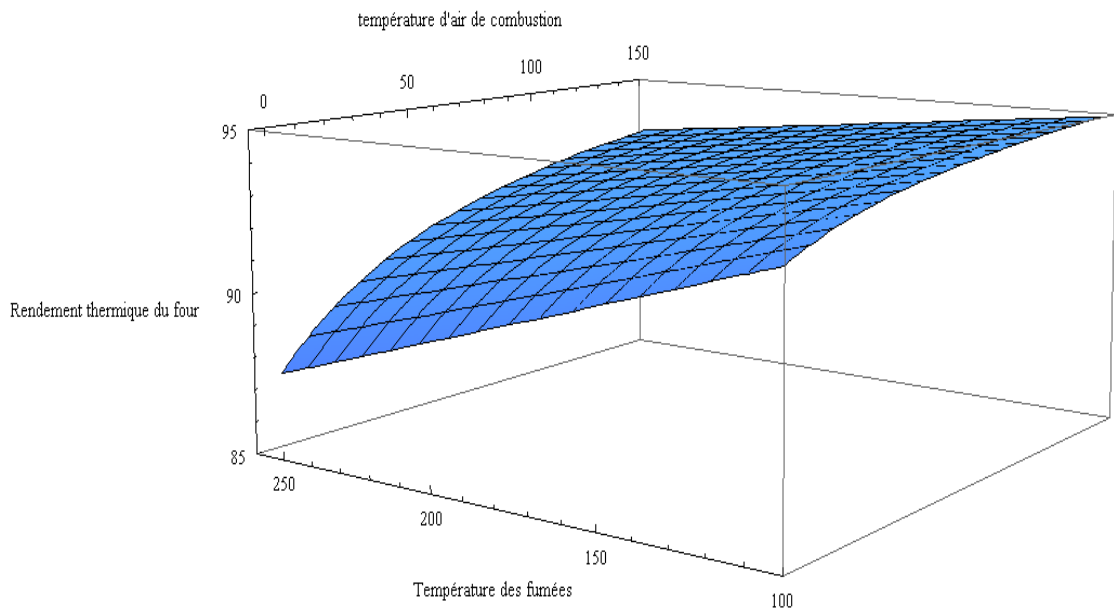


Figure 40: Efficacité thermique en fonction des températures de l'air et des fumées

Nous remarquons que le préchauffage d'air augmente considérablement l'efficacité du four, tandis que la hausse de température des fumées est un signe du mauvais fonctionnement du four.

Le préchauffage de l'air peut être effectué de différentes manières :

- Préchauffage direct : récupérer une partie de la chaleur perdue par les fumées.
- Préchauffage indirect : faire passer un fluide dans la zone de convection qui réchauffera ensuite l'air de combustion.
- Préchauffage avec une source externe : préchauffer l'air de combustion par un fluide chaud que nous voulons refroidir.[8]

Les schémas ci-dessous montrent les différents procédés de préchauffage d'air.

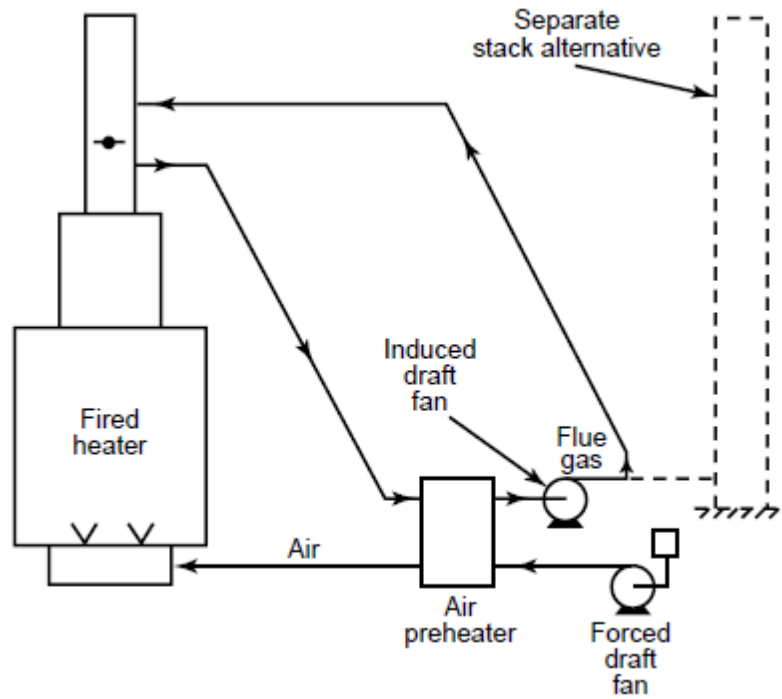


Figure 41: Préchauffage direct

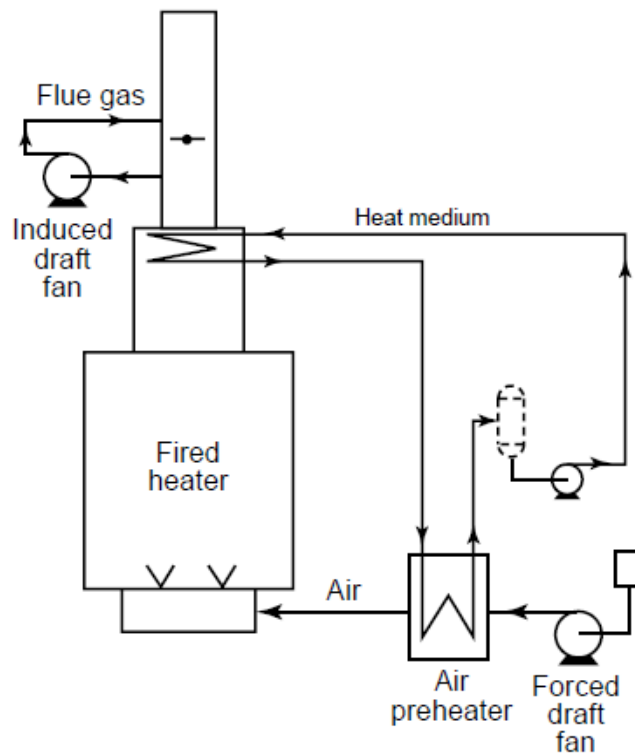


Figure 42: Préchauffage indirect

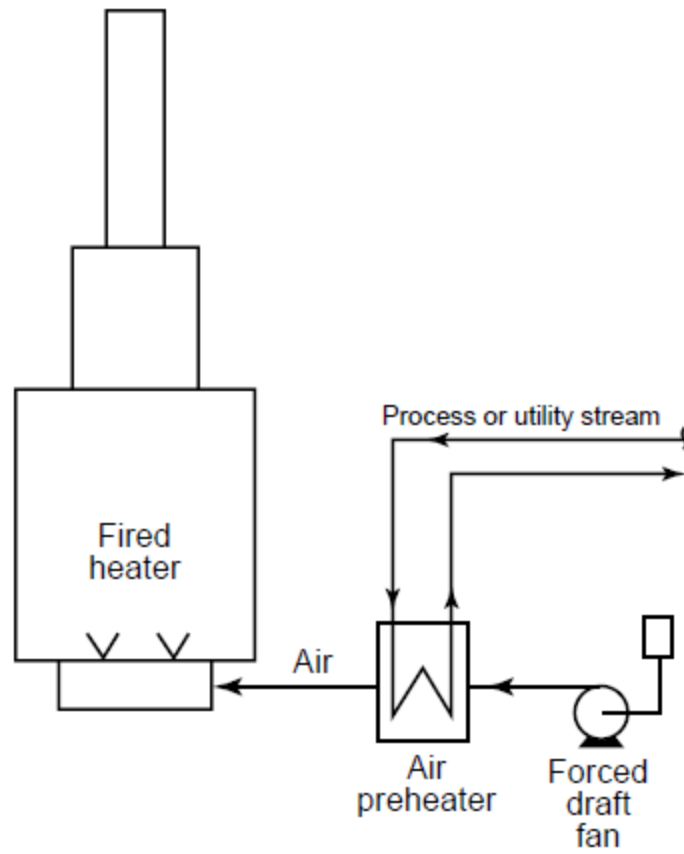


Figure 43: Préchauffage par source externe

III. Détermination de la hauteur de la flamme

La hauteur de la flamme est la zone de son expansion au-dessus des brûleurs. Les paramètres qui ont de l'influence sur celle-ci sont :

- L'arrangement des brûleurs dans zone de combustion.
- Le préchauffage et le taux d'excès d'air.
- Le mode de soutirage, naturel ou forcé.
- Le type de fuel gaz.

Le diamètre de la flamme est celui de l'ouverture du brûleur.

La hauteur de la flamme est donnée par l'équation empirique suivante:

$$H = \frac{F}{PCI \times \left(\frac{V_{fuel}}{V_{fumées}}\right)} \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{v_{flamme} \pi D} \times \frac{T_f}{520} \dots \dots \dots (10)$$

Avec $F = \frac{Q_d}{k}$

Généralement les constructeurs utilisent des équations empiriques pour déterminer la forme et la hauteur de la flamme. La hauteur de la flamme est estimée à 0.3048m pour les brûleurs à pré mélange et entre 0.46 et 0.61m pour les autres brûleurs par million de BTU/h. Lors de la conception d'un four, la chambre de combustion doit être dimensionnée de façon à contenir tout le volume de la flamme et non pas sa partie visible seulement. Une distance de 3 à 6m au-dessus de la flamme est recommandée pour ne pas endommager les tubes et les parois du four, cela correspondrait dans notre cas à une hauteur 18m. La connaissance de la vitesse de la flamme est indispensable pour déterminer le débit maximum de fuel gaz.

IV. Le Soutirage de l'air

Les fours à soutirage naturel utilisent l'effet dynamique des gaz de combustion chauds pour créer un vide dans la chambre de combustion et donc faire rentrer l'air extérieur, tandis que le soutirage au niveau de la zone de convection est dû à la hauteur de la cheminée. On utilise un registre au niveau de la cheminée pour contrôler le soutirage.

Pour une colonne de gaz, l'expression du soutirage peut-être écrite sous la forme suivante :

$$\Delta P_s = 12H' \frac{\rho_{air} - \rho_{fumée}}{\rho_{eau}} \times 2.54 \text{ mm d'eau} \dots \dots \dots (11)$$

La loi des gaz parfaits est applicable à l'air et aux fumées, on trouve :

$$\Delta P_s = 0.52PH' \left(\frac{1}{T_{air}} - \frac{1}{T_{fumée}} \right) \times 2.54 \text{ mm d'eau} \dots \dots \dots (12)$$

Le débit d'air entrant au four est contrôlé par le registre de la cheminée et ceux des brûleurs. Pour le bon fonctionnement d'un four, on doit avoir un soutirage entre 1.27 à 2.54 mm d'eau à l'entrée de la zone de convection.

On conclut qu'avec les changements de température d'une saison à une autre, le soutirage doit être modifié, le graphe suivant montre la variation du soutirage en fonction de la température, pour des fumées à 850 °C

V. Conclusion

Pour optimiser le fonctionnement du four et sa rentabilité nous proposons de :

- Prévoir un système de préchauffage d'air: ce dernier permettra d'augmenter le rendement du four et diminuer les pertes dues à l'excès d'air.
- Fixer une limite supérieure au débit du fuel gaz en fonction de la hauteur de la flamme pour ne pas détériorer les tubes et l'enveloppe du four.
- Changer le soutirage du four d'une saison à l'autre en fonction de la température.

Conclusion Générale

Notre projet, tel qu'il nous a été soumis par la direction du champ BRN, était de:

- 1) Trouver une explication logique au problème de condensation dans un four de rebouillage et proposer une ou plusieurs solutions.
- 2) Proposer des changements dans les paramètres opératoires du four afin d'optimiser son rendement.

Au cours de la première partie de ce travail, nous avons vérifié son rendement thermique ainsi que les différents types de pertes de chaleur qui existent dans ce four. Nous avons remarqué lors de ce calcul une grande perte par les parois qui diminue considérablement l'efficacité du four. Mais ces résultats restent insuffisants pour expliquer le phénomène de condensation.

Par ailleurs, nous avons constaté sur le terrain des anomalies telles que l'état de la peinture de la paroi externe à des endroits bien précis et notamment le ruissellement du condensat entre le calorifuge et la paroi externe.

Nous avons donc supposé que la condensation est due à l'infiltration des fumées en haut de la zone de radiation (à cause de la géométrie du four), ce qui nous a incités d'une part à prendre des photos thermiques et d'autre part à mesurer l'acidité des eaux de condensation. Les résultats ainsi obtenus vont dans la direction de notre hypothèse.

De plus, nous avons étudié la solution du constructeur et tenté d'apporter des solutions au problème de condensation.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons proposé des changements dans les paramètres opératoires pour optimiser le rendement du four.

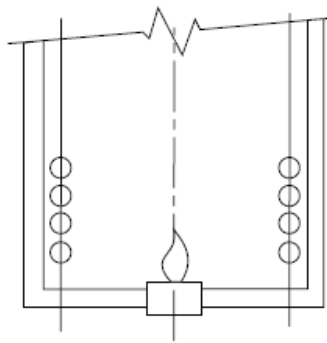
Enfin, nous espérons que ce travail pourra pallier au problème de condensation d'eau dans ce four et optimiser son rendement, et qu'il sera profitable à de futures études.

ANNEXES

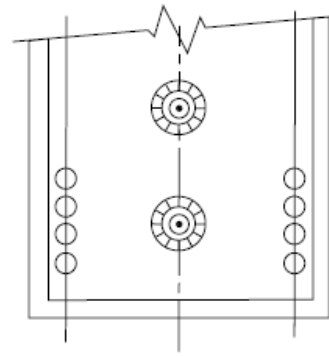
ANNEXE I : COMPOSITION DU FUEL GAZ

Points prélèvement	Fuel gaz BP
Pression <small>prélév</small> (bar)	4
Température <small>prélév</small> (°C)	66
Date <small>prélév</small>	17/08/2009
Heure <small>prélév</small>	17h35
Date d'analyse	31/08/2009
Constituants	% molaires
Azote	0,48*
Dioxyde de Carbone	0,38*
Methane	65,87*
Ethane	17,06*
Propane	11,36*
i-Butane	0,90*
n-Butane	2,51*
i-Pentane	0,44*
n-Pentane	0,50*
i-Hexane	0,21*
n-Hexane	0,16*
i-Heptane	0,07*
n-Heptane	0,06*
TOTAL	100,00*
Propriétés physico- chimiques à 15°C et 1 atr	
MM (g/mole)	24,18
Facteur de compressibilité (Z)	0,9949
PCS (Kcal/m ³)	12783,17
PCI (Kcal/m ³)	11634,27
d	0,8363
ρ (Kg/m ³)	1,0249
Indice de Wobbe (Kcal/m ³)	13978,05

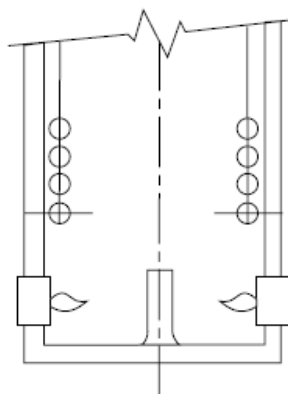
ANNEXES II : LES DIFFÉRENTS TYPES DE DISPOSITION DE BRÛLEURS [8]



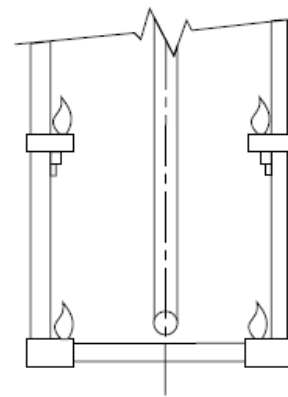
TYPE A—UPFIRED



TYPE B—ENDWALL FIRED



TYPE C—SIDEWALL FIRED



TYPE D—SIDEWALL FIRED MULTI-LEVEL

ANNEXES III : NORMES CONCERNANT LA FIBRE

CÉRAMIQUE [8]

- Ceramic fiber in layered or modular construction may be used in all heater areas except stacks, ducts, and floors.
- The hot face of layered ceramic fiber blanket installations shall be a minimum of 25 millimeters (1 inch) thick, 128 kilograms per cubic meter (8 pounds per cubic foot) density, needled material. Ceramic fiber board, when applied as a hot face layer, shall not be less than 38 millimeters (1½-inch) thick nor less than 240 kilograms per cubic meter (15 pounds per cubic foot) density. Backup layer(s) of ceramic fiber blanket shall be a minimum of 96 kilograms per cubic meter (6 pounds per cubic foot) density, needled material. Ceramic fiber board size, when used as hot face layer, shall be limited to a maximum of 610 millimeters by 610 millimeters (24 inches by 24 inches) when temperatures are below 1093°C (2000°F) and 460 millimeters by 460 millimeters (18 inches by 18 inches) when temperatures exceed 1093°C (2000°F).
- Metallic anchor parts that are not shielded by tubes shall be completely wrapped with ceramic fiber patches or be protected by ceramic retainer cups filled with moldable ceramic fiber.
- The anchor spacing for walls shall not exceed the following rectangular pattern: 150 millimeters x 230 millimeters (6 inches by 9 inches) for 305 millimeters (12) wide blankets; 270 millimeters by 305 millimeters (9 inches by 12 inches) for 610 millimeters (24-inch) wide blankets; and 270 millimeters by 305 millimeters (10½-inches by 12 inches) for 1220 millimeters (48-inch) wide blankets.
- When ceramic fiber construction is used with fuels having a sulfur content exceeding 10 parts per million, the casing shall have an internal protective coating to prevent corrosion. The protective coating shall be rated for 177°C (350°F) service temperature.
- A vapor barrier of Type 304 stainless steel foil shall be provided when the fuel sulfur content exceeds 500 parts per million. The vapor barrier must be located so that the exposure temperature is at least 56°C (100°F) above the calculated acid dew point for all operating cases. Vapor barrier edges shall be overlapped; edges and punctures shall be sealed.
- Ceramic fiber systems shall not be applied for services where the total heavy metals content in the fuel exceeds 100 parts per million.
- Ceramic fiber shall not be used in convection sections where soot blowers, steam lances, or water wash facilities are initially provided.

**ANNEXES IV : LA TENSION DE VAPEUR DE L'EAU EN
FONCTION DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE [10]**

Température extérieure (°C)	Tension de vapeur de l'eau	
	mBar	mm Hg
5	8,72	6,54
10	12,3	9,22
15	17	12,75
20	23,4	17,55
25	31,7	23,77
30	42,4	31,80
40	73,8	55,35
50	123	92,25

Bibliographie

- [1] :SONATRACH. (2010). *Site officiel du Groupe SONATRACH*. Récupéré sur <http://www.sonatrach-dz.com>
- [2] :Ente Nazionale Idrocarburi (ENI). (2010). *Site officiel d'Eni s.p.a.* Récupéré sur http://www.eni.com/en_IT/home.html
- [3] :P.Wuithier. (1972). *Pétrole, Raffinage et Génie Chimique* (2e édition ed., Vol. II). Paris, France: Technip.
- [4] :Trambouze, P. (1999). *Le raffinage du pétrole: Matériels et équipements*. TECHNIP.
- [5] :Nogues, J. L. (1974). *Etude des Fours Petroliers et Petrochimiques*. Paris,France: Technip.
- [6] :*Combustion, Énergie dégagée et pouvoir calorifique*. (2010). Récupéré sur <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=2751>
- [7] :*L'eau et le CO₂*. (n.d.). (2009). Récupéré sur <http://pagesperso-orange.fr/bernard.pironin/aquatech/eau-co2.htm>
- [8] :Fired Heaters for General Refinery Service. (2001). *API560*. American Petroleum Institute.
- [9] :Talavera, P. (2000, Juillet). Fired Heater Rating. *Hydrocarbon Processing*.
- [10] :*pression de vapeur saturante*. (2010). Récupéré sur <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=5811>

Autres documents consultés

Pétrole - Définition - Encyclopédie scientifique en ligne. (2010). Retrieved from <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3425>

F.EL-MAHALLAWY, S. E.-D. (2002). *Fundamentals and Technology of Combustion*. Kidlington, Royaume Unit: Elsevier.

(1995). *Combustion Handbook*. USA: North American.

Charles E. Baukal, Jr. (2003). *Industrial Burners Handbook*. USA: CRC Press

VI. Ganapathy. (2003). *Industrial Boilers ans Heat Recovery Steam Generators*. New York,USA: Marcel Dekker,Inc.