**REPUBLIQUE ALGERIENNE ET DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.**

**MINISTERE DE L’ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.**

**Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.**



**Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procèdes.**

**Département : Thermo-Energétique.**

**PROJET DE FIN D’ETUDES.**

**En vue de l’obtention du diplôme de MASTER en :**

**Filière : Génie mécanique.**

**Spécialité** : **Installations énergétiques et turbomachines.**

**Thème**

**Etude numérique de la combustion turbulente de mélange méthane hydrogène d’un bruleur LSB.**

**Réalisé par : Suivi par :**

**HADJADJ Aya Encadrant : Mr. M. MIHOUBI**

**KRIDI Manel Co-encadrant : Mr S. MEZIANE**

**Promotion 2025**

**Remerciements**

Ce mémoire marque la fin d’un parcours, mais aussi l’aboutissement de plusieurs mois de travail, d’efforts, de doutes parfois, et de belles découvertes.

À ce titre, **nous remercions sincèrement Dieu Tout-Puissant** pour nous avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail. C’est grâce à **Sa guidance et à Son aide** que nous avons pu surmonter les difficultés et arriver jusqu’au bout de ce mémoire. **Nous Lui sommes profondément reconnaissantes** pour toutes les bénédictions qu’il nous a accordées tout au long de ce parcours.

Avant tout, nous tenons à adresser nos **sincères remerciements à Monsieur Sid Ahmed MEZIANE**, pour son encadrement bienveillant, sa patience, ses conseils éclairés, et surtout pour nous avoir accordé sa confiance tout au long de ce travail. **Ses remarques pertinentes et son accompagnement** nous ont permis de progresser et de structurer nos idées avec clarté.

Nous remercions également **Monsieur MIHOUBI Mohamed** pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son accompagnement tout au long du stage. **Ses conseils, sa gentillesse et ses encouragements** nous ont beaucoup aidées à avancer avec confiance.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance aux **membres du jury** pour avoir accepté d’évaluer ce travail. Nous les remercions sincèrement pour le temps qu’ils ont consacré à la lecture de ce mémoire, ainsi que pour **leurs remarques et leurs suggestions** qui contribueront à enrichir la qualité de ce travail.

Nous remercions également **tous les enseignants et intervenants** rencontrés durant notre cursus pour la richesse de leur enseignement et leur engagement. Grâce à eux, nous avons pu élargir nos connaissances et forger un esprit critique.

Nos remerciements vont aussi à la **raffinerie d’Alger SONATRACH**, pour avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail, ainsi qu’aux personnes que nous y avons rencontrées, pour leur accueil chaleureux et leur aide précieuse.

Un merci du fond du cœur à **nos familles**, véritables piliers tout au long de notre parcours. Merci pour votre **soutien indéfectible**, vos encouragements constants, et votre confiance en nos capacités. Sans vous, rien n’aurait été possible.

Enfin, nous n’oublions pas de remercier **nos amis**, qui ont su nous écouter, nous motiver et nous faire rire, même pendant les périodes les plus chargées. Merci pour votre présence, vos messages à point nommé, vos relectures, et surtout **votre amitié**.

**Dédicaces**

Je dédie ce mémoire, qui marque la fin de plusieurs années d’efforts, de patience et de passion, à toutes les personnes qui ont compté dans mon parcours.

À mes chers parents, Vous êtes ma force et mon repère.

Papa, merci pour ta sagesse, tes conseils, et ton soutien, même de loin. Tu m’as appris à ne jamais abandonner.

Mama, ton amour, ton courage et ta tendresse m’ont porté à chaque étape. C’est aussi grâce à toi que ce travail existe.

Merci du fond du cœur pour tes sacrifices.

À mes frères et sœurs Meriem, Nour El Houda, Hocine et Ayoub, merci pour votre présence, vos mots d’encouragement et tout votre amour. Vous avez toujours été là, et cela a compté plus que vous ne l’imaginez.

À mes amis fidèles merci pour votre écoute, votre soutien, vos sourires et tous ces petits moments qui m’ont donné la force d’avancer. Vous avez été un vrai appui dans les moments de doute.

Ce mémoire est un bout de moi… mais aussi un peu de vous tous. Merci infiniment.

**Manel**

**Dédicaces**

Je souhaite dédier ce modeste travail synonyme de concrétisation de

Tous mes efforts fournis ces dernières années.

A la lumière de ma vie ma chère mère pour son amour, ses encouragements

Et ses sacrifiées.

A mon père, pour son affection et la confiance qu’il

M’accordée.

A mes sœurs Amira, Hadil et Ritedj .

A mes frères Islam, Nouh et Amir.

A ma grand-mère.

Et tout spécialement, à **toute la famille HADJADJ**, pour l’amour, la confiance et le soutien qu’elle m’a toujours donnés.

A tous mes amis, mes proches qui m’ont toujours

Encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

**Aya**

**Résumé**

**Table de matière**

**Chapitre I : Présentation de la raffinerie d’Alger**

[Présentation de la raffinerie d’Alger 5](#_Toc200921976)

[I.1 Historique et Situation Géographique : 3](#_Toc200921977)

[I.2 Capacités de traitement 4](#_Toc200921978)

[I.3 Principales installations de la raffinerie : 5](#_Toc200921979)

[I.3.1 Unités de production : 5](#_Toc200921980)

[I.3.2 Section MS BLOC 5](#_Toc200921981)

[I.3.3 Section Sulfure BLOC : 6](#_Toc200921982)

[I.3.4 Installations d’utilités : 6](#_Toc200921983)

[I.4 Chaudières de la Centrale Électrique (CCE) –751-G-001 A/B : 7](#_Toc200921984)

[I.4.1 Générateur de Vapeur à Récupération de Chaleur (HRSG) – 751-M-003 : 7](#_Toc200921985)

[I.4.2 Turbogénérateur à Gaz (GTG) – 751-M-001 : 8](#_Toc200921986)

[I.4.3 Turbogénérateur à Vapeur (STG) – 751-M-002 : 8](#_Toc200921987)

[I.4.4 Collecteurs de Vapeur HP / MP / BP et Systèmes de Décharge/Désurchauffe (SDD) : 9](#_Toc200921988)

[I.5 La chambre de combustion 10](#_Toc200921989)

[I.6 Les brûleurs 11](#_Toc200921990)

**Chapitre II :** **Généralités et études bibliographiques**

[II.1 Introduction : 12](#_Toc200921994)

[II.2 La combustion 12](#_Toc200921995)

[II.2.1 Triangle du feu: 12](#_Toc200921996)

[II.2.2 Classification des flammes selon le mode de mélange air-gaz 15](#_Toc200921997)

[II.3 Les bruleurs : 15](#_Toc200921998)

[II.3.1 Définition du brûleur : 15](#_Toc200921999)

[II.3.2 Classification des brûleurs : 16](#_Toc200922000)

[II.4 Combustion dans un écoulement swirlé : 16](#_Toc200922001)

[II.5 Les types de polluantes : 17](#_Toc200922002)

[II.5.1 Les polluantes primaire : 17](#_Toc200922003)

[II.5.2 Les polluants secondaires 18](#_Toc200922004)

[II.6 Monoxyde de carbone (CO) 18](#_Toc200922005)

[II.6.1 Impact environnemental 19](#_Toc200922006)

[II.6.2 Impact sur la santé 19](#_Toc200922007)

[II.7 Les oxydes d’azote (NOx) 19](#_Toc200922008)

[II.7.1 Impact environnemental 20](#_Toc200922009)

[II.7.2 Impact sur la santé 21](#_Toc200922010)

[II.8 Etudes bibliographiques : 22](#_Toc200922011)

[II.9 Les études réalisées par la raffinerie d’Alger (SONATRACH) : 28](#_Toc200922012)

**Chapitre III :** **Formulation mathématique et modélisation de la combustion turbulente**

[III.1 Introduction : 28](#_Toc200922016)

[III.2 Les hypothèses : 28](#_Toc200922017)

[III.3 Formulation mathématique 28](#_Toc200922018)

[III.3.1 Équation de la continuité : 29](#_Toc200922019)

[III.3.2 Équations de la conservation de la quantité de mouvement : 29](#_Toc200922020)

[III.3.3 Équation de conservation de l’énergie 30](#_Toc200922021)

[III.3.4 Equation de conservation des espèces chimiques : 31](#_Toc200922022)

[III.4 Modélisation de la turbulence : 32](#_Toc200922023)

[III.5 Modèle k-epsilon Standard (à deux équations) : 33](#_Toc200922024)

[III.6 Conclusion : 34](#_Toc200922025)

**Chapitre IV :** **Procédures numériques**

[IV.1 Présentation d’ANSYS Fluent 36](#_Toc200922028)

[IV.2 DESCRIPTION DU PROBLEM : 38](#_Toc200922029)

[IV.3 Géométrie et maillage : 40](#_Toc200922030)

[IV.3.1 Géométrie : 40](#_Toc200922031)

[IV.3.2 Maillage : 42](#_Toc200922032)

[IV.4 Conditions aux limites : 43](#_Toc200922033)

[IV.5 Configuration des paramètres numériques 44](#_Toc200922034)

**Chapitre IV :** **Résultats et discussions**

[V.1 INTRODUCTION : 46](#_Toc200922037)

[V.2 Effet de la modification de la geométrie sur le comportement de la flamme 46](#_Toc200922038)

[V.3 Effet de la modification de la géométrie sur les émissions polluantes NO et CO 53](#_Toc200922039)

[V.4 Effet de la modification de la géométrie sur la transformation de CO en CO2 55](#_Toc200922040)

[V.5 Conclusion : 56](#_Toc200922041)

**Conclusion générale**

**Table des figures**

[**Figure I.1 :** vue aérienne de la raffinerie d'Alger RA1G 3](file:///C:\Users\DELL\Desktop\Nouveau%20Document%20Microsoft%20Word.docx#_Toc200810772)

[**Figure I.2 :** schéma fonctionnel du système de production thermique industriel 9](#_Toc200810773)

[**Figure I.3** : photo réelle de la chambre de combustion 10](#_Toc200810774)

[**Figure I.4 :** photo réelle d’un bruleur LSB 11](#_Toc200810775)

[**Figure II.1 :** Triangle de feu…………………………………………………………………….…13](file:///C:\Users\DELL\Desktop\Nouveau%20Document%20Microsoft%20Word.docx#_Toc200814966)

[**Figure II.2 :** Formation de smog photochimique; la lumière du soleil réagit avec le NO2 qui interagit ensuite avec d’autres molécules dans l’air pour former le smog……………..…………..20](#_Toc200814967)

[**Figure II.3 :** résultats de l’étude de Cheng et Zimont……………………...………. …………….22](#_Toc200814968)

[**Figure II. 4 :** résultats de l’étude de M.EMADI……………………………….………………….23](#_Toc200814969)

[F**igure II.5 :** Résultats de l’étude de Clemens (2016)…..……………………………….. ….……24](#_Toc200814970)

[F**igure II. 6 :** Emissions de CO et Nox et CO2 et O2 et température en fonction des déférents mélange gaz combustible………………………………………………………….……………….25](#_Toc200814971)

[F**igure II.7 :** émissions de Nox en fonction de la fraction massique de H2………………..….…..26](#_Toc200814972)

[F**igure II.8:** distribution de la vitesse et de OH……………………………………..…………….27](#_Toc200814973)

[F**igure IV.1:** Le Workbench sur ANSYS……………………………..…………………...……...37](#_Toc200817933)

[**Figure IV.2 :** le coque dans la chambre de combustion….…………………..…………………...38](#_Toc200817934)

[**Figure IV.3 :** schéma fonctionnelle de les chaudières A/B……………………………………….39](#_Toc200817935)

[**Figure IV.4 :** les modification de la géométrie par rapport au cas A ……………………..…...…41](#_Toc200817936)

[**Figure IV.5**: maillage de la chambre de combustion ……………………………….…………….42](#_Toc200817937)

**Figure IV. 6** : Les composantes et les propriétés de fuel-gaz …………………………………43

[**Figure V.1:** Distribution de la température sur le plan longitudinal et plan de sortie de la chambre de combustion………………………………………………….………………………….….……**Erreur ! Signet non défini.**](#_Toc200817944)

[F**igure V.2 :** Distribution de la fraction molaire de OH sur le plan longitudinal et plan de sortie de la chambre de combustion……………………………………………………………………….....**Erreur ! Signet non défini.**](#_Toc200817945)

[F**igure V.3 :** Lignes de courant dans la cambre à combustion. **Erreur ! Signet non défini.**](#_Toc200817946)

**Liste des tableaux**

[Tableau I. 1: Capacité de production annuelle de la raffinerie d’Alger 4](#_Toc200915223)

[Tableau II. 1: O2 CO NOx…… ………………….……………………………………… 28](#_Toc200915224)

[Tableau IV. 1: Conditions aux limites. 43](#_Toc200923452)

[Tableau IV. 2: Critères de convergence 44](#_Toc200923453)

[Tableau V. 1 : Distribution de la température sur le plan longitudinal et plan de sortie de la chambre de combustion. 47](#_Toc200922046)

[Tableau V. 2: Distribution de la fraction molaire de OH sur le plan longitudinal et plan de sortie de la chambre de combustion. 49](#_Toc200922047)

[Tableau V. 3: Lignes de courant dans la cambre à combustion. 50](#_Toc200922048)

[Tableau V. 4: Résultats des températures et le facteur de forme pour l’étude de la simulation numérique 52](#_Toc200922049)

**Nomenclatures :**

**Lettres latines**

* : Vitesse de diffusion de la composante i de l’espèce k.
* : Le coefficient de diffusion de l’espèce k dans le mélange.
* : L’enthalpie de formation, qui est le flux de chaleur kJ/mol
* : L’enthalpie spécifique de l’espèce k.
* : L’enthalpie sensible.
* : La composante i-ème de la vitesse.
* : Les coordonnées spatiales.
* : La viscosité dynamique du fluide.
* : La viscosité turbulente.
* : Une constante modèle.
* : La production d’énergie turbulente.
* : La dissipation turbulente.
* : Une constante modèle.
* : La fraction massique de l’élément k. F et O signifient l’entrée de carburant et l’entrée d’air respectivement.
* : Le taux de production de l’espèce k.
* : La pression statique.
* : Les composantes de la vitesse dans les directions i et j.
* : Le tenseur visqueux.
* : Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)
* : Température (K)

**Lettres grecques**

* : Terme source de chaleur (J/m3)
* : L’énergie totale.
* : Masse volumique du fluide (kg/m3)

**Acronymes**

* CO : Monoxyde de carbone
* NO : Monoxyde d’azote
* OH :
* H2:
* CFD : Computational Fluid Dynamics
* PF : Facteur de Pattern
* PPDF : Presumed Probability Density Function
* RANS : Reynolds Average Navier-Stokes

**Introduction générale**

**Introduction générale :**

Dans un contexte mondial marqué par une **crise énergétique croissante**, des préoccupations environnementales urgentes et une pression réglementaire de plus en plus forte, la nécessité de développer des **systèmes de combustion plus propres, plus efficaces et plus durables** est devenue un enjeu central pour l’industrie. Les procédés de combustion restent, malgré l’émergence des énergies renouvelables, **la source dominante de production d’énergie thermique et électrique**, particulièrement dans les raffineries, les centrales thermiques, et les installations de cogénération. Cependant, ces procédés sont associés à des **émissions significatives de polluants atmosphériques**, tels que les **oxydes d’azote (NOₓ),** le **monoxyde de carbone (CO),** et les **particules fines,** qui ont un impact direct sur la **qualité de l’air**, la **santé publique** et le **changement climatique**. La **combustion turbulente**, bien que difficile à modéliser, constitue une voie prometteuse pour **améliorer l’efficacité** tout en **réduisant les émissions**. Elle permet un mélange rapide entre le combustible et l’air, garantissant une meilleure stabilité de flamme, une température plus homogène et une combustion plus complète.

Dans cette optique, les **brûleurs à faible swirl (Low Swirl Burners – LSB)** se sont imposés comme une solution technologique avancée. Contrairement aux brûleurs conventionnels, les LSB utilisent un faible mouvement tourbillonnaire pour stabiliser la flamme en aval de la sortie, permettant ainsi de **brûleur LSB fonctionner en régime pauvre** tout en minimisant la production de NOₓ. De plus, l’introduction de **combustibles alternatifs à faible empreinte carbone**, comme l’**hydrogène**, dans le mélange gazeux offre de nouvelles perspectives en matière de **transition énergétique**.

Ce mémoire s’inscrit dans ce cadre. Il porte sur une **étude numérique de la combustion turbulente** d’un **mélange méthane-hydrogène** installer dans une chaudière industrielle de la **raffinerie d’Alger (RA1G).** Ce système est étudié dans des conditions de fonctionnement réelles, avec l’objectif principal de **simuler le comportement de la flamme, analyser les émissions polluantes** (NOₓ, CO), et **évaluer l’effet des modifications géométriques** sur les performances du brûleur.

Pour cela, une méthodologie basée sur la **dynamique des fluides numérique (CFD)** est adoptée, en utilisant le logiciel **ANSYS Fluent**. La géométrie réelle de la chambre de combustion a été modélisée, et plusieurs cas de configuration (Cas A à G) ont été testés en introduisant des variations au niveau des zones de dilution et de combustion primaire. Des conditions aux limites réelles, issues de mesures industrielles, ont été intégrées afin d’assurer une **représentation fidèle du fonctionnement du système.**

La présente thèse est constituée d’une introduction générale, cinq chapitres et une conclusion générale.

**Organisation du mémoire :**

Ce travail se divise en plusieurs parties :

**Chapitre I :** Ce chapitre présente la raffinerie d’Alger. Il décrit l’organisation des unités de traitement et l’importance de la combustion. Le système de combustion des fours est détaillé, notamment les types de brûleurs utilisés.

**Chapitre II**une définition sur la combustion turbulente et les brûleurs à faible swirl (LSB). Les mécanismes de mélange air-combustible et la stabilité de flamme y sont abordés. Le chapitre traite aussi des principaux polluants (NOx, CO) et de leur formation.

**Chapitre III :**  est consacré à la **formulation mathématique** et à la modélisation numérique de la combustion et de la turbulence.

**Chapitre IV :** détaille la **procédure de simulation**, le maillage, les conditions aux limites, ainsi que l’analyse des résultats obtenus.

**Chapitre V :** quant à lui, est réservé à la discussion des résultats obtenus de la modification de la chambre de combustion en allongeant celle-ci et en ajoutant des trous dans la zone primaire et la zone de dilution dans la chambre de combustion, pour améliorer la distribution de la température et de minimiser les émissions de polluants atmosphériques.

**Chapitre I**

# Présentation de la raffinerie d’Alger

## Historique et Situation Géographique :

La raffinerie d’Alger a été fondée en décembre 1959, à la suite de la découverte de gisements pétroliers dans le sud de l’Algérie. Les travaux de construction ont débuté en janvier 1960, mais ce n’est que le 19 janvier que la raffinerie a été mise en service. Ce projet a été réalisé grâce à la participation de plusieurs compagnies pétrolières étrangères, réparties comme suit :

* Shell Algérie : 24 %
* Compagnie Française des Pétroles : 20 %
* ESSO Méditerranéen Inc. : 17,6 %
* Total S.A.H.M. : 12 %
* Société Française des Pétroles BP : 10,4 %
* SN REPAL : 10 %

La raffinerie d’Alger occupe une superficie totale de 182 hectares, dont 96 hectares bâtis et clôturés. Elle se situe à 5 km au sud d’El-Harrach et à 20 km à l’est de la ville d’Alger. Ce site a été retenu à la suite d’études géotechniques, notamment en raison de la présence d’une nappe phréatique, essentielle pour l’alimentation des systèmes de refroidissement. Le choix de la région d’Alger s’explique également par son potentiel en tant que futur pôle industriel, ainsi que par sa position de principal centre de consommation, représentant à lui seul 40 à 50 % de la demande intérieure. Ainsi, il apparaît que la production de cette raffinerie sera plus rentable comparée à celle d'autres installations similaires.



Figure I.1:Vue aérienne de la raffinerie d'Alger RA1G.

## Capacités de traitement

Suite aux travaux de réhabilitation, la capacité de traitement de la raffinerie d’Alger est passée de 2,7 à 3,5 millions de tonnes par an de pétrole brut en provenance de HASSI MESSOUD. Les capacités de production annuelles des différentes unités sont détaillées dans le tableau I-1.

Tableau I. 1: Capacité de production annuelle de la raffinerie d’Alger

|  |  |
| --- | --- |
| **Produit** | **Production annuelle (tonnes)** |
| **Reformat** | **603333** |
| **Isomérat** | **364333** |
| **Naphta (exportation)** | **76000** |
| **Fuel oïl** | **60000** |
| **Propane** | **69333** |
| **Butane** | **209667** |
| **Essence normal** | **600000** |
| **Essence super** | **757000** |
| **Essence RFCC** | **376000** |
| **Kérosène** | **620666** |
| **Gasoil** | **1261667** |

## Principales installations de la raffinerie :

La raffinerie d’Alger est dotée de plusieurs unités de production et d’infrastructures spécialisées, permettant un traitement complet et efficace du pétrole brut. Les principales installations se présentent comme suit :

### Unités de production :

* Unité de distillation atmosphérique (Unité 100) : D’une capacité annuelle de 3,5 millions de tonnes, elle permet la séparation des différentes fractions pétrolières.
* Unité de Gaz-Plant (Unité 300) : Elle assure la séparation du mélange de gaz liquéfiés (LPG) en propane et butane finis.
* Parc de stockage : Il comprend 53 réservoirs cylindriques d’une capacité totale de 474 500 m³ pour les divers produits pétroliers, ainsi que 9 réservoirs sphériques (15 106 m³) dédiés au propane et butane.
* Unité de craquage catalytique fluide (RFCC) : Capable de traiter 1 million de tonnes par an à partir du résidu atmosphérique, cette unité utilise un procédé de craquage catalytique à haute température.

### Section MS BLOC

Composée de trois unités complémentaires :

* Unité d’hydrotraitement des naphtas (U-500) : Élimine les impuretés (eau, halogènes, soufre, azote, oléfines, métaux lourds…) susceptibles de nuire à l'efficacité des catalyseurs utilisés dans les unités aval.
* Unité d’isomérisation des naphtas (U-510) : Transforme les hydrocarbures légers (C5 et C6) en isomères à haut indice d’octane, utilisés dans la production d’essence commerciale.
* Unité de reforming CCR (U-520) : Destinée à remplacer l’ancien reformeur catalytique, cette unité permet d’obtenir un naphta à fort indice d’octane via un catalyseur régénéré en continu.

### Section Sulfure BLOC :

Cette section traite les sous-produits contenant du soufre et comprend :

* Unité de traitement des gaz acides à l’amine (U-560 FGATU)
* Unité de stripage des eaux acides (U-570 SWS)
* Unité de régénération de l’amine (U-580 ARU)
* Unité de récupération du soufre (U-590 SRU)

### Installations d’utilités :

Ces unités assurent le bon fonctionnement de l’ensemble du complexe :

* Unité d’eau brute (U-701) : Reçoit l’eau de forage et de SEAL pour l’alimentation des différentes unités.
* Tours de refroidissement (U-710/711) : Fournissent l’eau de refroidissement à l’ensemble de la raffinerie.
* Unité d’eau déminéralisée (U-720) : Traite l’eau brute pour la convertir en eau déminéralisée.
* Unité d’eau anti-incendie (U-741) : Dédiée à la protection contre les incendies.
* Unité CPP (U-751) : Fournit de la vapeur et de l’eau d’alimentation pour chaudières (EAC). Elle comprend aussi une centrale électrique intégrant un turbogénérateur à gaz (GTG) et un autre à vapeur (STG), tous deux pilotés par le système de contrôle électrique ECS.
* Unité de production d’air comprimé (U-781) : Fournit l’air nécessaire aux instruments, à la purge, au décochage des fours, etc.
* Unité de torchère (U-791) : Assure l’évacuation sécurisée des gaz d’hydrocarbures et des liquides condensés.
* Unité de production d’azote (U-810) : Produit et stocke l’azote gazeux et liquide pour divers usages industriels.
* Unité de polissage des condensats (U-830 CPU) : Traite les condensats pollués provenant des différentes unités avant leur réutilisation.
* Unité de soude caustique et d’acide chlorhydrique (U-840) : Fournit les produits chimiques nécessaires au fonctionnement des unités.
* Unité de traitement des effluents (U-850) : Regroupe et traite toutes les eaux usées générées par les activités de la raffinerie via la station ETP.

## ****Chaudières de la Centrale Électrique (CCE) –751-G-001 A/B :****

* **Nombre** : 2 unités (1 en service, 1 en veille – partagée avec le HRSG)
* **Type** : Chaudières à circulation naturelle avec système de soufflage
* **Combustibles utilisés** :
  + Principal : Fioul
  + Secondaire : Gaz combustible (fuel gaz)
* **Paramètres vapeur** : Haute pression (HP) – 42 kg/cm²g
* **Capacité maximale nominale (CMN)** : 81,5 tonnes/heure
* **Pics autorisés** : Jusqu’à 10 % au-dessus de la CMN pendant 30 minutes par jour
* **Plage de modulation efficace** : 25 % de la CMN
* **Équipements complémentaires** :
  + 4 brûleurs basse émission de NOx par chaudière
  + Analyseurs en continu (O₂, SO₂, NOx, CO) intégrés au système SWAS
  + Fonctionnement possible en cas de coupure générale d’électricité
  + Ventilateur de soufflage à double entraînement (turbine vapeur + moteur électrique) avec commutation automatique
  + 1 ventilateur de refroidissement opérationnel + 1 en veille

### ****Générateur de Vapeur à Récupération de Chaleur (HRSG) – 751-M-003 :****

* **Nombre :** 1 (associé au Turbogénérateur à gaz - GTG)
* **Type :** Circulation naturelle avec brûleur d’appoint
* **Brûleurs :** Faible émission de NOx
* **Combustible :** Gaz combustible (fuel gaz)
* **Paramètres vapeur :** Niveau HP – 42 kg/cm²g
* **Capacité maximale nominale :** 81,5 tonnes/heure

**Autres spécificités** :

* + Ballon vapeur dimensionné pour 2 minutes de réserve entre niveau normal et bas
  + Partiteur électrique
  + Deux ventilateurs d’air (2 x 100 %) pour refroidissement et étanchéité
  + Analyseurs SWAS (O₂, SO₂, NOx, CO)
  + Capacité de produire de la vapeur à pleine charge même avec un fonctionnement partiel du GTG (50 %)
  + 1 ventilateur de refroidissement actif + 1 en veille

### ****Turbogénérateur à Gaz (GTG) – 751-M-001 :****

* **Type** : Modèle industriel haute capacité
* **Puissance nominale** : 31,5 MW à 38°C et 75 % d'humidité relative
* **Système de réduction des NOx** : Injection de vapeur
* **Combustibles** :
  + Principal : Gaz naturel
  + Secondaire : Gasoil
* **Équipements complémentaires** :
  + Cheminée de dérivation indépendante du HRSG
  + Système d’alimentation diesel avec réservoir journalier, filtres et pompes
  + Deux compresseurs de suralimentation pour le gaz naturel

### ****Turbogénérateur à Vapeur (STG) – 751-M-002 :****

* **Nombre** : 1
* **Puissance électrique :** 13,8 MW
* **Vapeur d’admission** : Niveau HP
* **Type** : Double extraction
  + 1ʳᵉ extraction : Vapeur moyenne pression (MP)
  + 2ᵉ extraction : Vapeur basse pression (BP)
* **Pression de sortie** : 0,12 kg/cm²

### ****Collecteurs de Vapeur HP / MP / BP et Systèmes de Décharge/Désurchauffe (SDD) :****

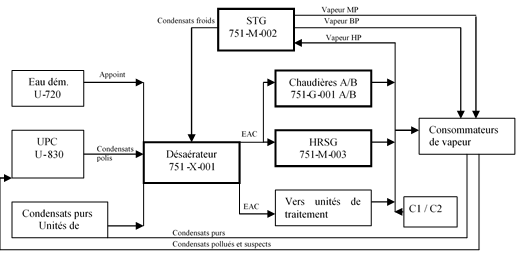
* En fonctionnement normal, aucun flux de vapeur ne transite entre les collecteurs via les SDD, quelle que soit la charge.
* L’équilibre vapeur est assuré par les extractions du STG.
* En cas d’urgence ou de perturbation, les SDD prennent le relais.
* Les stations de décharge/désurchauffe (HP/MP et MP/BP) fonctionnent automatiquement selon la pression des collecteurs.
* Une vanne d’aération commune est installée sur le collecteur BP pour relâcher l’excès de vapeur.
* Vannes de décharge et désurchauffeurs séparés
* Soupapes de sécurité en sortie des SDD

Figure I. 2: Schéma fonctionnel du système de production thermique industriel

## La chambre de combustion

La chaudière étudiée est équipée d'une chambre de combustion de forme rectangulaire, intégrant quatre brûleurs disposés de manière symétrique. Un compresseur principal est raccordé à l'entrée de la chambre afin d'assurer la compression de l'air de combustion. En parallèle, un second compresseur de plus petite taille est dédié au système de refroidissement, utilisé notamment pour le refroidissement des capteurs, des voyants et d'autres composants sensibles.

Afin de protéger les éléments environnants de la chaleur intense, la chambre de combustion est revêtue intérieurement d’un matériau isolant de type réfractaire. Ce dernier est spécialement conçu pour résister aux températures élevées ainsi qu’aux chocs thermiques fréquents dans ce type d’environnement.

Au sein de cette chambre, une réaction chimique se produit entre le combustible fuel-gaz des unités de traitement MS-Block et RFCC — et l'air de combustion comprimé. Cette réaction exothermique permet la production de gaz de combustion (fumées), qui peuvent ensuite être valorisés dans différents procédés énergétiques selon les besoins de l’installation.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

**Figure I. 3** : photo réelle de la chambre de combustion

## Les brûleurs

Les brûleurs sont disposés à l’entrée de la chambre de combustion et présentent une configuration circulaire. Chaque brûleur est équipé de plusieurs éléments fonctionnels permettant une atomisation et un mélange optimal du combustible et de l’air.

On distingue principalement :

* Un injecteur principal, destiné à l’injection du combustible sous pression dans la zone de combustion.
* Des injecteurs secondaires, assurant un complément d’alimentation pour stabiliser la flamme ou adapter la combustion à des charges variables.
* Un système de pilotage (pilot), généralement utilisé pour l’allumage initial ou le maintien de la flamme en régime réduit.
* Un swirler, dispositif essentiel placé en amont de la zone de mélange, qui imprime un mouvement tourbillonnaire à l’air de combustion. Cette turbulence favorise l’homogénéisation du mélange air-combustible et améliore la stabilité de la flamme.

L’image ci-jointe illustre clairement la géométrie du brûleur, avec en son centre le distributeur de flux (similaire à une roue à aubes), entouré des injecteurs et composants de guidage. Ce design permet une répartition homogène du flux d'air et de combustible, essentielle pour garantir une combustion complète, stable et efficace dans un environnement à haute température.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Figure I. 4 : photo réelle d’un bruleur LSB | |

**Chapitre II**

# Généralités et études bibliographiques



## Introduction :

Il y a plusieurs millénaires, l’humanité découvrait « l’art du feu ». Ce n’est toutefois qu’au cours de la révolution industrielle du XIXe siècle que la combustion rapide a commencé à être exploitée efficacement dans les machines, afin de répondre aux besoins croissants en énergie. Aujourd’hui, la combustion occupe une place centrale dans de nombreux secteurs pour satisfaire les importantes exigences de notre économie moderne. Parmi les sources d’énergie, les combustibles fossiles demeurent les plus utilisés à l’échelle mondiale. Cependant, leur combustion génère des polluants nuisibles à l’environnement, ainsi que des gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique.

Ce chapitre propose un rappel des notions fondamentales nécessaires à la compréhension et à la maîtrise du sujet de cette recherche. Il est suivi d’une synthèse bibliographique des travaux antérieurs menés dans ce domaine.

## La combustion

La combustion est une réaction chimique exothermique d’oxydoréduction entre un combustible, qui cède des électrons, et un comburant, qui les capte. Les combustibles sont souvent carbonés, mais peuvent aussi contenir d'autres éléments comme l’hydrogène ou le soufre. L’oxygène de l’air est le comburant le plus courant, mais d’autres oxydants peuvent être utilisés. Ce processus est essentiel pour produire de la chaleur ou de l’énergie dans les moteurs et installations industrielles. [1]

### Triangle du feu:

La combustion ne peut avoir lieu qu’en présence simultanée de trois éléments fondamentaux formant ce que l’on appelle le « triangle du feu » : un réducteur, un oxydant (comburant) et une source d’énergie (généralement thermique) permettant d’amorcer la réaction.

* **Le combustible :**

Le combustible ou carburant peut être gazeux, liquide ou solide, d’origine naturelle ou manufacturée. Il contient des éléments chimiques capables d’être oxydés lors de la combustion. Certains composants peuvent être inertes et ne participent pas directement à la réaction. Ces éléments se retrouvent ensuite dans les produits de combustion. Les résidus sont soit des fumées (gaz) soit des cendres (solides ou liquides). [1]

* **Le comburant :**

Le comburant le plus utilisé en combustion est l’oxygène, souvent présent dans l’air avec l’azote. D’autres agents oxydants peuvent aussi être employés, comme l’ozone, les oxydes d’azote ou certains halogènes (fluor, chlore, brome, iode). En général, tout composé ayant un fort pouvoir oxydant peut servir de comburant. Ces substances permettent la réaction chimique avec le combustible.

* **L’énergie d’activation**

L’énergie d’activation est l’énergie initiale nécessaire pour déclencher la combustion, souvent apportée par une étincelle ou de la chaleur. Elle permet l’apparition d’une flamme, milieu gazeux où se déroulent les réactions. Ce gaz réactif forme un volume défini dans l’espace. La longueur de flamme est une mesure utilisée pour décrire l’étendue du front de réaction. [2]

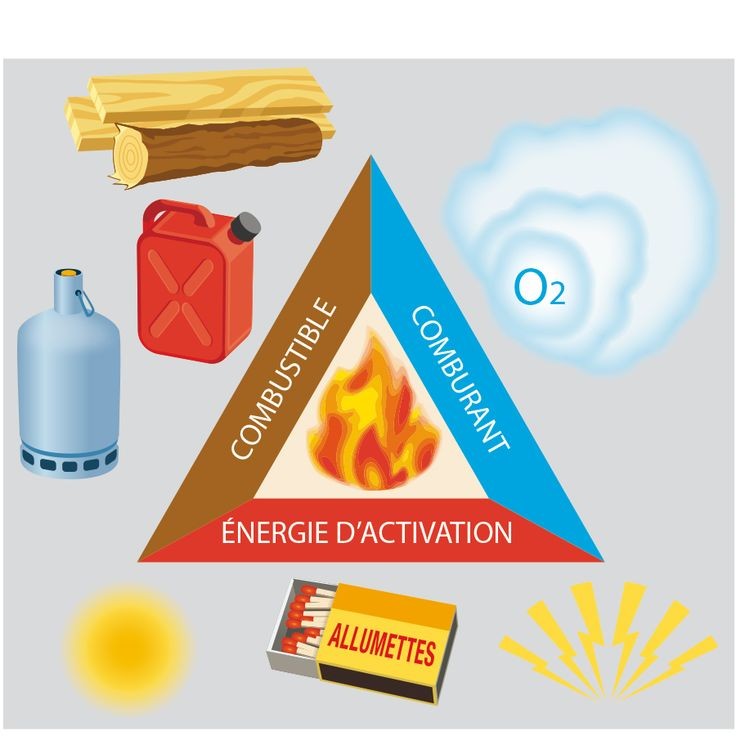


Figure II. 1 : Triangle de feu.

La combustion implique principalement deux phénomènes fondamentaux :

* **L’auto-inflammation**:

Lorsque la pression, la température et la concentration en combustible restent en dessous de seuils critiques, l’oxydation lente se maintient sans emballement. Si ces trois paramètres dépassent leurs seuils, la réaction s’emballe spontanément, provoquant une auto-inflammation ou explosion, première étape de la combustion.

* **La propagation :**

Une fois l’auto-inflammation déclenchée, la réaction de combustion peut soit resté confinée à une zone localisée, soit se propager à l’ensemble du mélange réactif. L’établissement de cette propagation dépend de deux types de conditions : internes et externes au système réactionnel.

. La nature de la propagation dépend de la vitesse à laquelle le front de flamme se déplace dans le milieu réactionnel. On distingue deux régimes principaux :

* **Déflagration** : lorsque la vitesse de propagation est inférieure à celle du son (régime subsonique).
* **Détonation** : lorsque la vitesse de propagation dépasse celle du son (régime supersonique).

### Classification des flammes selon le mode de mélange air-gaz

La classification des flammes peut être établie en fonction du mode de mélange entre le combustible gazeux et le comburant (généralement l'air). On distingue principalement deux grandes catégories : les flammes de pré-mélange et les flammes de diffusion.

* **Flammes de diffusion :**

Ces flammes résultent de l’écoulement du combustible gazeux pur à travers un ou plusieurs orifices simples, sans pré-mélange avec l’air. Le comburant est alors uniquement apporté par diffusion à partir de l’air ambiant.

* **Flammes de pré mélange**

Ces flammes sont produites lorsque le combustible gazeux est pré mélangé, partiellement ou totalement, avec l’air de combustion avant l’allumage. Ce type de configuration permet un contrôle plus précis du mélange stœchiométrique, Influençant la stabilité, la température, ainsi que les émissions polluantes générées par la combustion [8].

## Les bruleurs :

### Définition du brûleur :

Dans tout dispositif thermique alimenté par un combustible, le brûleur constitue l’élément clé chargé de générer la flamme. Il assure plusieurs fonctions fondamentales :

* Réaliser le mélange du combustible et du comburant (généralement l’air), en proportions optimales, au moment adéquat.
* Permettre l’initiation et le maintien de la combustion dans des conditions contrôlées, en produisant une flamme aux caractéristiques dimensionnelles, thermiques et physico-chimiques adaptées à l’application visée [5].

Les brûleurs sont des dispositifs industriels conçus pour exploiter la combustion à des fins spécifiques telles que la production de chaleur, ou la transformation/dégradation de certains matériaux. Contrairement aux systèmes de propulsion, leur finalité première n’est pas le déplacement, mais l’apport d’énergie thermique dans des installations telles que les foyers, fours industriels ou chaudières. Ils sont largement utilisés dans divers secteurs industriels ainsi que dans les centrales thermiques [6].

### Classification des brûleurs :

Il existe une grande variété de brûleurs, certains étant spécifiquement conçus pour un type particulier de four ou de combustible, tandis que d'autres présentent une plus grande flexibilité d’utilisation. Dans cette section, seuls les principes fondamentaux de classification sont abordés afin de fournir une vue d’ensemble des différentes technologies de brûleurs.

On distingue principalement trois grandes catégories :

* **Bruleurs à prémélange :**

Les brûleurs à pré-mélange mélangent l’air et le gaz combustible avant l’injection dans le foyer, produisant des flammes courtes et très chaudes. Ce type de brûleur est réservé aux combustibles gazeux. Il exige des précautions rigoureuses pour prévenir les retours de flamme dangereux vers le système de mélange.

* **Bruleurs à flamme de diffusion :**

Les brûleurs à mélange en sortie introduisent séparément le combustible et le comburant, le mélange se faisant à l’orifice du brûleur. Ils sont compatibles avec divers combustibles : gazeux, liquides ou solides pulvérisés. Le contrôle précis des débits permet d’adapter la flamme aux exigences du procédé. [7]

* **Bruleurs multi-combustibles :**

Les brûleurs multi-combustibles peuvent fonctionner avec des gaz, des liquides (comme le fuel-oil) ou des solides pulvérisés (comme le charbon). Les gaz sont généralement traités comme un seul groupe. Les brûleurs mixtes gaz/fuel-oil sont les plus répandus dans l’industrie. [9].

## Combustion dans un écoulement swirlé :

Les écoulements tourbillonnaires sont largement utilisés dans de nombreuses applications industrielles pour améliorer la stabilisation des flammes. Pour ce faire, un dispositif appelé swirler *ou* tourbillonner est intégré à l’injecteur afin de générer un mouvement de rotation du flux. Ce type d’injection induit un écoulement tourbillonnaire qui permet de concentrer l’énergie de combustion, conduisant à la formation de flammes très compactes. Cela permet de réduire significativement la taille de la chambre de combustion. [11]

## Les types de polluantes :

La compréhension des mécanismes de formation des polluants dans les flammes swirlées non-pré-mélangées est essentielle pour concevoir des systèmes de combustion plus propres. Cette étude se concentre sur les oxydes d’azote (NOx) et le monoxyde de carbone (CO), deux polluants aux effets néfastes sur l’environnement et la santé. Elle détaille les processus responsables de leur production, en distinguant les différentes formes de NOx. Mieux connaître ces phénomènes permet d’identifier des leviers d’optimisation. L’objectif est de limiter les émissions tout en améliorant l’efficacité énergétique des systèmes. [11]

### Les polluantes primaire :

Les polluants primaires sont des substances rejetées directement dans l’atmosphère par diverses sources, qu'elles soient naturelles ou liées aux activités humaines. Ils sont émis sans subir de transformation chimique préalable. On les retrouve notamment dans les émissions des véhicules, des centrales électriques au charbon ou au gaz, lors de la combustion de la biomasse, des feux de forêt ou des éruptions volcaniques. Ces polluants présentent des risques importants pour la santé humaine, les écosystèmes et participent à la formation de polluants secondaires tels que l’ozone troposphérique et le smog. Toutefois, leurs émissions ont nettement diminué ces dernières années grâce aux avancées technologiques, à des réglementations plus strictes et à des évolutions économiques. [12]

Les types de polluants primaires comprennent :

* Oxydes d’azote (NOx)
* Monoxyde de carbone (CO)
* Composés organiques volatils (les COV)
* Oxydes de soufre (SOx)
* Matières particulaires (MP)

Certains polluants peuvent appartenir à la fois aux catégories de polluants primaires et secondaires. Par exemple, les oxydes d’azote (NOx) sont directement émis par les véhicules et les centrales électriques, mais peuvent aussi se former dans l’atmosphère à partir de réactions impliquant d’autres substances chimiques. [13]

### Les polluants secondaires

Les polluants secondaires se forment dans l’atmosphère et ne sont pas émis directement par une source. Ils résultent des réactions chimiques entre les polluants primaires et les molécules présentes dans l’air, comme l’oxygène, l’eau ou les hydrocarbures. Leur formation dépend fortement des conditions météorologiques. Ces polluants sont préoccupants car ils peuvent provenir de nombreux composés différents. Par exemple, le smog photochimique, qui se manifeste par des nuages jaunes nocifs, résulte de ces interactions et contient des polluants secondaires comme l’ozone, les nitrates de peroxyacyle (NPA) et l’acide nitrique. [14]

Les différents types de polluants secondaires comprennent :

1. Ozone (O3)
2. Acide sulfurique et acide nitrique (composant des pluies acides)
3. Matières particulaires
4. Dioxyde d’azote (NO2)
5. Nitrates de peroxyacyle (les NPA)

Ces substances se forment progressivement dans l’atmosphère et se retrouvent généralement en aval des sources d’émissions primaires, car leur production demande du temps. Lorsque les polluants primaires sont piégés par des couches d’inversion atmosphérique, le smog se forme directement au-dessus des zones d’émission. C’est pour cette raison que le smog est particulièrement présent dans les villes où l’air est chaud et dense. [15]

## Monoxyde de carbone (CO)

La formation de CO dans les systèmes de combustion résulte de plusieurs mécanismes. Le plus courant est la combustion incomplète, qui survient lorsqu’une quantité insuffisante d’oxygène empêche l’oxydation complète du combustible, conduisant à la production de CO au lieu de CO₂. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les mélanges riches, où l’oxygène disponible ne permet pas une combustion complète. Dans le cas des flammes non-pré-mélangées, l’inhomogénéité du mélange air-combustible rend la formation de CO plus fréquente. [11]

### Impact environnemental

Le monoxyde de carbone (CO) agit indirectement sur l’effet de serre en modifiant le pouvoir oxydant de l’atmosphère terrestre. Cette influence favorise l’augmentation des concentrations de méthane (CH₄) et d’oxydes nitreux (N₂O). De plus, le CO joue un rôle de précurseur dans la formation de la pollution photochimique, en particulier celle de l’ozone troposphérique.

### Impact sur la santé

Le monoxyde de carbone (CO) représente un danger majeur pour la santé humaine en raison de son affinité élevée avec l’hémoglobine, à laquelle il se lie préférentiellement à la place de l’oxygène. Cette interaction entraîne une hypoxie tissulaire affectant principalement le système nerveux central, le cœur et les vaisseaux sanguins. Les effets physiopathologiques varient selon la concentration et la durée d’exposition : à faibles doses, le CO peut provoquer céphalées, asthénie, dyspnée légère et troubles moteurs. À des concentrations plus élevées ou en cas d’exposition prolongée, il peut entraîner vertiges, douleurs thoraciques, troubles visuels et cognitifs. Une exposition aiguë à des niveaux très élevés peut conduire à des convulsions, au coma, voire au décès. [16]

## Les oxydes d’azote (NOx)

L’oxyde nitrique (NO) est un gaz incolore et inodore généré principalement lors des processus de combustion à haute température, tels que ceux observés dans les moteurs à combustion interne et les installations industrielles. Bien qu’une partie du dioxyde d’azote (NO₂) soit émise directement, la majeure partie de ce composé résulte de l’oxydation atmosphérique du NO. Ce dernier est également présent dans les émissions de fumée de tabac. Le NO₂, oxydant particulièrement réactif, intervient dans la formation de nitrates organiques toxiques et d’acide nitrique (HNO₃), un agent fortement corrosif. De plus, il participe aux réactions photochimiques à l’origine de la production d’ozone troposphérique, un polluant à fort impact sanitaire et environnemental. [17] .

Il existe trois principales sources d’émissions de NOx lors des combustions :

* 1. Thermique NOx
  2. Carburant NOx
  3. Invite Nox (prompte)

Le NOx est frottement influencée par la température donc c’est une Relation proportionnelle directe.

|  |
| --- |
| Figure II. 2 : Formation de smog photochimique, la lumière du soleil réagit avec le NO2 qui interagit ensuite avec d’autres molécules dans l’air pour former le smog |
|  |

### Impact environnemental

Les oxydes d’azote (NOx) contribuent à l’acidification et à l’eutrophisation de l’environnement, entraînant des altérations significatives de la composition de l’air, des eaux de surface et des sols. Bien qu’ils participent indirectement à l’effet de serre, ils ne sont généralement pas pris en compte dans les objectifs de réduction des gaz à effet de serre. Parmi les principaux mécanismes physico-chimiques associés aux NOx figurent la formation d’aérosols secondaires, le smog estival et la pollution photochimique. En milieu urbain, ces polluants peuvent engendrer des brouillards acides et des dépôts nocifs, affectant notamment le patrimoine architectural. À l’échelle régionale, les précipitations acides provoquées par les NOx ont des effets néfastes sur la végétation, accélèrent la dégradation des forêts, l’acidification des lacs, et perturbent les réseaux trophiques aquatiques en eau douce comme en milieu marin. [17]

### Impact sur la santé

Bien que l’oxyde nitrique (NO) ne présente pas de toxicité directe pour l’être humain aux concentrations généralement rencontrées dans l’air ambiant, il revêt une importance particulière en raison de son oxydation rapide en dioxyde d’azote (NO₂), un composé hautement réactif et reconnu comme précurseur majeur de la formation d’ozone troposphérique. Le NO est également utilisé comme traceur efficace des émissions liées au trafic routier, notamment dans des zones urbaines densément peuplées telles que la région de Bruxelles-Capitale.

Le NO₂, en revanche, est un gaz irritant qui altère les fonctions du système respiratoire, en particulier chez les individus sensibles tels que les asthmatiques et les patients atteints de maladies respiratoires chroniques. Une exposition prolongée à des concentrations de l’ordre de quelques dixièmes de ppm (centaines de µg/m³) peut entraîner des effets délétères notables. En plus de son rôle dans la formation de l’ozone, le NO₂ agit également comme précurseur dans la génération de particules secondaires. Des études toxicologiques menées sur des animaux ont mis en évidence des altérations physiopathologiques suite à des expositions prolongées (de 1 à 6 mois) à des concentrations comprises entre 0,1 et 0,5 ppm (190 à 950 µg/m³). En réponse à ces données, l’Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a fixé dès 1987 des seuils d’exposition jugés acceptables : 400 µg/m³ en moyenne horaire et 150 µg/m³ en moyenne journalière. Ces valeurs visaient à protéger à la fois les populations en bonne santé et les groupes vulnérables (personnes âgées, enfants, asthmatiques, etc.). Depuis 1999, l’OMS a toutefois renforcé ces recommandations, fixant la concentration maximale horaire à 200 µg/m³ et la moyenne annuelle à 40 µg/m³ afin de limiter les risques sanitaires liés à l’exposition chronique au NO₂. [18]

Il y a d’autre polluantes comme :

* Polluant oxydes de soufre SOx.
* Composés organiques volatils.
* Les Particules en suspendues.

## Etudes bibliographiques :

Zimont et al. [19] a élaboré une étude de simulation numérique sur la classe spéciale des flammes pré mélangées turbulentes appelées la propagation de flammes intermédiaires stables ISP (Intermediate steady propagation flammes). Ces flammes sont largement répondues dans les chambres de combustions industrielles qui opèrent avec des flammes pré mélangées à forte intensité turbulente. Il a trouvé que les pulsations de vitesses sont sensiblement plus importantes que la vitesse de combustion qui est caractérisée par une vitesse de combustion turbulente pratiquement constante. Et que cette dernière est contrôlée par la turbulence, la chimie, les processus moléculaires et par l’augmentation de la largeur de flammes contrôlées par la diffusion de la turbulence.

L’étude menée par Cheng et al. [20] complète les recherches précédentes sur les turbines à gaz équipées d’injecteurs à faible nombre de swirl (LSI), en explorant leur adaptation à la combustion de l’hydrogène dans le cadre des centrales à cycle combiné à gazéification intégrée (IGCC). Les auteurs démontrent que le LSI peut fonctionner avec un mélange contenant jusqu’à 100 % d’hydrogène. Ils observent cependant que la flamme prémélangée turbulente change progressivement de forme avec l’augmentation du taux d’hydrogène, tout en conservant un mécanisme de stabilisation identique jusqu’à un taux de 60 %. Une corrélation logarithmique linéaire est également identifiée entre les émissions de NOx et la température adiabatique de la flamme, avec des concentrations proches de celles observées dans les études antérieures utilisant du gaz naturel. Ces résultats suggèrent que le LSI présente un comportement aérodynamique et chimique stable en présence d’hydrogène, ce qui permet d’envisager une mise à l’échelle du dispositif dans des conditions IGCC.



Figure II. 3 : résultats de l’étude de Cheng et Zimont.reference

EMADI et al. [21]. Dans le cadre de la transition vers des combustibles alternatifs, une attention particulière est portée à la flexibilité des systèmes de combustion vis-à-vis de mélanges contenant de l’hydrogène. Une étude expérimentale a ainsi été menée sur la combustion pré mélangée pauvre de méthane et de mélanges méthane-hydrogène (0 %, 20 % et 40 % en volume d’H₂), à l’aide d’un brûleur à faible swirl (LSB), dans une chambre de combustion opérant à différentes pressions (de l’atmosphérique jusqu’à 3 ATM). Cette investigation visait à analyser l’effet de l’enrichissement en hydrogène sur le comportement des flammes pré mélangées en fonction de la pression, à travers la variation de la stabilité et des structures de flamme. Les rapports d’équivalence ont été soigneusement sélectionnés, et les mesures ont été obtenues à l’aide de la technique de fluorescence induite par laser planaire OH (OH-PLIF), permettant de visualiser finement la structure de la flamme. Les résultats ont montré que l’ajout d’hydrogène contribue à élargir significativement les marges de stabilité des flammes, en particulier à pression élevée : un enrichissement à 20 % d’H₂ entraîne une extension de la limite de soufflage de 7 %, tandis que 40 % permet une augmentation de la zone stable de 35 %. Par ailleurs, une relation claire a été établie entre l’augmentation de la pression et l’effet stabilisant de l’hydrogène, renforçant ainsi la pertinence de l’hydrogène comme additif dans les configurations de combustion à haute pression.

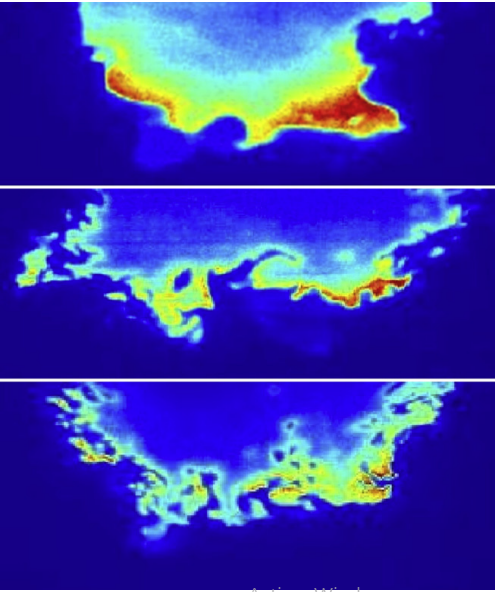


Figure II. 4 : résultats de l’étude de EMADI.reference

Ebi et al. [22], ont mené une étude expérimentale approfondie sur le phénomène de retour de flamme en couche limite dans des flammes turbulentes pré mélangées, stabilisées par un écoulement swirlé. Deux types de mélanges ont été étudiés : un mélange méthane/air avec des rapports d'équivalence de 0,8 et 1,0, et un mélange hydrogène/méthane/air contenant 95 % d'hydrogène en volume, à une richesse de 0,4. Pour mieux comprendre l’interaction entre l’écoulement et la flamme lors du flashback, les auteurs ont utilisé une approche expérimentale complète combinant l’imagerie de chimioluminescence à haute vitesse, la vélocimétrie par imagerie de particules stéréoscopique et tomographique, ainsi qu’une reconstruction tridimensionnelle du front de flamme. Les résultats ont révélé deux mécanismes distincts de propagation en amont. Le premier, mineur, repose sur de petites excroissances contre-propagatives, similaires à celles observées en écoulement canalisé. Le second, dominant, implique la formation de grandes langues de flamme entraînées par le swirl, qui remontent le long du corps central et modifient l’écoulement en amont par un effet de blocage local. Ce comportement est particulièrement prononcé pour les mélanges riches en hydrogène, où les flammes présentent une dynamique de propagation amplifiée, engendrant des zones persistantes de vitesse axiale négative, favorables à la progression du front de flamme. Cette étude met en évidence l’importance des interactions entre la structure de la flamme, la dynamique tourbillonnaire et les conditions de stabilité dans les configurations de combustion à haute flexibilité de carburant.

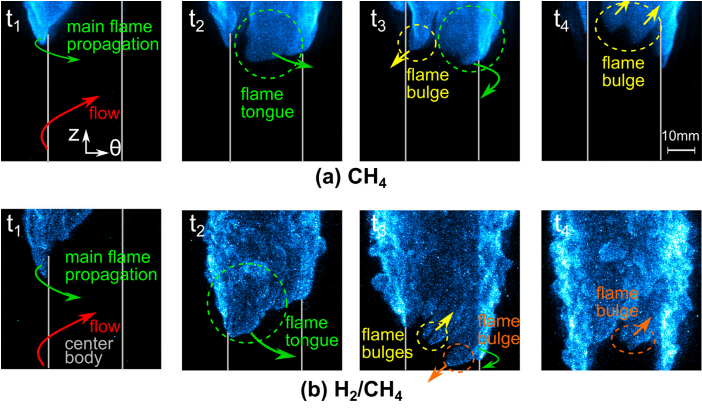


Figure II. 5 : résultats de l’étude de Clemens .reference

Cllek et al. [23]. Une étude expérimentale et numérique a été menée pour évaluer les performances d’un brûleur à faible swirl (LSB) ainsi que les caractéristiques d’émissions lors de la combustion de différents mélanges air-combustible : (i) du gaz naturel pur, (ii) du gaz naturel enrichi en hydrogène (avec des ratios thermiques de 75 % NG + 25 % H₂, 50 % NG + 50 % H₂, 25 % NG + 75 % H₂ et 100 % H₂), et (iii) de l’hydrogène pur. Les résultats expérimentaux obtenus pour le mélange 100 % gaz naturel, réalisés dans le brûleur LSB et dans une chaudière à vapeur, ont servi de conditions aux limites dans les simulations CFD de deux modèles distincts. Cette approche a permis de comparer les performances des mélanges enrichis en hydrogène et de l’hydrogène pur avec celles du gaz naturel seul. Les simulations ont été effectuées à l’aide du modèle de combustion par dissipation turbulente (Eddy Dissipation Model), qui convient bien aux carburants à réaction rapide comme l’hydrogène. L’utilisation d’une condition aux limites périodique, autorisant l’étude d’un quart de la géométrie totale, a permis de réduire significativement le nombre de mailles nécessaires, tout en conservant une précision satisfaisante dans les résultats. Les résultats ont montré que l’enrichissement en hydrogène ou l’utilisation d’hydrogène pur entraîne une réduction notable des émissions de CO et de CO₂ par rapport au gaz naturel, traduisant une combustion plus propre. Cependant, une hausse marquée des émissions de NOx a été observée, principalement attribuée à la formation de NO thermique, en raison des températures de flamme plus élevées induites par l’hydrogène.

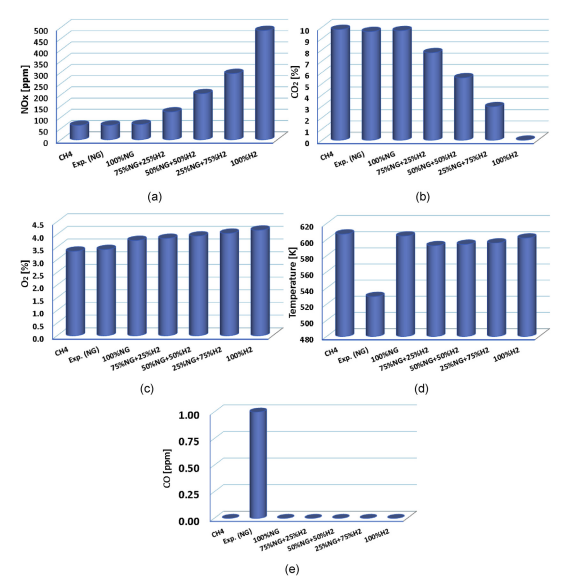


Figure II. 6 : les émissions de CO et Nox et CO2 et O2 et température en fonction des déférents mélange gaz combustible. .reference

Pashchenko [24], Dans le cadre de l’étude de la combustion des mélanges pauvres enrichis en hydrogène dans des configurations swirlées, il a réalisé une modélisation CFD appuyée par une validation expérimentale rigoureuse. Le modèle utilisé repose sur une approche de combustion pré mélangée intégrant une fonction de densité de probabilité (PDF), couplée à un modèle de turbulence de type k-ε RNG, bien adapté aux écoulements turbulents fortement anisotropes présents dans les chambres de combustion swirlées. L’étude visait à prédire avec précision la dynamique de la flamme et les émissions associées dans le cas de mélanges air-combustible contenant différentes proportions d’hydrogène. Les résultats numériques ont été comparés aux données expérimentales, et ont montré une excellente concordance, avec un écart d’environ 3 % pour la température maximale prédite et inférieur à 7 % pour les émissions de NOx. Ces faibles écarts soulignent la robustesse du couplage du modèle Premixed Combustion avec une approche PDF dans la prédiction des caractéristiques thermiques et polluantes des flammes swirlées à haute réactivité. Ce travail confirme l’efficacité de cette approche pour simuler les flammes à base d’hydrogène, particulièrement pertinentes dans le contexte de la transition énergétique vers des carburants bas carbone.

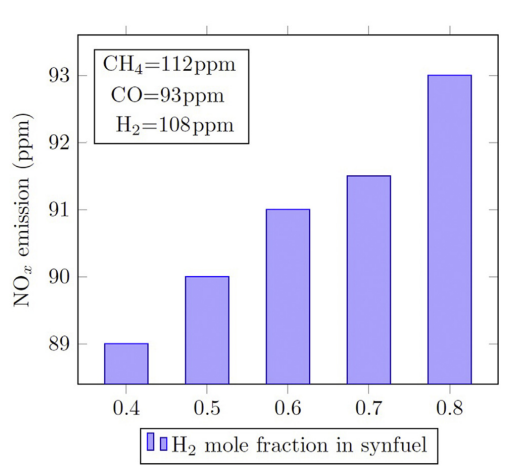


Figure II. 7 : les émissions de NOx en fonction de la fraction massique de H2.reference

Xiao Yang et al. (2020) [25], Plusieurs travaux ont été menés sur la stabilité des flammes pré-mélangées hydrogène/air dans des micro-combusteurs swirlés, afin de répondre aux exigences de miniaturisation et d’efficacité énergétique. Un modèle de micro-combusteur cylindrique équipé d’un système swirl à six aubes inclinées à 45° a été étudié à travers des simulations CFD tridimensionnelles. Les résultats ont révélé deux zones de recirculation majeures : une **zone intérieure**, qui joue un rôle prépondérant dans l’ancrage de la flamme, et une **zone d’angle**, contribuant au préchauffage du mélange réactif. Xiao Yang et al. Ont confirmé ces observations en utilisant un **modèle EDC** avec cinétique chimique détaillée et un **modèle de turbulence k-ε réalisable**. Ils ont montré que l’**augmentation du rapport d’équivalence** améliore la stabilité de la flamme, notamment en intensifiant l’effet de préchauffage. De plus, une **bonne conductivité thermique des matériaux solides** favorise l’initiation des réactions en chaîne, ce qui renforce la stabilité de la flamme dans des conditions pauvres en carburant. Cette configuration démontre un fort potentiel pour les applications en combustion propre à l’hydrogène.

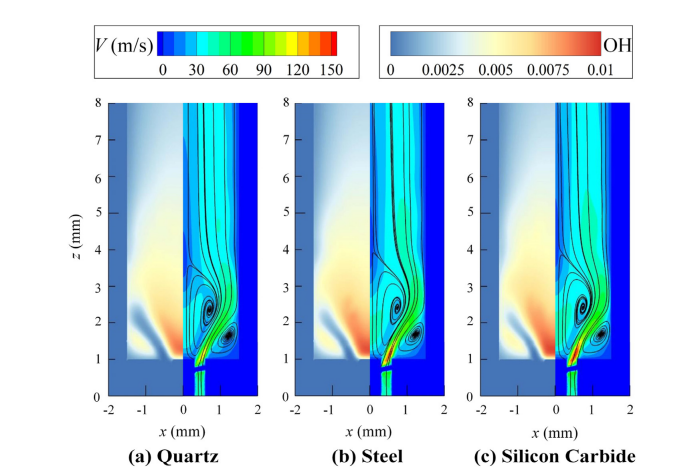


Figure II. 8: la distribution de la vitesse et de OH

## Les études réalisées par la raffinerie d’Alger (SONATRACH) :

Ignat [26] a mené une mission technique qui été réalisée à la raffinerie SONATRACH d’Alger du 12 au 14 mars 2020. L’objectif était de diagnostiquer les dysfonctionnements de combustion d’une chaudière MACCHI équipée de brûleurs LSB. L’ingénieur a constaté une combustion instable : flamme trop longue, orange, et générant de la fumée, conséquence d’un rapport air/gaz déséquilibré, avec 53 300 Nm³/h d’air et 6 300 Nm³/h de gaz. La gestion manuelle des réglages sans consignes précises a aggravé le problème, notamment en ce qui concerne la répartition entre les anneaux interne et externe des brûleurs. L’étude a souligné l’importance d’adapter les réglages à la composition réelle du gaz naturel, identifiée comme correspondant au cas C des courbes de capacité Zeeco. Des dépôts de coke ont aussi été observés sur les buses, représentant un risque pour l’intégrité des composants. Les recommandations incluent : ajustement des débits, nettoyage des buses, vérification des seuils de pression, et formation des opérateurs. L’étude met en avant la nécessité d’une surveillance techniquerigoureuse et d’un personnel qualifié pour garantir une combustion fiable, sûre et conforme aux normes environnementales.

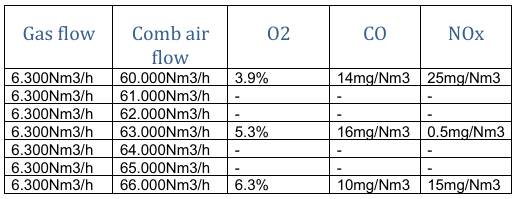


Tableau II. 1: O2 CO NOx.reference

# 

**Chapitre III**

# Formulation mathématique et modélisation de la combustion turbulente



## Introduction :

La combustion turbulente est un phénomène complexe résultant de l'interaction entre des réactions chimiques exothermiques et des écoulements fluides instables et tridimensionnels. Elle est omniprésente dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans les moteurs à combustion interne, les turbines à gaz et les chaudières. La modélisation précise de ce processus est essentielle pour optimiser les performances énergétiques, réduire les émissions polluantes et garantir la stabilité des systèmes de combustion.

Sur le plan mathématique, la combustion turbulente est décrite par un ensemble d'équations aux dérivées partielles couplées, incluant les équations de Navier-Stokes pour les écoulements compressibles, les équations de transport des espèces chimiques et celles de l'énergie. La turbulence introduit des fluctuations rapides et aléatoires des variables de champ, ce qui complique davantage la résolution directe de ces équations

Ce chapitre se propose d'explorer les fondements mathématiques de la combustion turbulente, en présentant les équations de base, les méthodes de fermeture nécessaires pour traiter les termes non résolus.

## Les hypothèses :

Pour la simulation numérique de notre bruleur LSB pré mélangée turbulente quelques simplifications doivent être faites pour terminer ce travail.

* Le phénomène étudié est considéré permanant.
* Le mélange est incompressible.
* Cette situation est considérée comme symétrique dans la simulation.

## Formulation mathématique

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de l'étude des flux réactionnels, régis par les équations fondamentales de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, des espèces chimiques et de l'énergie. Ces équations, issues des lois de la mécanique des fluides et de la thermodynamique, permettent de modéliser les phénomènes complexes intervenant dans la combustion turbulente

### Équation de la continuité :

L’équation de la continuité est définie comme la loi de la conservation de masse appliquée à un fluide traversant un volume de contrôle infinitésimal fixe.

(III.1)

L’équation de conservation de masse pour espèce k s’écrit :

+ = (III.2)

est la vitesse de diffusion de la composante i de l’espèce et est le taux de production de l’espèce k.

On définit la vitesse de diffusion par la loi de Fick comme suit :

(III.3)

Avec et est le coefficient de diffusion de l’espèce k dans le mélange.

### Équations de la conservation de la quantité de mouvement :

**L’équation de conservation de la quantité de mouvement,** plus connue sous le nom d’équation de Navier-Stokes, décrit le mouvement des fluides visqueux. Elle est obtenue en appliquant la deuxième loi de Newton à un fluide traversant un volume de contrôle infinitésimal, ce qui permet de représenter l’évolution de la quantité de mouvement en fonction de l’espace et du temps. Cette équation est valable aussi bien pour les écoulements réactifs que non réactifs. Elle s’écrit sous la forme :

(III.4)

Avec :

* : les coordonnées cartésiennes dans la direction i et j.
* : la densité.
* : la pression statique
* : les composants de la vitesse dans les directions i et j.
* : le tenseur visqueux, définit par :

(III.5)

### Équation de conservation de l’énergie

La loi de la conservation de l’énergie pour un écoulement réactif est donnée par l’équation :

(III.6)

Avec : est le dégagement de chaleur du à la combustion.

(III.7)

Avec : est l’enthalpie de formation, est le flux de chaleur, elle est définie par la relation suivante :

(III.8)

Avec :

* : l’enthalpie spécifique de l’espèce k.
* : le terme source de chaleur.
* : l’énergie totale, définit par :

(III.9)

Avec : est l’enthalpie, est l’enthalpie sensible.

### Equation de conservation des espèces chimiques :

Pour la première étude de comparaison, le modèle chimique utilisé est le PPDF (presumed probability density function) qui produit des résultats satisfaisant pour les écoulement réactifs non pré-mélangé et turbulent. Dix espèces chimiques ont été résolues en utilisant l’équilibre chimique : (CH4, O2, CO, CO2, H2, C2H4, C2H6, C3H8, N2, OH, NO).

Les fluctuations turbulentes des réactants et la température sont décrites en utilisant le PDF présumé. Les taux de réaction sont obtenus par l’intégration de PDF présumé. Ce modèle a l’avantage de prendre en considération l’influence des tour- billons sur les taux de réaction. Pour la combustion non pré-mélangée, le carburant et l’air sont injectés séparément dans la chambre de combustion. Il est supposé que le temps nécessaire pour la convection et la diffusion est beaucoup plus grand pour celui de la réaction, de ce fait, le processus réactionnel est principalement déterminé par le processus de mélange turbulent.

Pour cette situation, un scalaire f nommé fraction de mélange, est utilisé pour décrire le processus de mélange. Pour cela, au lieu de résoudre l’équation de transport, une équation pour le facteur de mélange est résolue :

(III.22)

La fraction de mélange f peut aussi s’écrire en termes de fraction massique, comme :

(III.22)

Avec : est la mass fraction de l’élément et signifient l’entrée de carburant et l’entrée d’air respectivement.

La relation entre la composition des réactifs présents la chambre de combustion et celle des produits formés à l'issue de la combustion stœchiométrique dans le cas générale est :

(III.21)

La richesse du mélange réactif est définie par le paramètre correspondant au rapport massique carburant-air réel relatif au rapport stœchiométrique, et cette équation est comme suit :

(III.22)

Ou et désignent respectivement les fractions massiques du fuel (CH4) ct de l'oxydant

L’indice st réfère d l’état stœchiométrique （1）．

La valeur de ϕ classifie le mélange réactif en trois catégories majeures

* >1 : Mélange riche.
* =1 : Mélange stœchiométrique.
* <I : Mélange pauvre.

## Modélisation de la turbulence :

1. **Simulation Numérique Directe (DNS) :**

La DNS résout numériquement les équations de Navier-Stokes sans recourir à des modèles de turbulence, capturant ainsi toutes les échelles spatiales et temporelles du flux turbulent, des plus grandes structures énergétiques aux plus petites échelles dissipatives (échelles de Kolmogorov). Cette méthode offre une représentation détaillée et précise des phénomènes turbulents, mais elle est extrêmement coûteuse en termes de ressources computationnelles, limitant son application aux cas fondamentaux ou aux faibles nombres de Reynolds. [1]

1. **Simulation des Grandes Échelles (LES) :**

La LES se concentre sur la résolution explicite des grandes structures turbulentes, qui contiennent la majeure partie de l'énergie cinétique, tout en modélisant les petites échelles plus universelles à l'aide de modèles de sous-grille. Cette approche offre un compromis entre précision et coût computationnel, la rendant adaptée à de nombreuses applications industrielles.

Cependant, dans les écoulements réactifs, les réactions chimiques se produisent souvent à des échelles fines, remettant en question l'universalité des petites échelles et la validité des modèles de sous-grille dans ces contextes. [2]

1. **RANS :**

Les modèles RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) sont largement utilisés depuis plusieurs décennies dans les simulations industrielles d'écoulements turbulents. Parmi eux, les modèles à deux équations, tels que le modèle k-ε développé initialement par Harlow et Nakayama en 1968, puis affiné par Launder et Spalding en 1974, ont acquis une grande popularité en raison de leur robustesse et de leur précision raisonnable dans une variété de situations d’écoulement.

Le modèle k-ε repose sur la résolution de deux équations de transport : l'une pour l'énergie cinétique turbulente (k) et l'autre pour le taux de dissipation de cette énergie (ε). Cette approche permet de modéliser efficacement les effets de la turbulence sur l'écoulement moyen, tout en maintenant un coût computationnel modéré. Bien que des modèles plus complexes existent, le modèle k-ε a démontré sa capacité à fournir des résultats fiables dans de nombreuses applications industrielles, ce qui explique sa large adoption. [3]

## Modèle k-epsilon Standard (à deux équations) :

Le modèle de turbulence k-epsilon, également connu sous le nom de modèle k-epsilon ou simplement k-epsilon, est l’un des modèles de turbulence les plus largement utilisés dans la modélisation des écoulements turbulents en mécanique des fluides. Ce modèle est basé sur la résolution de deux équations de transport pour les grandeurs turbulentes k (énergie cinétique turbulente) et epsilon (taux de dissipation de l’énergie turbulente). K (énergie cinétique turbulente) : Il représente l’énergie par unité de masse associée aux fluctuations de vitesse turbulente. Plus la valeur de k est grande, plus l’agitation turbulente est intense. Epsilon (taux de dissipation de l’énergie turbulente) : Il représente la vitesse à laquelle l’énergie cinétique turbulente est dissipée en raison des effets visqueux. L’énergie cinétique turbulente est dissipée en raison des effets visqueux. Une valeur élevée d’epsilon indique une forte dissipation d’énergie turbulente.

* L’équation de transport pour l’énergie cinétique turbulente (k) :

(III.10)

Avec :

* : est la masse volumique du fluide.
* : le temps.
* :est la composante i-ième de la vitesse.
* : sont les coordonnées spatiales.
* : est la viscosité dynamique du fluide.
* : est la viscosité turbulente.
* : est un constant modèle.
* : est la production d’énergie turbulente.
* : est la dissipation turbulente.
* L’équation de transport pour la dissipation turbulente (ϵ) :

(III.11)

et sont des constants modèles.

Dans les équations (III.11) et (III.10), μt est la viscosité turbulente, qui est généralement calculée à l’aide d’une relation constitutive comme la loi de Boussinesq :

(III.12)

Où est un constant modèle.

## Conclusion :

La formulation mathématique de la turbulence constitue une étape fondamentale pour la compréhension et la prédiction des écoulements instationnaires et chaotiques rencontrés dans de nombreux systèmes physiques et industriels. En s’appuyant sur les équations de Navier-Stokes, enrichies par des modèles adaptés, il est possible de traduire les phénomènes turbulents en un cadre mathématique rigoureux. Ce chapitre a permis de poser les bases nécessaires à une modélisation cohérente de la turbulence, en mettant en évidence les hypothèses, limites et choix méthodologiques associés à chaque approche. La suite du travail portera sur l'application de ces modèles à des cas concrets, en évaluant leur pertinence et leur capacité à reproduire fidèlement les caractéristiques des écoulements réels.

**Chapitre IV**

# Procédures numériques



## Présentation d’ANSYS Fluent

ANSYS est une référence mondiale dans le domaine des logiciels de simulation numérique, notamment en éléments finis (FEM) et en dynamique des fluides (CFD). Ces solutions permettent aux ingénieurs et scientifiques de simuler, dans un environnement virtuel, le comportement de produits, procédés ou systèmes, ce qui limite le recours à des prototypes physiques souvent coûteux et chronophages. ANSYS couvre un large éventail d’applications allant de la mécanique des structures à l’électromagnétisme, en passant par la thermique et la dynamique des fluides.

**ANSYS Fluent** est un module avancé de simulation numérique spécialisé dans la mécanique des fluides (CFD – Computational Fluid Dynamics). Il permet de modéliser divers phénomènes physiques tels que les écoulements laminaires ou turbulents, les transferts de chaleur, les écoulements multiphasiques, et les réactions chimiques. Ce logiciel est largement utilisé dans des domaines variés tels que l’aéronautique, l’automobile, l’énergie et le génie thermique pour analyser et optimiser les performances des systèmes fluidiques ANSYS Fluent [10] s’intègre dans un environnement graphique appelé **ANSYS Workbench**, qui permet une gestion centralisée et automatisée du processus de simulation. Workbench fonctionne comme une plateforme de gestion de projet basée sur un enchaînement logique d'étapes sous forme de blocs interconnectés. Ces blocs représentent les différentes phases du processus de simulation numérique, à savoir :

1. **La géométrie,** où le modèle physique est créé ou importé ;
2. **Le maillage**, qui consiste à discrétiser la géométrie pour les calculs numériques **;**
3. **La simulation**, où les équations physiques sont résolues à l’aide de solveurs (comme Fluent pour les écoulements) ;
4. **CFD-POST,** où les résultats sont analysés et visualisés.

Lorsque l’on crée un projet Fluent à partir de la section **“Analysis Systems”** de WORKBENCH, une chaîne de calcul est automatiquement générée. Chaque modification apportée à une étape (comme un changement de géométrie ou de maillage) impose une mise à jour des étapes suivantes, assurant ainsi la cohérence et la fiabilité de l’ensemble du processus de simulation.

Ainsi, **ANSYS WORKBENCH**, couplé à **Fluent**, offre une plateforme intégrée, flexible et puissante pour mener à bien des analyses CFD précises et industrialisées, tout en permettant une automatisation et une traçabilité des différentes étapes du calcul.

|  |
| --- |
| Figure IV. 1: Le Workbench sur ANSYS. |

## Description du problème :

Dans ce contexte, un système de chaudière à circulation naturelle avec soufflage a été proposé et mis en œuvre. Ce dispositif est conçu pour produire une énergie thermique avec une température de sortie de 305 °C et une puissance de 81 tonnes/heure. Il fonctionne à partir de combustibles fossiles, notamment le fioul gaz et le gaz naturel.

Cette chaudière est principalement utilisée pour alimenter en vapeur à haute pression (42 kg/cm²g) la raffinerie d'Alger. Elle se compose notamment d’un compresseur, d’une chambre de combustion et de quatre brûleurs de type LSB.

Cependant, le fonctionnement du système peut engendrer des émissions polluantes, avec des signes visibles tels que le coke, ainsi que des émissions de monoxyde de carbone (CO) et d’oxydes d’azote (NOx), témoignant d’une combustion incomplète ou d’un mauvais réglage des brûleurs.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Figure IV. 2 : le coque dans la chambre de combustion.

La **chambre de combustion**, de **forme rectangulaire**, constitue un élément central de la chaudière. Elle est équipée de **quatre brûleurs de type LSB**, assurant une répartition homogène de la flamme et une combustion efficace du combustible. Elle comprend également une **entrée d’air**, permettant l’alimentation en comburant nécessaire à la réaction, ainsi qu’une **sortie de fumée** destinée à l’évacuation des gaz de combustion

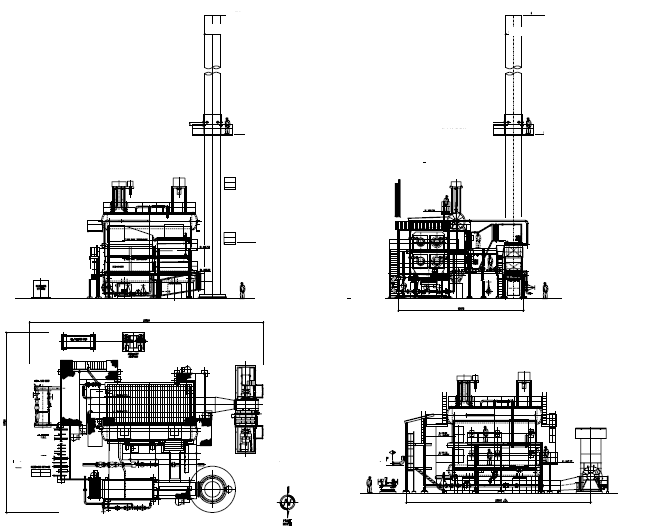


Figure IV. 3 : schéma fonctionnelle des chaudières A/B

## Géométrie et maillage :

### Géométrie :

Cette géométrie représente une demi-chambre de combustion, exploitant le principe de symétrie afin de simplifier la modélisation géométrique. À l’entrée de la chambre sont disposés deux brûleurs identiques de type LSB. Chaque brûleur est composé d’un swirler, dispositif chargé d’impartir un mouvement tourbillonnaire à l’écoulement air-carburant pour optimiser le mélange et la stabilité de la flamme, d’un injecteur primaire situé en position centrale assurant l’injection du combustible principal, ainsi que d’injecteurs secondaires répartis autour du centre, permettant l’introduction complémentaire d’air et de carburant. L’ensemble de ces éléments constitue la zone d’entrée du mélange réactif. À l’arrière de la chambre se trouve la sortie, par laquelle les gaz de combustion sont évacués après la réaction. On a fait une modification sur la géométrie pour trouver des résultats parfaits.

Les modifications sont :

* Cas A : cas référence
* Cas B**:** cas A avec un trou symétriquement répartis dans la zone de dilution
* Cas C : cas A avec deux trous horizontaux symétriquement répartis dans la zone de dilution
* Cas D : cas A avec deux trous verticaux symétriquement répartis dans la zone de dilution
* Cas E : cas A avec un trou symétriquement répartis dans la zone primaire
* Cas F **:** cas A avec deux trous horizontaux symétriquement répartis dans la zone primaire

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| **Cas A (Référence)** | | |
|  |  |  |
| **Cas B** | **Cas C** | **Cas D** |
|  |  |  |
| **Cas E** | **Cas F** | **Cas G** |

Figure IV. 4 : Les modification de la géométrie par rapport au cas A.

### Maillage :

La phase initiale du processus de simulation repose sur la création d’un maillage adapté à l’aide d**’ANSYS Meshing**, de manière à garantir à la fois la **stabilité numérique** et la **précision des résultats**. Le maillage employé est de type **tétraédrique 3D**, avec une **structure régulière** et un **raffinement ciblé** dans les régions présentant les bruleurs comme la figure suivante.

Le modèle numérique comporte environ **9 millions d’éléments** et **1,58 million de nœuds**, offrant ainsi une **discrétisation suffisamment fine** pour capturer avec précision les phénomènes physiques étudiés. Un soin particulier a été apporté à la **géométrie et à la régularité des éléments du maillage**, afin de garantir une **bonne stabilité numérique** et une **convergence fiable des calculs**. Cette configuration permet de trouver un **équilibre optimal entre la précision des résultats et le temps de calcul**, assurant ainsi l'efficacité de la simulation.

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
|  |  |

Figure IV. 5 : maillage de la chambre de combustion.

## Conditions aux limites :

Pour lancer la simulation relative à cette étude, nous avons utilisé des conditions aux limites réelles, fournies directement par le secteur industriel. Ces données reflètent les conditions de fonctionnement observées en pratique et ont permis d’assurer une modélisation plus représentative du système étudié.

Les composantes et les propriétés de fuel-gaz sont dans le tableau suivant :

|  |
| --- |
|  |
| Figure IV. 6 : Les composantes et les propriétés de fuel-gaz |

|  |  |
| --- | --- |
| Paramètres (unité) | Valeurs |
| T carburant (K) | 300 |
| T air (K) | 310 |
| ṁa (kg/s) | 38000 |
| ṁf (kg/s) | 5900 |

Tableau IV. 1: Conditions aux limites.

## Configuration des paramètres numériques

Dans le cadre de cette étude, les différentes simulations numériques ont été réalisées en adoptant les paramètres de configuration suivants :

• Le solveur utilisé est de type "pressure-based", avec un calcul en régime stationnaire. L’effet de la gravité est considéré comme négligeable. Le gaz est modélisé en tant que "fuel-gaz".

• La pression opérationnelle est fixée à 1.27 bar injecteur principal et 0.33 bar pour les 6 injecteurs secondaires, tandis que la pression de sortie correspond à la pression atmosphérique.

• Le traitement énergétique est non adiabatique, avec un état de relaxation correspondant à l’équilibre chimique.

• L’initialisation est effectuée selon la méthode "hybrid initialization".

* **Autres informations :**

Pour une simulation avec 1200 itérations, 4.3 heures de CPU sur 4 cœurs de traitement.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Continuité** | **Énergie** | **Quantité de mouvement** | **Turbulence** | **Espèces** |
| **10-3** | **10-6** | **10-5** | **10-5** | **10-4** |

Tableau IV. 2: Critères de convergence

**Chapitre V**

# Résultats et discussions



## INTRODUCTION :

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l’analyse des résultats issus de la simulation numérique tridimensionnelle de la chambre de combustion. L’étude a porté sur la combustion d’un mélange fioul-gaz/air, simulée à l’aide du logiciel **ANSYS Fluent,** version 19.2. La modélisation a été réalisée en régime permanent, en résolvant les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l’énergie ainsi que celles associées aux espèces chimiques et aux réactions de combustion.

Cette simulation a permis de reproduire avec précision le comportement interne de la chambre de combustion, en mettant en évidence les principaux phénomènes physiques impliqués. L’objectif est double : d’une part, valider le modèle numérique mis en œuvre, et d’autre part, analyser les performances thermiques et fluidiques de la configuration simulée. Les résultats obtenus serviront de base à une discussion critique portant sur les caractéristiques du champ de température, la dynamique de la flamme et les éventuelles zones de recirculation.

## Effet de la modification de la geométrie sur le comportement de la flamme

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Cas | Plan logitudinal | Plan outlet | Echelle |
| A |  |  |  |
| B |  |  |
| C |  |  |
| D |  |  |
| E |  |  |
| F |  |  |
| G |  |  |

Tableau V. 1 : Distribution de la température sur le plan longitudinal et plan de sortie de la chambre de combustion.

Figure 1 : Distribution de la température sur le plan longitudinal et plan de sortie de la chambre de combustion.

**La** **Figure V.1** montre la distribution de la température dans la chambre de combustion pour chaque cas de A à G, sur le plan longitudinal et sur le plan de sortie. Cela permet de voir comment l’ajout de trous d’air influence la répartition de la chaleur dans la chambre. On remarque que lorsque les trous sont ajoutés dans la zone de dilution dans les cas B, C et D. La température à la sortie a diminué par rapport au cas de référence (cas A). Cela est probablement dû à la dilution des gaz brulés par injection d’air. En outre, lorsque les trous sont ajoutés dans la zone primaire dans les cas E, F et G. On remarque que la température à l’intérieur de la chambre de combustion s’est diminuée et la distribution de la température à la sortie est améliorée. Le placement des trous dans la zone primaire augmente la durée de résidence des gaz brulés dilué avec de l’air dans la chambre. Par conséquent, le transfert de chaleur entre les gaz frais et les gaz brulés s’est amélioré.

**La figure V.2** montre la distribution de la fraction massique de OH (radical hydroxyle) dans la chambre de combustion, sur les plans longitudinaux et de sortie. Le radical OH est un bon indicateur de la zone active de la flamme, puisqu’il se forme essentiellement dans les régions où la combustion est intense. Pour le cas de référence (A), la fraction massique de OH est importante et bien répartie tout au long de la chambre, ce qui indique une flamme stable. Lorsque des trous d’air sont ajoutés dans la chambre de combustion pour les autres cas, la distribution de OH est fortement influencée. Si l’on compare les cas B, C et D (avec des trous dans la zone de dilution) aux cas E, F et G (avec des trous dans la zone primaire), on observe que la concentration en OH est plus élevée et mieux centrée dans les cas où les trous sont situés dans la zone primaire. Par exemple, dans le cas B, la flamme semble plus séparée, et la fraction de OH est réduite au centre, tandis que dans le cas E, la zone de flamme est plus intense dès l’entrée, avec une répartition plus localisée et concentrée du OH. Cela s’explique par le fait que l’injection d’air en zone primaire améliore le prémélange air-combustible, favorisant la stabilisation de la flamme. En revanche, l’apport d’air en zone de dilution entraîne une dispersion des gaz réactifs et une extension de la flamme.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| CAS | **Plan Longitudinal** | **Plan outlet** | **Echelle** |
| A |  |  |  |
| B |  |  |
| C |  |  |
| D |  |  |
| E |  |  |
| F |  |  |
| G |  |  |

Tableau V. 2: Distribution de la fraction molaire de OH sur le plan longitudinal et plan de sortie de la chambre de combustion.

|  |  |
| --- | --- |
| **Cas** | **Lignes de courant** |
| **A** |  |
| **B** |  |
| **E** |  |
|  | |

Tableau V. 3: Lignes de courant dans la cambre à combustion.

La **Figure V.3** présente les lignes de courant obtenues dans la chambre de combustion pour trois cas : **A, B** et **E**. Ces lignes traduisent visuellement le comportement de l’écoulement de l’air et des gaz brûlés, ce qui permet d’analyser les effets des modifications géométriques (ajout de trous dans les zones de combustion) sur la dynamique interne de la chambre.

* Pour le **cas de référence A,** les lignes de courant montrent un écoulement relativement linéaire, centré principalement dans l’axe longitudinal. L’absence de trous supplémentaires dans la chambre entraîne un faible taux de recirculation, ce qui limite le mélange air-combustible et la stabilisation de la flamme. Cela peut expliquer la forte concentration en CO liée à une combustion incomplète.
* Dans le **cas B**, où un trou est introduit symétriquement dans la zone de dilution, on observe une modification significative des lignes de courant. Un meilleur mélange est perceptible dans la partie avale de la chambre, avec des structures tourbillonnaires colorées en vert et bleu, témoignant d’une recirculation plus intense. Ce phénomène favorise une combustion plus complète, réduisant les émissions de CO et augmentant celles de CO₂.
* Pour le **cas E**, où le trou est placé dans la **zone primaire**, les lignes de courant indiquent une recirculation encore plus importante dès l’amont de la chambre. Les jets secondaires interagissent avec le flux principal, allongeant le temps de séjour des gaz dans la chambre et améliorant le processus de mélange. Ce renforcement de la recirculation primaire intensifie l’oxydation du CO en CO₂, ce qui se traduit par une baisse encore plus marquée du CO.

Ainsi, les lignes de courant illustrent clairement le rôle critique de la position des trous d'air sur la structure de l’écoulement. Leur présence dans la zone primaire engendre un effet plus bénéfique sur la dynamique des gaz, favorisant une meilleure combustion et une réduction significative des polluants primaires.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Cas | T max | T moy | T min | PF |
| A | 2312,24 | 2170,4 | 300 | 0,07583405 |
| B | 2312,81 | 1726,56 | 300 | 0,41095362 |
| C | 2311,49 | 1643,91 | 300 | 0,49674457 |
| D | 2311,57 | 1618,25 | 300 | 0,52593969 |
| E | 2300,33 | 1735,2 | 300 | 0,39376394 |
| F | 2310,79 | 1709,95 | 300 | 0,42614277 |
| G | 2296,82 | 1678,27 | 300 | 0,44878725 |

Tableau V. 4: Résultats des températures et le facteur de forme pour l’étude de la simulation numérique



**Figure V.4** : Températures et les facteurs de forme dans chaque cas de la chambre de combustion

**Figure V.4** montre les valeurs de température (Tmax, Tmoy, Tmin) et le facteur de forme (PF) pour les différents cas étudiés dans la chambre de combustion.

Pour le **cas de référence A,** la température maximale est élevée (2312 K), avec une température moyenne de 2170 K. Cependant, le **facteur de forme (PF)** est très faible (0,075), ce qui indique une bonne homogénéité de la température dans la chambre. Toutefois, la valeur de la température est très importante qui favorise la production de NO et risque de ne pas satisfaire la résistance thermique des aubes de la turbine.

Lorsque des **trous d’air ont été ajoutés** à la chambre de combustion dans les autres cas, la température moyenne a diminué, mais le **facteur de forme a augmenté**. Cela signifie que la chaleur est mieux répartie à la sortie de la chambre, ce qui améliore l’efficacité de la combustion.

## Effet de la modification de la géométrie sur les émissions polluantes NO et CO



**Figure V.5** : Les émissions de CO et Nox dans la chambre de combustion pour chaque cas.

La figure V.5 montre les émissions de CO et Nox dans la chambre de combustion pour chaque cas. Les valeurs de CO et NO produites dans la chambre de combustion. Pour le cas de référence (A), les émissions de CO représentent une quantité très importante, autour de 11475 ppm, tandis que celles de NO atteignent environ 229 ppm. Cela indique une combustion incomplète et une température élevée favorisant la formation de polluants.

Lorsque des trous d’air ont été ajoutés à la chambre de combustion pour les autres cas, la production de CO et de NO a diminué de manière significative. Si l’on compare les cas C, D et E (où les trous sont placés dans la zone de dilution) avec les cas E, F et G (où les trous sont placés dans la zone primaire), on remarque que la quantité de CO diminue davantage et le NOx est également réduit dans les cas où les trous sont en zone primaire.

Par exemple, dans le cas C, lorsque les deux trous sont placés dans la zone de dilution, la production de CO et NO est respectivement de 4150 ppm et 149 ppm. Par ailleurs, lorsque les mêmes trous sont déplacés vers la zone primaire comme dans le cas F, les émissions de CO et NO sont diminué jusqu’à 2000 ppm et 75 ppm respectivement. Cela peut être expliqué par le fait que les trous d’air en zone primaire permettent un meilleur mélange entre l’air et le combustible dès le début de la combustion. Ce bon mélange améliore la combustion complète, ce qui réduit la quantité de monoxyde de carbone (CO), tout en évitant les pics de température élevés qui favorisent la formation de NO. Ainsi, les deux polluants sont réduits efficacement.

## Effet de la modification de la géométrie sur la transformation de CO en CO2

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Figure V.6 :**Valeurs de CO et CO2 produites dans la chambre de combustion pour plusieurs cas. |  |

La figure V.6 montre les valeurs de CO et CO2 produites dans la chambre de combustion. Pour le cas de référence (A), les émissions CO représente une quantité importante autour de 11500 ppm. Lorsque les trous d’air ont été ajoutés à la chambre de combustion pour les autres cas, la production de CO est diminuée ainsi. Si on compare les cas C, D et E (là où les trous sont placés dans la zone de dilution) avec les Cas E, F et G (là où les trous sont placés dans la zone primaire), on remarque que la quantité de CO diminue et la quantité de CO2 augmente. Par exemple, dans le cas B, lorsque le trou est placé dans la zone de dilution, la production de CO et CO2 sont respectivement 3135 ppm et 69158 ppm. Par ailleurs, lorsque le trou est déplacé vers la zone primaire tel que le cas E, la production de CO et CO2 devient 1343 ppm et 70450 ppm respectivement. Le même phénomène se produit pour les autres cas. Cela peut être expliqué par la cinétique chimique entre l’air et les gaz brulés.

Lorsque les trous d’air sont placés dans la zone primaire, cela non seulement améliore la dilution des gaz brulés, mais augmente leur temps de séjour dans la chambre. De ce fait, grâce à l’oxygène qui se trouve dans l’air, le monoxyde de carbone (CO) se transforme en dioxyde de carbone (CO2), et par conséquent, le CO diminue et le CO2 augmente.

## Conclusion :

Les résultats de simulation ont montré que l’ajout des trous dans la chambre de combustion améliore l’efficacité de la combustion en terme répartition de la température de la flamme et réduction des polluants. Le résultat le plus intéressant est lorsque les trous sont injectés dans la zone primaire, cela non seulement prolonge la durée de résidence des gaz brulés et améliore le transfert thermique ce qui réduit la production de NO. Mais aussi, multiplie les réactions chimiques entre le CO et O2 afin de produire plus de CO2 et réduire le monoxyde de carbone.

**Conclusion Générale**

Ce mémoire de projet de fin d'études a abordé une problématique cruciale dans le contexte actuel de transition énergétique et de défis environnementaux : l'optimisation des systèmes de combustion pour une meilleure efficacité et une réduction des émissions polluantes. À travers une approche rigoureuse et une méthodologie détaillée, nous avons exploré les mécanismes complexes de la combustion turbulente et l'impact des modifications géométriques sur les performances des brûleurs industriels.

Les travaux menés ont permis de mettre en lumière l'importance de la dynamique des fluides numérique (CFD) comme outil puissant pour la simulation et l'analyse des phénomènes de combustion. Les résultats obtenus, qu'il s'agisse de la distribution des températures, du comportement de la flamme ou des niveaux d'émissions de NOx et de CO, ont confirmé l'efficacité des stratégies d'optimisation envisagées. Nous avons démontré que des ajustements ciblés de la géométrie des brûleurs peuvent significativement améliorer la qualité de la combustion et réduire l'empreinte environnementale des installations industrielles.

Au-delà des résultats spécifiques à l'étude de cas présentée, ce projet a renforcé notre compréhension des interactions complexes entre la conception des brûleurs, les propriétés des combustibles et les caractéristiques des écoulements. Il a également souligné la nécessité d'une approche intégrée, combinant modélisation numérique et données expérimentales, pour développer des solutions énergétiques durables et performantes.

En perspective, plusieurs pistes de recherche pourraient prolonger ce travail. L'intégration de modèles de combustion plus avancés, l'étude de l'impact de différents mélanges de combustibles (notamment avec des proportions plus élevées d'hydrogène ou d'autres gaz renouvelables), ou encore l'analyse de l'influence des conditions opératoires transitoires, constitueraient des développements pertinents. L'application de ces méthodologies à d'autres types de brûleurs ou à des configurations industrielles variées permettrait également d'élargir la portée de cette étude et de contribuer davantage à l'ingénierie de la combustion de demain.

En somme, ce projet de fin d'études représente une contribution modeste mais significative à la recherche d'une combustion plus propre et plus efficace, essentielle pour répondre aux impératifs énergétiques et environnementaux de notre époque. Il ouvre la voie à de futures investigations et à des applications concrètes dans le domaine de l'ingénierie thermique et environnementale.

Références :

[10] Manual, U. (2009). ANSYS FLUENT 12.0. *Theory Guide*, *67*.