

Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم المهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Thème

Etude de la combustion de GPL

Présenté par :

- ❖ BENKABOUCHE Abdeldjalil
- ❖ BENAIED Ahmed

Soutenu le 13 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Président	Dr FLITTI Abdelmadjid	Université de Mostaganem UMB
Examineur	Dr GUERMAT Abdelkader	Université de Mostaganem UMB
Encadreur	Dr KHALDI Abdelaziz	Université de Mostaganem UMB

Année Universitaire : 2021 / 2022



Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir donné le courage de terminer ce modeste travail.

Nous tenons remercier La famille Benkabouche Et Benaied, pour le soutien continu qu'elle nous a apporté tout aux longs de ces années d'études.

Nous aimerions profiter de cette occasion pour remercier notre guide de mémoire, Dr Abdelaziz Khaldi, pour son inspiration et sa direction continue tout au long de notre travail

Nous adressons notre profonde gratitude à nos enseignants de du département de génie mécanique pour les efforts qui ont déployé avec leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils

Nous aimerions également remercier le Dr FLITTI Abdelmadjid d'avoir présidé notre jury.

Nous adressons nos remerciements au Dr GUERMAT Abdelkader D'avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

A notre Ami tout particulièrement Tarek, Karim, Oussama, Abdelilleh, Chaouki, Abderrahmane

On n'oublierait pas non plus tous ceux qui, de près ou de loin, par leur compétence, leur aide technique et leurs conseils ont contribué à la réalisation de ce travail tout particulièrement Khadoudja et Naila

Ce projet de fin d'études représente le fruit de leur soutien et de leurs encouragements tout au long de nos études,

Résumé

L'objectif de cette recherche est d'étudier les propriétés du gaz de pétrole liquéfié et d'étudier son processus de combustion et son effet sur la nature, et pour cela nous devons faire un tour d'horizon de la combustion.

Et pour réaliser cette étude, nous avons suivi le processus de combustion en changeant à chaque fois la proportion d'air.

Les résultats de cette étude ont montré que plus le pourcentage d'air dans le processus de combustion n'est élevé, plus les valeurs de V_{FH} , V_{FS} , γV_{N_2} sont élevées et plus les valeurs de T_{ad} , γV_{CO_2} ce diminuent.

Nous concluons des résultats précédents que le GPL est un carburant idéal et respectueux de l'environnement car lors de sa combustion, il ne laisse pas de gaz d'échappement tels que le monoxyde de carbone qui polluent l'environnement et ne laisse pas de cendres résultant de la combustion.

Mots Clés: Gaz pétrole liquéfié, GPL, combustion, hydrocarbure

Abstract

The objective of this research is to study the properties of liquefied petroleum gas and to study its combustion process and its effect on nature, and for this we need to make a tour of the combustion. And to carry out this study, we followed the combustion process by changing the proportion of air each time.

The results of this study showed that the higher the percentage of air in the combustion process, the higher the values of V_{FH} , V_{FS} , γV_{N_2} and the lower the values of T_{ad} , γV_{CO_2} .

We conclude from the above results that LPG is an ideal and environmentally friendly fuel because during its combustion it does not leave exhaust gases such as carbon monoxide that pollute the environment and does not leave ash resulting from combustion.

Keywords: Liquefied petroleum gas, LPG, combustion, hydrocarbon

ملخص

الهدف من هذا البحث هو دراسة خصائص الغاز البترولي المسال ودراسة عملية الاحتراق وتأثيرها على الطبيعة، وللقيام بذلك يتعين علينا إجراء لمحة عامة عن الاحتراق.

ولإجراء هذه الدراسة، تابعنا عملية الاحتراق عن طريق تغيير نسبة الهواء في كل مرة.

أظهرت نتائج هذه الدراسة أنه كلما زادت نسبة الهواء في عملية الاحتراق، زادت قيم V_{FH} و V_{FS} و γV_{N_2} ، وانخفضت قيم T_{ad} ، انخفضت نسبة ثاني أكسيد الكربون.

نستنتج من النتائج السابقة أن غاز البترول المسال هو وقود مثالي ويحترم البيئة لأنه أثناء احتراقه، لا يترك غازات العادم مثل أول أكسيد الكربون التي تلوث البيئة ولا تترك الرماد نتيجة الاحتراق.

الكلمات المفتاحية: غاز البترول المسال، الاحتراق، الهيدروكربون

Sommaire

Remerciement	ii
Résumé	iii
Sommaire	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des Symboles	viii
Introduction générale	1
Chapitre I : Recherche Bibliographique sur le GPL	
I.1 Introduction	3
I.2 Etude bibliographiques.....	3
I.3 Généralité sur le GPL	5
I.3.1. Définition	5
I.3.2 Caractéristique du GPL.....	6
I.3.3 Origine du GPL	7
I.3. Composition chimique.....	7
Chapitre II : Rappel sur la combustion	
II.1 Introduction	9
II.2 Définition	9
II.3 Combustibles	9
II.4 Le comburant	10
II.5 Types de combustion.....	10
II.6 les lois de la combustion	10
II.6.1 Le pouvoir comburivore	10

II.6.2 Pouvoir fumigène sec	10
II.6.3 Pouvoir fumigène humide	11
II.6.4 La combustion en excès d'air	12
II.6.5 Calcul des teneurs en CO_2 et N_2 connaissant l'excès d'air	12
II.6.6 Température de flamme adiabatique	12
 Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1 Introduction	15
III.2 Les calculs	15
III.2.1 Calcul des volumes.....	15
III.2.2 Calcul du pouvoir comburivore théorique.....	16
III.2.3 Calcul du pouvoir fumigène sec théorique.....	16
III.2.4 Calcul du pouvoir fumigène humide théorique.....	16
III.2.5 Calcul du teneur de CO_2 et N_2	16
III.2.6 Calcul du pouvoir comburivore réel.....	16
III.2.7 Calcul du pouvoir fumigène sec réel.....	16
III.2.8 Calcul du pouvoir fumigène humide réel.....	16
III.2.9 Calcul du teneur de CO_2 et N_2 en présence d'excès d'air.....	16
III.2.10 Calcul de la température de la flamme adiabatique	20
Conclusion générale.....	27
Références	28

Liste de figures

Figure III.1 : l'influence de l'excès d'air sur le pouvoir comburivore	17
Figure III. 2 : l'influence de l'excès d'air sur le pouvoir fumigène humide.....	18
Figure III. 3 : l'influence de l'excès d'air sur le pouvoir fumigène sec	19
Figure III. 4 : Influence de l'excès d'air sur la teneur en dioxyde de carbone.....	19
Figure III. 5 : l'influence de l'excès d'air sur la teneur en azote.....	20
Figure III. 6 : l'influence de l'excès d'air sur la température de la flamme adiabatique	26

Liste des tableaux

<i>Tableau III.1</i> : calculs de pourcentage	17
<i>Tableau III.2</i> : le pouvoir comburivore en fonction de l'excès d'air.....	17
<i>Tableau III.3</i> : le pouvoir fumigène humide réel en fonction de l'excès d'air.....	18
<i>Tableau III.4</i> : le pouvoir fumigène sec réel en fonction de l'excès d'air.....	19
<i>Tableau III. 5</i> : le teneur de dioxyde de carbone en fonction de l'excès d'air.....	19
<i>Tableau III.6</i> : le teneur de d'azote en fonction de l'excès d'air.....	20
<i>Tableau III.7</i> :Les valeurs des enthalpies.....	21
<i>Tableau III.8</i> : la temperature de flamme adiabatique.....	26

Liste des symboles

e : L'excès d'air (%)

H_{prod} : L'enthalpie des produits (kJ)

$H_{réact}$: L'enthalpie des réactifs (kJ)

Q : La quantité de chaleur (kJ)

T : La température (K)

T_{ad} : La température de flamme adiabatique (K)

V_a : Pouvoir comburivore théorique (Nm^3/Nm^3) (pour brûler 1 Nm^3 de combustible, besoin de x Nm^3 de V_a .)

V_{FS} : Pouvoir fumigène sec théorique (Nm^3/Nm^3)

V_{FH} : Pouvoir fumigène humide théorique (Nm^3/Nm^3)

$V'a$: Pouvoir comburivore réel (Nm^3/Nm^3)

V'_{FS} : Pouvoir fumigène sec réel (Nm^3/Nm^3)

V'_{FH} : Pouvoir fumigène humide réel (Nm^3/Nm^3)

V_{CO_2} : Volume de dioxyde de carbone (Nm^3/Nm^3) (Quand 1 Nm^3 de combustible brûler, il produit x Nm^3 de CO_2)

V_{SO_2} : Volume de dioxyde soufre (Nm^3/Nm^3)

V_{O_2} : Volume de l'oxygène (Nm^3/Nm^3)

V_{H_2O} : Volume d'eau (Nm^3/Nm^3)

V_{N_2} : Volume de d'azote (Nm^3/Nm^3)

V_W : Volume de l'humidité (Nm^3/Nm^3)

W : Le travail (kJ)

γV_{CO_2} : Teneur de dioxyde de carbone (%)

γV_{N_2} : Teneur d'azote (%)

λ : Le facteur d'air

Ψ : La quantité d'oxygène dans le comburant (%)

Introduction Général

À travers le monde, des centaines de millions de personnes utilisent aujourd'hui les gaz de pétrole liquéfié, plus communément appelés GPL, et en dépendent pour de nombreux usages : dans l'industrie, les transports, l'agriculture, la production d'électricité, la cuisine, le chauffage et les loisirs. Mais peu savent en revanche comment les GPL sont produits, d'où ils viennent et qui sont les pays qui en consomment le plus [1].

Le gaz de pétrole liquéfié ou GPL est un mélange d'hydrocarbures légers stocké à l'état liquide et issu du raffinage du pétrole (40 % des ressources mondiales) et plus généralement du traitement du gaz naturel (60 % des ressources mondiales).

Le GPL est composé d'environ 40% de butane (C_4H_{10}) et 60% de propane (C_3H_8). C'est un carburant dit propre, issu du raffinage du pétrole brut. Son utilisation présente des avantages par rapport au gazole en permettant de réduire de :

- 50% les émissions d'oxyde d'azote,
- 50% celles des monoxydes de carbone,
- 90% celles des hydrocarbures et particules [2].

Puis on a la Combustion (Latin : combustio, burning) est une réaction chimique exothermique, en particulier l'oxydation d'un combustible, qui libère de l'énergie qui peuvent être utilisés à des fins diverses. Dans la réaction, qui est rapide, les radicaux sont impliqués. Combustion est une technologie omniprésente. Elle est utilisée en puissance la génération, le transport terrestre, maritime et aérien, propulsion, chauffage, traitement des matériaux et d'autres technologies. Cela se produit dans l'industrie . . . fours et chaudières d'essai, fonderies, fours, fours, incinérateurs, moteurs et poêles domestiques, en applications mobiles et stationnaires [3].

Avec cette étude, nous visons de faire une Etude de la combustion de GPL, Pour atteindre cet Objectif, nous avons divisé ce notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre présenté une recherche bibliographique sur Le GPL

Le deuxième chapitre nous avons abordés un rappel sur La combustion
Dans le troisième chapitre nous nous sommes intéressés essentiellement sur l'influence de l'excès d'air sur les différents paramètres de la combustion et pour la fin une conclusion générale qui résume les principaux résultats.



CHAPITRE I

*Recherche Bibliographique
sur le GPL*

I.1 Introduction :

L'un des objectifs du premier chapitre est d'apporter des connaissances sur le gaz de pétrole liquéfié (GPL) en décrivant sa composition, et ses propriétés. Nous abordons un ensemble d'articles bibliographiques dirigés vers des sujets liés à l'étude de la combustion de GPL

Le Gaz de pétrole liquéfié ou également connu sous le nom de GPL présente un mélange de gaz d'hydrocarbures utilisé comme carburant dans les appareils de chauffage et les véhicules. Il est appelé GPL parce qu'ils se liquéfient sous des pressions, et se vaporisent facilement lors de la libération de la pression atmosphérique.

I.2 Etude bibliographique :

Plusieurs auteurs ont étudié la combustion du gaz de pétrole liquéfié :

Dong Jian et al (24 septembre 2001), ils ont comparé les émissions des polluants lors de la combustion entre un mélange de carburant diesel-GPL et carburant diesel net.

En général, les émissions de NO_x étaient légèrement réduites lorsque le carburant diesel-GPL était utilisé par rapport au carburant diesel net. Les émissions d'hydrocarbures, cependant, étaient assez élevées en mode diesel-GPL, en particulier à charges partielles avec une teneur en GPL plus élevée. Les émissions de monoxyde de carbone (CO) ont également augmenté à des charges partielles avec une teneur plus élevée en GPL, même si les émissions de CO du moteur diesel-GPL n'ont pas augmenté à pleine charge [4].

Zhu Dongbin et al (20 novembre 2007), ils ont étudié les effets sur la combustion du gaz de pétrole liquéfié (GPL) dans une chambre de combustion en céramique poreuse dopée aux éléments de terres rares (PCR) par l'analyse des fumées et le test d'ébullition de l'eau (WBT). Les résultats ont montré que l'application de la PCR a entraîné le changement de couleur de la flamme du rouge au bleu, l'amélioration de la consommation de carburant de 4,5 % et la diminution de la concentration de CO et O₂ dans les gaz d'échappement de 40,9 % et 12,8 %, respectivement. Cependant, la température à l'intérieur de la cheminée a augmenté de 2,2 % [5].

Veziir Ayhan and al, (mars 2011) Cette étude examine les effets de l'injection de GPL pendant la période d'entrée d'air sur les émissions et les caractéristiques de rendement. Le moteur a été modifié pour déterminer la meilleure composition de GPL pour un double fonctionnement afin d'améliorer la qualité des émissions tout en maintenant un rendement

thermique élevé par rapport à un moteur diesel classique. Un système d'injection de GPL à commande électronique a été développé à cet effet. Le taux d'injection de GPL était de 5, 10, 15 et 25 % sur une base de masse. Les taux d'injection optimaux se situent à 5 % de GPL en termes d'émissions d'échappement et de performance. À ce taux d'injection, les émissions de SFC, de NO_x et de fumée ont diminué de 9, 27,6 et 20 % à la vitesse d'essai de 1600 tr/min, respectivement [6].

Guoxiang Lu, LifuLi, (Septembre 2011), Afin d'améliorer la performance énergétique du moteur à gaz de pétrole liquéfié, les paramètres de combustion du moteur à gaz de pétrole liquéfié sont étudiés et les relations entre l'énergie chimique, l'énergie mécanique et l'énergie thermique pendant le processus de combustion du moteur à gaz de pétrole liquéfié sont analysées. L'étude démontre que le modèle de combustion peut refléter les relations de variation entre la pression et la température du mélange gazeux brûlé et l'angle du vilebrequin pendant le processus de combustion du moteur à gaz de pétrole liquéfié [7].

Snehasish Panigrahy et al (2016), cet article traite par l'analyse numérique et expérimentale la combustion du GPL dans un four domestique. La zone de combustion est constituée d'une matrice SiC à 90 % de porosité et la zone de préchauffage est constituée de boules d'alumine d'un diamètre de 3,0 mm.

Les résultats numériques de la distribution de la température, des limites d'inflammabilité et des émissions de polluants à différents rapports d'équivalence et charges de chaleur concordent bien avec les données expérimentales. Afin d'améliorer les performances thermiques du poêle, les effets de l'épaisseur du substrat SiC, de l'épaisseur du préchauffeur, de la conductivité en phase solide et de l'albédo de diffusion sur les émissions de CO et le flux radiant ont été étudiés. De plus, selon les directives de l'OMS, les brûleurs les plus efficaces sont recommandés en fonction des émissions minimales de CO₂ et de l'efficacité thermique maximale [8].

FrantišekSynáka et al, (Mai 2019), L'objectif de ce travail réside dans l'évaluation du GPL en tant que carburant alternatif. L'étude comprend la classification du GPL du point de vue économique et sécurité. Il évalue également le gaz de pétrole liquéfié comme carburant alternatif en termes de production d'émissions des polluants [9].

Libin P. Oommen & GN Kumar (19 mai 2020), Dans cette étude, l'EGR partiellement refroidi est appliqué à des taux variables (12 %, 18 %, 24 %) afin d'analyser les effets produits

sur les performances et les caractéristiques d'émission d'un moteur multicylindres alimenté par 100 % de GPL à quatre charges différentes. Dans des conditions et des vitesses de fonctionnement différentes. On peut observer que l'application d'un taux optimal d'EGR refroidi réduit les NOx émissions de manière drastique même si au détriment des émissions d'hydrocarbures. La consommation de carburant du moteur d'essai est réduite jusqu'à 12,28 % avec l'application d'un pourcentage de 18 % d'EGR partiellement refroidi. Cependant, l'émission d'oxydes d'azote a diminué de 7,8 % à 24 % de recirculation. L'analyse statistique de la combustion montre une diminution de la stabilité de la combustion avec une augmentation du débit de recirculation [10].

Ghufran Talib Hashem & Mohamed F. Al-Dawody (9 janvier 2022) cette recherche présente une étude expérimentale de l'efficacité du GPL au lieu du carburant à essence sur les caractéristiques des moteurs à allumage commandé. Les expériences ont été réalisées à des charges motrices différentes et à un régime de moteur variable de (2400 à 3600 tr/min). La consommation de carburant spécifique aux freins a augmenté de 5,42 % (par rapport à l'essence). Les émissions de concentration de CO et de CO₂ sont réduites de (11,54 %, 14,4 %) respectivement avec le GPL comparativement à l'essence, à l'exception de la concentration de NOx, qui augmente de (10,8 %) en raison de la pression et de la température plus élevées des bouteilles dans le cas du carburant GPL comparativement à l'essence [11].

I.3 Généralité sur le GPL :

I.3.1 Définition :

Le GPL est un mélange gazeux composé essentiellement de 40 % de butane et 60 % de propane à température ambiante et pression atmosphérique, et peut passer à l'état liquide sous les conditions suivantes :

- Pression relevée à la température ambiante.
- Pression atmosphérique et basse température.
- Pression modérée et température pas tellement basse.

Cette propriété lui permet d'être stocké dans un volume réduit (250 litres de GPL gazeux égale à un litre de GPL liquide).

La composition des GPL est variable selon les normes et ses utilisations dans différents pays. Il peut contenir ; le propylène, butène, une faible quantité de méthane, éthylène, pentane,

exceptionnellement des hydrocarbures tels que le butadiène, l'acétylène et le méthylacrylique [12].

I.3.2 Caractéristique du GPL :

- Densité : Dans l'état gazeux il est plus lourd que l'air : La densité du propane est de 0.51 et celle du butane est de 0.58.
- Dilatation : à l'état liquide, il a un coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors de leur stockage, car les sphères ne doivent jamais être remplies complètement.
- Tension de vapeur : Soumis à des températures supérieures à leur point d'ébullition, le propane et le butane ne peuvent être amenés à l'état liquide sous pression ou par réfrigération. Le GPL à une tension de vapeur à 20 °C égale à :
 - ✓ Pour le butane : 2 bars.
 - ✓ Pour le propane : 8 bars.
- Température d'ébullition : A la pression atmosphérique, la température d'ébullition du butane est de -0.6 °C et celle du propane est de -40 °C.
- Impuretés : Le GPL produit au niveau des différents champs doit répondre aux spécifications suivantes :
 - ✓ Teneur en gaz sec inférieure ou égale à 3 % mol.
 - ✓ Teneur en condensât inférieur ou égale à 0.4 % mol.
- Odeur et couleur : Le GPL est incolore, soit à l'état vapeur ou liquide et pratiquement inodore. Pour des raisons de sécurité un odorant doit être ajouté pour la détection des fuites. Cet odorant est à base de sulfures appelés Mercaptans.
- Toxicité : Le GPL s'enflamme dans l'air, il émet un gaz considéré comme toxique. Le gaz en question dénommé le monoxyde de carbone est formé suite à une combustion.
- Pouvoir calorifique supérieur : (kCal / Nm³)
 - PCS (ic₄) = 29460
 - PCS (c₃) = 22506
 - PCS (nc₄) = 29622.

I.3.3 Origine du GPL :

Le GPL est extrait à partir de diverses sources qui peuvent être [13] :

- De la récupération à partir de la liquéfaction des gaz associant (champs pétroliers).
Comme sous-produit à partir des unités de liquéfaction du gaz naturel GNL.
- Du pétrole brut après raffinage comme sous-produit.
- De la récupération à partir des champs gaziers.

I.3.4 Composition chimique :

Les molécules de propane et de butane sont formées respectivement de 3 et 4 atomes de carbone et de 8 et 10 atomes d'hydrogène. Ces atomes sont tous reliés par des liaisons simples (ou covalentes). Cela signifie que tous les atomes liés entre eux mettent en commun un électron de leurs couches externes afin de former des doublets d'électrons qui maintiennent l'attraction entre les atomes.

Le propane et le butane sont naturellement gazeux à pression atmosphérique (1 bar) et à température ambiante (15°C). Ils peuvent toutefois facilement être liquéfiés et sont alors qualifiés de GPL.

A titre de comparaison, le méthane (CH₄), principal composant du gaz naturel, se liquéfie sous haute pression (47 bars à - 82°C) ou à très basse température (1 bar à -161°C). Notons que le GPL carburant, mélange de propane et de butane, a également un point de liquéfaction différent de celui des deux gaz le constituant : il se situe à -25°C à pression atmosphérique [14].



CHAPITRE II

Rappel sur la combustion

II.1 Introduction

Comme évoqué au chapitre 1, il est important de connaître les propriétés de composition du GPL, car c'est sur la base de ce critère que l'on peut faire une étude sur la combustion de GPL.

Les questions que nous nous sommes posées étaient : C'est quoi la combustion et comment faite la combustion du GPL et pourquoi est-ce intéressant ?

Nous attirons votre attention sur le fait que le terme "combustion " regroupe plusieurs matières inflammables qui produisent de l'énergie calorifique suite à leur oxydation. La quantité de chaleur dégagée par la combustion est directement utilisée telle quelle dans les fours industriels et les chaudières. Transférée en travail (une forme d'énergie plus précieuse) pour l'utiliser dans l'industrie énergétique telle que dans les moteurs ou les réacteurs. On distingue deux types de combustibles en pratique, les combustibles organiques et les combustibles nucléaires. En général, un combustible naturel ou bien artificiel peut être sous forme liquide, gazeux ou solide.

II.2 Définition :

La combustion est une réaction chimique entre un corps combustible et un corps comburant. Cette manifestation, globalement exothermique, est un ensemble de phénomènes physicochimiques complexes, plus ou moins lents. Il en résulte une action dioxyde-réduction [15].

- Carburant (hydrocarbure) + oxygène \rightarrow dioxyde de carbone (CO₂) + eau (H₂O) + énergie thermique.

II.3 Combustibles

Les combustibles sont multiples (gaz, pétrole, bois, charbon, ...) mais ils ont un point commun : celui de contenir principalement des hydrocarbures, c'est-à-dire des combinaisons multiples de carbones et d'hydrogènes.

- Gaz : mélange d'hydrocarbures gazeux avec éventuellement de l'azote et/ou du dioxyde de carbone. Exemples : gaz naturels, butane et propane commerciaux, air propane, essence ...
- Liquide : mélange d'hydrocarbures liquides : diesel, fioul domestique, fiouls lourds, ... contenant des atomes de C, S, H, O, N ; alcools
- Solide : charbons, bois, ... (Idem)

II.4 Le comburant :

C'est un composé chimique, quand il est mis en présence d'un combustible il permet et entretient la combustion. Le comburant le plus rencontré est l'oxygène contenu dans l'air ; nous pouvons également retrouver le chlore [16].

II.5 Types de combustion :

Une réaction de combustion est principalement divisée en 3 types en fonction de la façon dont la réaction se produit et des produits formés. Ils sont [15] :

- Combustion rapide,
- Combustion spontanée
- Combustion explosive.

II.6 les lois de la combustion :**II.6.1 Le pouvoir comburivore :**

Une mole de dioxyde de carbone consomme une mole d'oxygène pour se former, tout comme le dioxyde de soufre. Pour l'eau, en revanche, il faut une demi mole d'oxygène. Par conséquent, la quantité d'oxygène requise est la somme de ces trois quantités. La quantité d'oxygène contenue dans le carburant doit être soustraite pour obtenir la quantité d'oxygène contenue dans le comburant. Diviser la quantité totale de comburant par Ψ la teneur en oxygène du comburant [17].

$$V_a = \frac{1}{\Psi} (V_{CO_2} + V_{SO_2} + \frac{V_{H_2O}}{2} - V_{O_2}) \dots \dots \dots \text{(II.1)}$$

$\Psi = 0,21$ pour l'air, entre 0,21 et 1 pour certaines applications industrielles à air suroxygéné et 1 pour l'oxygène.

II.6.2 Pouvoir fumigène sec :

On ajoute le volume des différents gaz contenus dans les fumées sauf la vapeur d'eau [4].

$$V_{FS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + (1 - \Psi) V_a \dots \dots \dots \text{(II.2)}$$

L'azote provient du combustible V_{N_2} et du comburant $(1 - \Psi) V_a$ qui est le volume d'azote résultant de la combustion neutre de la quantité d'air V_a

II.6.3 Pouvoir fumigène humide :

La vapeur d'eau provient de la combustion : V_{H_2O} et de l'humidité du carburant : V_H est le volume de la vapeur d'eau produite par l'humidité contenue dans le carburant.

$$V_{FH} = V_{FS} + V_{H_2O} + V_w \dots \dots \dots \text{(II.3)}$$

Pour le calcul des volumes V_{CO_2} , V_{SO_2} , V_{H_2O} , V_{O_2} , V_{N_2} et V_w il y a deux méthodes :

Pour les combustibles solides et liquides :

$$V_{CO_2} = C \times \frac{22.4}{12} \dots \dots \dots \text{(II.4)}$$

$$V_{SO_2} = s \times \frac{22.4}{32} \dots \dots \dots \text{(II.5)}$$

$$V_{H_2O} = h \times \frac{22.4}{2} \dots \dots \dots \text{(II.6)}$$

$$V_{O_2} = o \times \frac{22.4}{32} \dots \dots \dots \text{(II.7)}$$

$$V_{N_2} = n \times \frac{22.4}{28} \dots \dots \dots \text{(II.8)}$$

$$V_w = n \times \frac{22.4}{18} \dots \dots \dots \text{(II.9)}$$

Pour les combustibles gazeux le calcul des volumes se fait comme suit :

V_{CO_2} = la somme de (nombre des molécules de carbone que multiplie le pourcentage du gaz qui comporte le carbone sur cent) [Nm^3/Nm^3].

V_{SO_2} = la somme de (nombre des molécules de soufre que multiplie le pourcentage du gaz qui comporte le soufre sur cent) [Nm^3/Nm^3].

V_{H_2O} = la somme de (nombre des molécules de hydrogène sur deux que multiplie le pourcentage du gaz qui comporte l'hydrogène sur cent) [Nm^3/Nm^3].

V_{O_2} = la somme de (nombre des molécules de l'oxygène sur deux que multiplie le pourcentage du gaz qui comporte l'oxygène sur cent) [Nm^3/Nm^3].

V_{N_2} = la somme de (nombre des molécules de l'azote sur deux que multiplie le pourcentage du gaz qui comporte l'azote sur cent) [Nm^3/Nm^3].

II.6.4 La combustion en excès d'air :

L'oxygène est nécessaire pour assurer la totale oxydation du combustible mais dans la pratique il faudra assurer un mélange comportant une quantité d'air en excédant permettant à chaque molécule de combustible de réagir avec l'oxygène nécessaire à une combustion complète [18].

II.6.5 Calcul des teneurs en CO₂ et N₂ connaissant l'excès d'air :

Si la teneur en CO est inférieure à 1%, les teneurs sont très proches de celles de la combustion complète. D'après les définitions vues au début, le volume d'air réel est égal à :

$$V'a = \lambda Va = (1+e)Va \quad \dots\dots\dots \text{(II.10)}$$

Où λ est le facteur d'air et e l'excès d'air

Dans ce cas de combustion, le combustible brûlant complètement, le volume réel des fumées est égal au volume des fumées stœchiométrique plus celui de l'excès d'air donc le volume des fumées sèches s'écrit:

$$V'_{FS} = V_{FS} + e Va \quad \dots\dots\dots \text{(II.11)}$$

$$V'_{FH} = V'_{FS} + V_{H_2O} + V_W \quad \dots\dots\dots \text{(II.12)}$$

II.6.6 Température de flamme adiabatique :

Lorsque la combustion a lieu sans travail et sans variation d'énergie cinétique et potentielle, une partie de l'énergie chimique libérée est transmise aux produits de combustion et l'autre est perdue au profit du milieu extérieur. À mesure que les pertes de chaleur au profit du milieu extérieur diminuent, la température des produits de combustion augmente. À la limite, c'est-à-dire lorsque les pertes de chaleur au profit du milieu extérieur sont réduites à zéro ($Q = 0$), la température des produits atteint un sommet. Cette température est désignée sous le nom de température de flamme adiabatique.

Pour déterminer la température de flamme adiabatique d'une évolution de Combustion avec écoulement en régime permanent, on pose $Q = 0$ et $W = 0$ Dans l'équation **(II.13)**

$$Q - W = H_{prod1} - H_{réact} \quad (\text{II.13})$$

$$H_{prod1} = H_{réact} \quad (\text{II.14})$$

$$H_{prod} = \sum_i^n N_{pi} (\bar{h}_f^0 + \bar{h} + \bar{h}^0)_{pi} \quad (\text{II.15})$$

$$H_{réact} = \sum_i^n N_{ri} (\bar{h}_f^0 + \bar{h} + \bar{h}^0)_{ri} \quad (\text{II.16})$$

$$H_{prod} = \sum_i^n N_{pi} (\bar{h}_f^0 + \bar{h} + \bar{h}^0)_{pi} = H_{réact} = \sum_i^n N_{ri} (\bar{h}_f^0 + \bar{h} + \bar{h}^0)_{ri} \quad (\text{II.17})$$

Les réactifs et leur état sont habituellement connus, et le calcul de l'enthalpie $H_{réact}$ est immédiat. Il en va autrement pour le calcul de l'enthalpie H_{prod} . En effet, la température des produits de combustion est, à priori, inconnue. Un calcul itératif s'impose donc. Une première température des produits $T_{prod,1}$ est estimée, et H_{prod1} est calculé. Si $H_{prod1} \neq H_{réact}$, alors une deuxième température $T_{prod,2}$ est choisie et H_{prod2} est calculé. Si $H_{prod,2} \neq H_{réact}$, on interpole la température de flamme adiabatique $T_{prod,adia}$ simplement en posant $H_{prod,3} = H_{réact}$ [19].

A decorative graphic of a scroll with a blue outline and grey shading on the left and right sides, containing the chapter title.

CHAPITRE III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

La combustion stœchiométrique est la base des calculs théorique en combustion. Les analyses réalisées ou les résultats fournis d'une combustion réelle, d'un combustible de composition connue, vont permettre de la définir précisément, par comparaison avec les résultats de la combustion neutre. Ainsi, par rapport à la théorie, on pourra définir :

- La combustion en excès d'air
- La combustion en défaut d'air

En pratique, c'est l'analyse des fumées sur site qui donnera les renseignements techniques nécessaires à la définition de la combustion réelle.

On parlera de « combustion en excès d'air » chaque fois que l'on détectera la présence d'oxygène dans les produits de combustion. L'excès d'air peut résulter soit d'un réglage du volet d'air au niveau du brûleur (brûleur à air soufflé), soit d'une impossibilité à régler l'arrivée d'air (brûleur atmosphérique). Cette quantité supplémentaire, non utilisé dans la combustion complète de l'unité de combustible, se retrouvera inéluctablement dans les fumées.

L'air en excès impliquera :

- une augmentation des pertes par les fumées,
- une diminution du rendement de la chaudière.

Ainsi cette augmentation entraînera un accroissement des dépenses énergétiques sur une saison de chauffe (consommation de combustible plus importante), qui restent non négligeables même pour de petites puissances de chaudières.

III.2 Les calculs

III.2.1 Calcul des volumes

$$V_{CO_2} = 3 \times 0.4 + 4 \times 0.6 = 3.6 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{SO_2} = 0 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{N_2} = 0 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{H_2O} = \frac{8}{2} \times 0.4 + \frac{10}{2} \times 0.6 = 4.6 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{O_2} = 0 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

III.2.2 Calcul du pouvoir comburivore théorique

$e=0$ (cas stœchiométrique)

$$Va = \frac{1}{\Psi}(V_{CO_2} + V_{SO_2} + \frac{V_{H_2O}}{2} - V_{O_2})$$

$$Va = \frac{1}{0.21} (3.6 + 0 + \frac{4.6}{2} - 0) = 28.09 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

III.2.3 Calcul du pouvoir fumigène sec théorique

$$V_{FS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + (1 - \Psi)Va$$

$$V_{FS} = 3.6 + 0 + 0 + (1 - 0.21)28.09 = 25.79 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

III.2.4 Calcul du pouvoir fumigène humide théorique

$$V_{FH} = V_{FS} + V_{H_2O} + V_W$$

$$V_{FH} = 25.79 + 4.6 + 0 = 30.39 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

III.2.5 Calcul du teneur de CO_2 et N_2

$$\gamma V_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{FH}} = 0.1184$$

$$\gamma V_{N_2} = \frac{V_{N_2} + (1 - \Psi)Va}{V_{FH}} = 0.73021$$

III.2.6 Calcul du pouvoir comburivore réel

$$e=10\% \quad Va' = (1 + e)Va$$

$$Va' = (1 + 0.1) \times 28.09 = 30.899 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

III.2.7 Calcul du pouvoir fumigène sec réel

$$V'_{FS} = V_{FS} + eVa$$

$$V'_{FS} = 25.79 + 0.1 \times 28.09 = 28.599 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

III.2.8 Calcul du pouvoir fumigène humide réel

$$V'_{FH} = V'_{FS} + V_{H_2O} + V_W$$

$$V'_{FH} = 28.599 + 4.6 + 0 = 33.199 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

III.2.9 Calcul du teneur de CO_2 et N_2 en présence d'excès d'air

$$\gamma V_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V'_{FH}} = 0.1084$$

$$\gamma V_{N_2} = \frac{V_{N_2} + (1 - \Psi)Va'}{V'_{FH}} = 0.7352$$

Tableau III.1 : calculs de pourcentage

e (%)	Va'(Nm ³ /Nm ³)	V'_{FH}(Nm ³ /Nm ³)	V'_{FS}(Nm ³ /Nm ³)	γV_{CO_2}(%)	γV_{N_2}(%)
0	28.09	30.39	25.79	11.84	73.02
10	30.899	33.199	28.599	10.84	73.52
20	33.708	36.008	31.408	9.99	73.95
30	36.517	38.817	34.217	9.27	74.31
40	39.326	41.626	37.026	8.64	74.63
50	42.135	44.435	39.835	8.1	74.91
60	44.944	47.244	42.644	7.62	75.15
70	47.753	50.053	45.453	7.19	75.36
80	50.562	52.862	48.262	6.81	75.56
90	53.371	55.671	51.071	6.45	75.73
100	56.18	58.48	53.88	6.15	75.89

Tableau III.2 : le pouvoir comburivore en fonction de l'excès d'air

e(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Va'	28.09	30.899	33.708	36.517	39.326	42.135	44.944	47.753	50.562	53.371	56.18

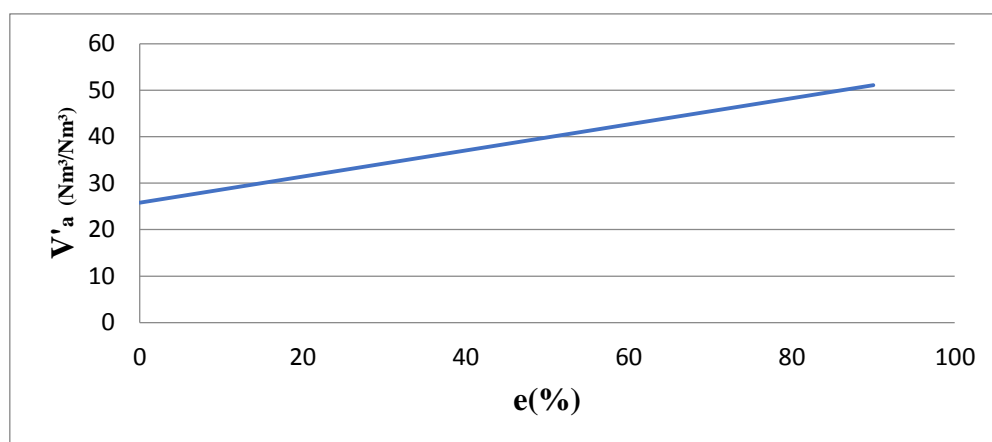


Figure III.1 l'influence de l'excès d'air sur le pouvoir comburivore

▪ Interprétation

La figure III.1 représente l'évolution du pouvoir comburivore ($V'a$) en fonction du changement d'excès d'air (e). Celle-ci s'avère être une fonction affine croissante. Par conséquent, nous pouvons facilement affirmer que le pouvoir comburivore est bien proportionnel, à une constante près, à l'excès d'air. C'est-à-dire que plus l'excès d'air va augmenter plus le pouvoir comburivore augmentera à son tour.

Tableau III.3 : le pouvoir fumigène humide en fonction de l'excès d'air

$e(\%)$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
V'_{FH}	30.390	33.199	36.008	38.817	41.626	44.435	47.244	50.053	52.862	55.671	58.48

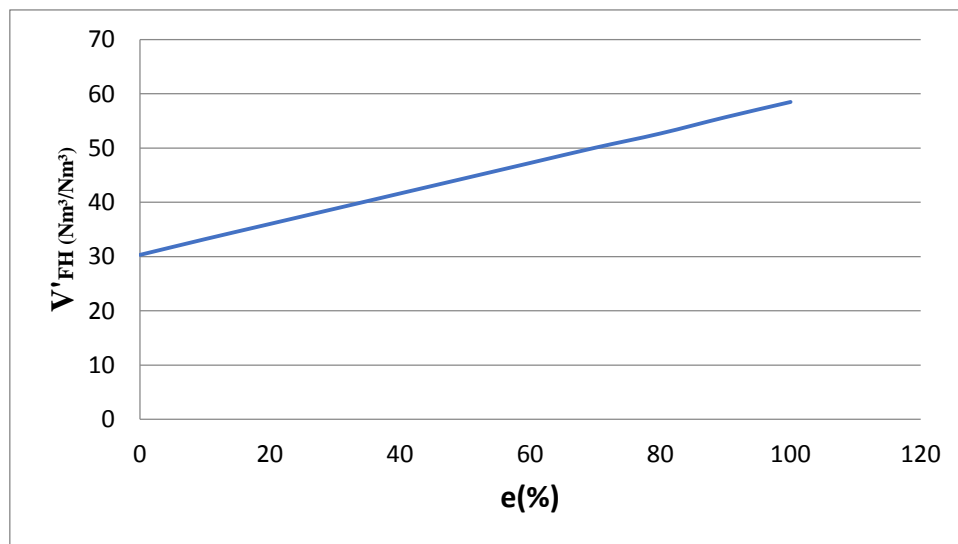


Figure III.2 : l'influence de l'excès d'air sur le pouvoir fumigène humide

▪ Interprétation

La figure III.2 présente l'évolution du Pouvoir fumigène humide (V'_{FH}) en fonction du changement d'excès d'air (e). Cette figure montre que la variation V'_{FH} est une fonction affine du paramètre excès d'air e . Par conséquent, nous pouvons dire que le pouvoir fumigène humide est proportionnel, à une constante près, à l'excès d'air.

Par ailleurs, sachant que l'humidité est bien présente dans l'excès d'air, alors plus l'excès d'air va augmenter plus le pouvoir fumigène humide augmentera davantage.

Tableau III.4 : le pouvoir fumigène sec réel en fonction de l'excès d'air

e(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
V'_{FS}	25.79	28.599	31.408	34.217	37.026	39.835	42.644	45.453	48.262	51.071	53.88

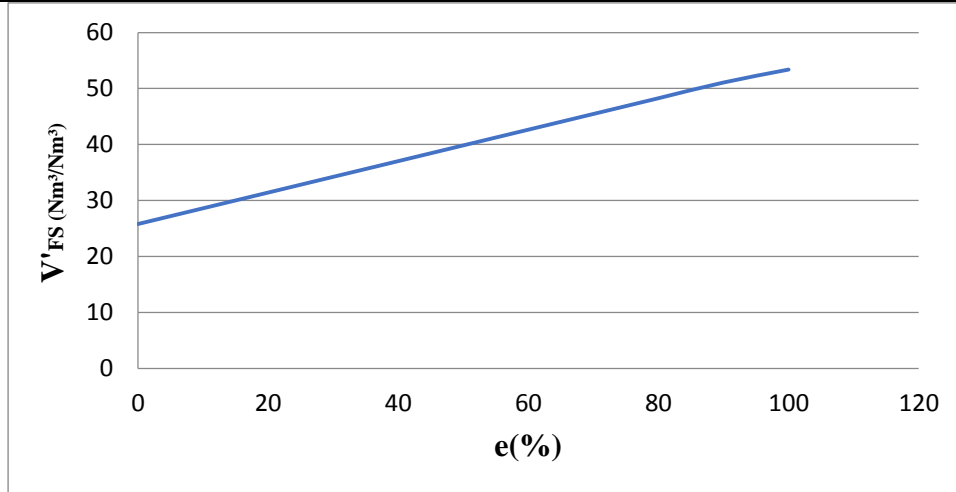


Figure III.3 : l'influence de l'excès d'air sur le pouvoir fumigène sec

▪ **Interprétation**

Nous présentons dans la figure III.3 l'évolution du Pouvoir fumigène sec (V'_{FS}) en fonction du changement d'excès d'air (e). Cette figure montre que la variation V'_{FS} est elle aussi une fonction affine du paramètre e. Par conséquent, de la même manière que V'_{FH} , nous pouvons aussi dire que le pouvoir fumigène sec est proportionnel, à une constante près, l'excès d'air. Par ailleurs, il faut souligner au passage que l'existence de lien entre le pouvoir comburivore et le pouvoir fumigène sec influence grandement l'évolution de ce dernier.

Tableau III. 5 : le teneur de dioxyde de carbone en fonction de l'excès d'air

e(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
γV_{CO_2}	11.84	10.84	9.99	9.27	8.64	8.1	7.62	7.19	6.81	6.45	6.15

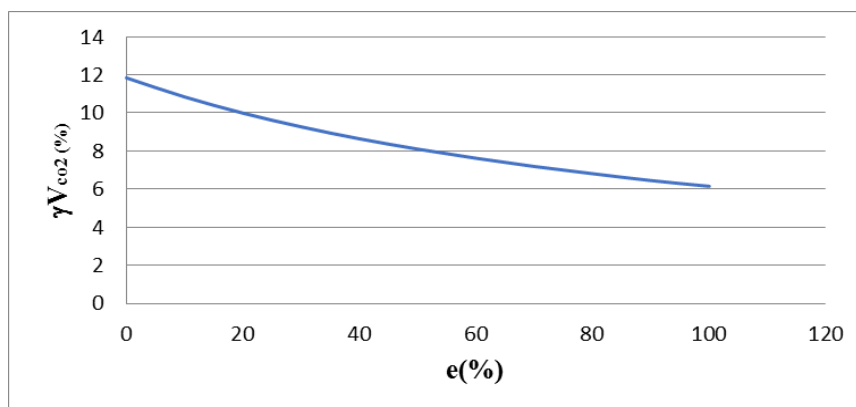


Figure III.4 : l'Influence de l'excès d'air sur la teneur en dioxyde de carbone

▪ Interprétation

La figure III.4 présente l'évolution de la teneur de dioxyde de carbone (γV_{CO_2}) en fonction du changement d'excès d'air (e). Nous y observons une courbe décroissante qui décrit, à une constante près, une teneur de dioxyde de carbone qui est inversement proportionnelle à l'excès d'air, c'est-à-dire que plus l'excès d'air augmente plus la teneur en dioxyde de carbone diminue.

Tableau III.6 : le teneur de d'azote en fonction de l'excès d'air

e(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
γV_{N_2}	73.02	73.52	73.95	74.31	74.63	74.91	75.15	75.36	75.56	75.73	75.89

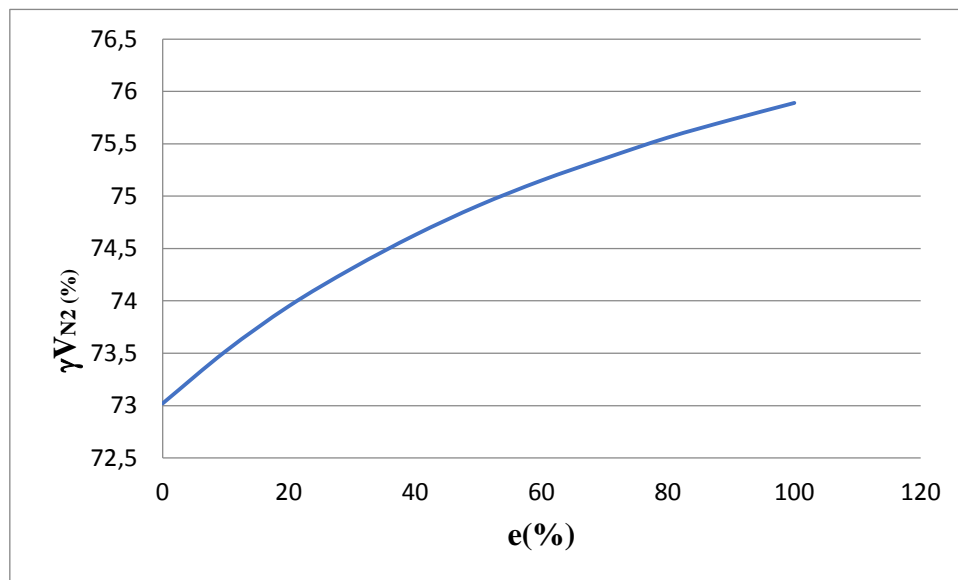


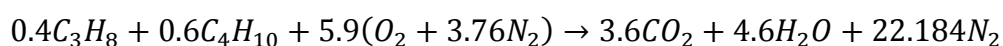
Figure III.5 : l'influence de l'excès d'air sur la teneur en azote

▪ Interprétation

Cette nouvelle figure III.5 représente les variations de la teneur en azote (γV_{N_2}) en fonction du changement d'excès d'air (e). Nous y observons une courbe croissante qui montre clairement que plus l'excès d'air augmente plus la teneur en azote va elle aussi augmenter.

III.2.10 Calcul de la température de la flamme adiabatique

L'équation de la réaction de combustion est



Pour qu'on peut déterminer la température de flamme adiabatique on pose $Q = 0$ et $W = 0$ pour avoir ce bilan d'énergie

$$H_{prod} = H_{réact}$$

Avec

$$H_{prod} = \sum_i^n N_{pi} (\bar{h}_f^0 + \bar{h} + \bar{h}^0)_{pi}$$

$$H_{réact} = \sum_i^n N_{ri} (\bar{h}_f^0 + \bar{h} + \bar{h}^0)_{ri}$$

- L'état des réactif et connue donc on peut le calcule

Tableau III.7 : Les valeurs des enthalpies

Substance	\bar{h}_f^0	\bar{h}_{298k}^0
C_3H_8	-103850	/
C_4H_{10}	-126450	/
O_2	0	8682
N_2	0	8669
CO_2	-393520	9364
H_2O	-241820	9904

On va calcule la température de flamme adiabatique en changeant la valeur d'excès d'air du $e=0$ % (cas stœchiométrique) au $e=100$ %.

Pour $e=0$ (cas stœchiométrique) :

Comme on connait les enthalpies des réactifs on obtient :

$$N_{CO_2} (\bar{h}_{f_{CO_2}}^0 + \bar{h}_{CO_2} - \bar{h}_{298k(CO_2)}^0) + N_{H_2O} (\bar{h}_{f_{H_2O}}^0 + \bar{h}_{H_2O} - \bar{h}_{298k(H_2O)}^0) + N_{N_2} (\bar{h}_{f_{N_2}}^0 + \bar{h}_{N_2} - \bar{h}_{298k(N_2)}^0) = N_{C_3H_8} (\bar{h}_{f_{C_3H_8}}^0) + N_{C_4H_{10}} (\bar{h}_{f_{C_4H_{10}}}^0)$$

$$[3.6 \times (-393520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) + 4.6 \times (-241820 + \bar{h}_{H_2O} - 9904) + 22.184 \times (0 + \bar{h}_{N_2} - 869)] = [0.4(-103850) + 0.6(-126150)]$$

On a alors :

$$3.6 \times \bar{h}_{CO_2} + 4.6 \times \bar{h}_{H_2O} + 22.184 \times \bar{h}_{N_2} = 2683395.9 \text{ kJ}$$

Avec l'utilisation des tables thermodynamique, par itération on va déterminer la température de flamme adiabatique (cette température est laquelle la relation on dessue est vérifié)

On divise le membre de droite de l'équation par le nombre de mole total

$$\frac{2683395.9}{3.6+4.6+22.184} = 88316.0841 \text{ kJ/ kmol}$$

Cette valeur d'enthalpie correspond aux températures suivantes :

$$T_{CO_2} \approx 1800 \text{ K}, T_{H_2O} \approx 2100 \text{ K}, T_{N_2} \approx 2650 \text{ K}$$

Puisque le plus grand nombre de mole dans les produits de combustion est celui de l'azote, la température T_{ad} devrait être **légèrement** inférieure à 2650 K .

On prend pour le premier essai $T=2350 \text{ K}$:

$$h_{CO_2} = 122091 \text{ kJ/kmol}, h_{N_2} = 77496 \text{ kJ/kmol}, h_{H_2O} = 100846 \text{ kJ/kmol}$$

On obtient :

$$(3.6 \times 122091) + (4.6 \times 100846) + (22.184 \times 77496) = 2622590.46 \text{ KJ}$$

Pour $T=2400 \text{ K}$:

$$h_{CO_2} = 125152 \text{ kJ/kmol}, h_{N_2} = 79320 \text{ kJ/kmol}, h_{H_2O} = 103508 \text{ kJ/kmol}$$

On obtient :

$$(3.6 \times 125152) + (4.6 \times 103508) + (22.184 \times 79320) = 2675518.88 \text{ kJ}$$

Pour $T=2450 \text{ K}$:

$$h_{CO_2} = 128219 \text{ kJ/kmol}, h_{N_2} = 81149 \text{ kJ/kmol}, h_{H_2O} = 106183 \text{ kJ/kmol}$$

On obtient :

$$(3.6 \times 128219) + (4.6 \times 106183) + (22.184 \times 81149) = 2750239.616 \text{ kJ}$$

$$2675518.88 \text{ kJ} < 2683395.9 \text{ kJ} < 2750239.616 \text{ kJ}$$

Par interpolation:

$$T = 2400 \rightarrow 2675518.88$$

$$T_{ad} \rightarrow 2683395.9$$

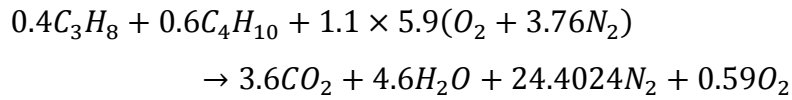
$$T = 2450 \rightarrow 2750239.616$$

$$T_{ad} = 2400 + (2450 - 2400) \times \frac{2683395.9 - 2675518.88}{2750239.616 - 2675518.88}$$

$$T_{ad} = 2405.27 \text{ K}$$

Pour (e=10%) :

L'équation de combustion est :



Comme on connaît les enthalpies des réactifs on obtient :

$$N_{CO_2} \left(\overline{h_{f_{CO_2}}^\circ} + \overline{h_{CO_2}} - \overline{h_{298k(CO_2)}^\circ} \right) + N_{H_2O} \left(\overline{h_{f_{H_2O}}^\circ} + \overline{h_{H_2O}} - \overline{h_{298k(H_2O)}^\circ} \right) \\ + N_{N_2} \left(\overline{h_{f_{N_2}}^\circ} + \overline{h_{N_2}} - \overline{h_{298k(N_2)}^\circ} \right) + N_{O_2} \left(\overline{h_{f_{O_2}}^\circ} + \overline{h_{O_2}} - \overline{h_{298k(O_2)}^\circ} \right) \\ = N_{C_3H_8} \left(\overline{h_{f_{C_3H_8}}^\circ} \right) + N_{C_4H_{10}} \left(\overline{h_{f_{C_4H_{10}}^\circ} \right) \\ [3.6 \times (-393520 + \overline{h_{CO_2}} - 9364) + 4.6 \times (-241820 + \overline{h_{H_2O}} - 9904) + 24.4024 \\ \times (0 + \overline{h_{N_2}} - 869) + 0.59(0 + \overline{h_{O_2}} - 8682)] \\ = [0.4(-103850) + 0.6(-126150)]$$

On a alors :

$$3.6 \times \overline{h_{CO_2}} + 4.6 \times \overline{h_{H_2O}} + 24.4024 \times \overline{h_{N_2}} + 0.59 \times \overline{h_{O_2}} = 1450382.4 + 1157930.4 + \\ 211544.4056 + 5122.38 - 117230 = 2707749.5856 \text{ kJ}$$

On divise le membre de droite de l'équation par le nombre de mole total

$$\frac{2707749.5856}{3.6 + 4.6 + 24.4024 + 0.59} = 81577.396 \text{ kJ/kmol}$$

Donc pour cette valeur d'enthalpie on obtient les températures suivantes

$$T_{CO_2} \approx 1680 \text{ K}, T_{H_2O} \approx 1960 \text{ K}, T_{O_2} \approx 2350 \text{ K}, T_{N_2} \approx 2450 \text{ K}$$

Pour le premier essai T=2350 K :

$$h_{CO_2} = 122091 \text{ kJ/kmol}, h_{O_2} = 81243 \text{ kJ/kmol}, h_{N_2} = 77496 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{H_2O} = 100846 \text{ kJ/kmol}$$

On obtient :

$$(3.6 \times 122091) + (4.6 \times 100846) + (24.4024 \times 77496) + (0.59 \times 81243) \\ = 2842440.9604 \text{ kJ}$$

T=2300 K :

$$h_{CO_2} = 119035 \text{ kJ/kmol}, h_{O_2} = 79316 \text{ kJ/kmol}, h_{N_2} = 75676 \text{ kJ / kmol}$$

$$h_{H_2O} = 98199 \text{ kJ /kmol}$$

On obtient :

$$(3.6 \times 119035) + (4.6 \times 98199) + (24.4024 \times 75676) + (0.59 \times 79316) \\ = 2773713.8624 \text{ kJ}$$

T=2250 K :

$$h_{CO_2} = 115984 \text{ kJ /kmol}, h_{O_2} = 77397 \text{ kJ /kmol}, h_{N_2} = 73856 \text{ kJ /kmol}$$

$$h_{H_2O} = 95562 \text{ kJ / kmol}$$

On obtient :

$$(3.6 \times 115984) + (4.6 \times 95562) + (24.4024 \times 73856) + (0.59 \times 77397) \\ = 2705055.4844 \text{ kJ}$$

$$2705055.4844 \text{ kJ} < 2707749.5856 \text{ kJ} < 2773713.8624 \text{ kJ}$$

Par interpolation :

$$T = 2300 \rightarrow 2705055.4844$$

$$T_{ad} \rightarrow 2707749.5856$$

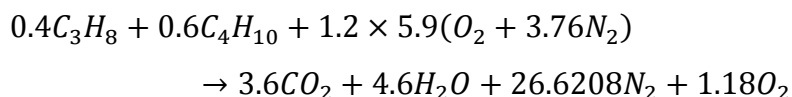
$$T = 2250 \rightarrow 2773713.8624$$

$$T_{ad} = \frac{50 \times 269411012}{68658.378} + 2250 ,$$

$$T_{ad} = 2251.96 \text{ K}$$

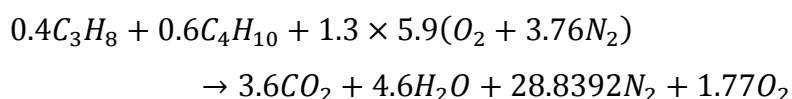
On fait les mêmes calculs pour qu'on obtienne les températures adiabatiques pour les différentes valeurs de l'excès d'air

Pour (e=20%) :



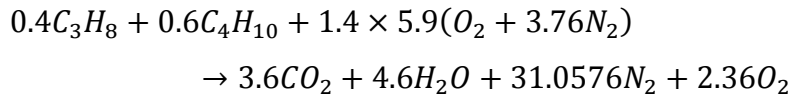
$$T_{ad} = 2125.88 \text{ K}$$

Pour (e=30%) :



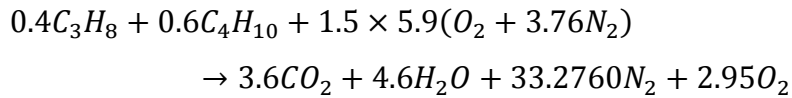
$$T_{ad} = 2015.6484 \text{ K K}$$

Pour (e=40%) :



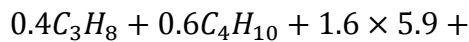
$$T_{ad} = 1918.38 \text{ K}$$

Pour (e=50%) :

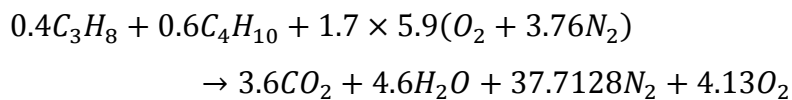


$$T_{ad} = 1831.86 \text{ K}$$

Pour (e=60%) :

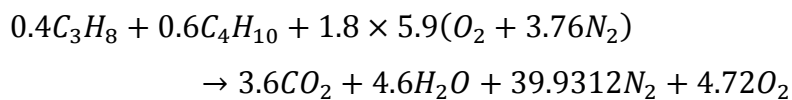


Pour (e=70%) :



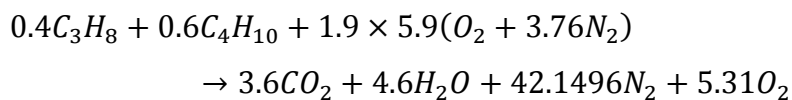
$$T_{ad} = 1697.64 \text{ K}$$

Pour (e=80%) :



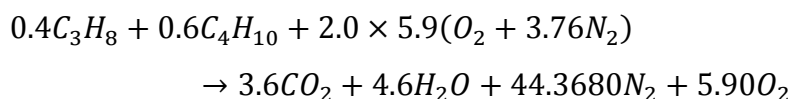
$$T_{ad} = 1621.48 \text{ K}$$

Pour (e=90%) :



$$T_{ad} = 1563.66 \text{ K}$$

Pour (e=100%) :



$$T_{ad} = 1511.36 \text{ K}$$

Tableau III.8 : la température de flamme adiabatique

e(%)	T_{ad} K
0	2405.27
10	2251.96
20	2125.88
30	2015.6484
40	1918.38
50	1831.86
60	1754.42
70	1697.64
80	1621.48
90	1563.66
100	1511.36

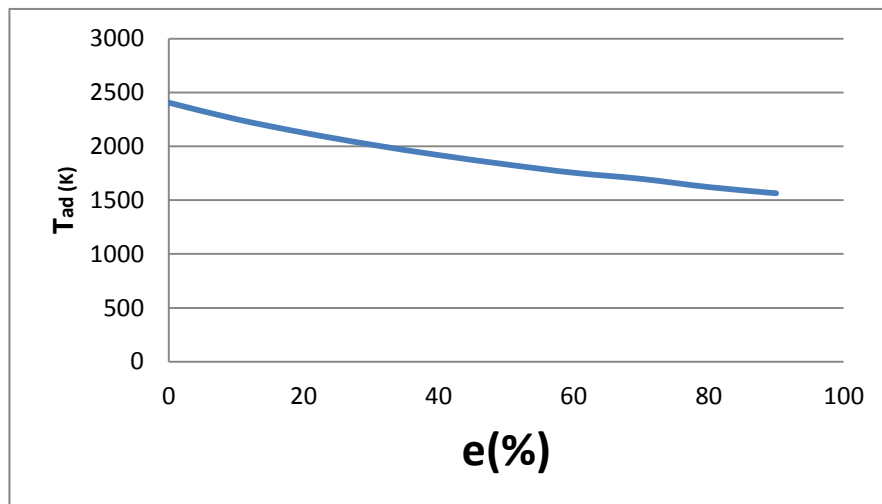


Figure III.6 : l'influence de l'excès d'air sur la température de la flamme adiabatique

▪ **Interprétation :**

Nous présentons dans la figure III.6 l'évolution de la température de flamme adiabatique (T_{ad}) en fonction du changement d'excès d'air (e). Les résultats obtenus montrent une évolution décroissante, c'est-à-dire que plus l'excès d'air augmente plus la température de flamme adiabatique diminue.

Conclusion générale :

Les avantages du GPL sont uniques en termes de source, de caractéristiques et d'applications industrielles, qui sont une source d'énergie propre et produit un faible pourcentage d'émissions de carbone lors de la combustion, de sorte que les solutions intelligentes proposées aux consommateurs dans le domaine industriel sont très adaptées.

L'air est une chose essentielle pour le processus de combustion, mais il doit être contrôlé dans la quantité requise pour obtenir des résultats satisfaisants.

Le GPL doit être manipulé avec une extrême prudence en raison de son danger et de son inflammation rapide et peut entraîner de lourdes pertes.

Référence bibliographique :

- [1] <https://www.gazdaujourdhui.fr/le-monde-des-gpl/> consulté le (12/5/2022)
- [2] https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/gaz_de_petrole_liquefie_gpl.php4 consulté le (22/6/2022)
- [3] maximilian lackner, vienna university of technology, institute of chemical engineering, getreidemarkt 9/166, 1060 wien, austria
- [4] étude sur les motrices bicarburations diesel-gpl dong jian - gao xiaohong - li gesheng zhang xintang 24 septembre 2001
- [5] effets sur la combustion du gaz de pétrole liquéfié de céramique poreuse dopée avec des éléments de terres rares les liens d'auteur ouvrent le panneau de superposition zhu dongbin liang jinsheng liang guangchuan ding yan xue gang liu lihua 20 novembre 2007
- [6] Performance and exhaust emission characteristics of a diesel engine running with lpg vezir ayhan*, adnan parlak, idris cesur, bari boru and ahmet kolip 31 mars 2011
- [7] study on combustion parameters of liquefied petroleum gas engine guoxianglu, lifu li 27–30 september 2011, chengdu, china
- [8] numerical and experimental analyses of lpg (liquefied petroleum gas) combustion in a domestic cooking stove with a porous radiant burner écrit par: snehasishpanigrahy, niraj kumar mishra, subhash c. mishra and p. muthukumar energy, 2016, vol. 95, issue c, 404-414
- [9] liquefied petroleum gas as an alternative fuel františeksynáka kristiánčulíkavladimírrievajajángaňaa 13th international scientific conference on sustainable, modern and safe transport (transcom 2019), high tatras, novysmokovec – grand hotel bellevue, slovak republic, may 29-31, 2019
- [10] études expérimentales sur l'impact de l'egr à boucle haute pression partiellement refroidie sur les caractéristiques de combustion et d'émission du gaz de pétrole liquéfié libin p. oommen &gn kumar 19 mai 2020
- [11] Investigation study for the effect using lpg on characteristics of gasoline engine ghufuran talib hashem & mohamed f. al-dawody 9 janvier 2022

- [12] z. hanichi ; « optimisation des paramètres de fonctionnement d'une débutaniseuse » ; mémoire de fin d'étude université de boumerdes ; 2005
- [13] calcul des paramètres de fonctionnement du dépropaniseur (unité (38) ; traitement de gpl) "module iii à hassi r'mel" mémoire fin d'étude université de biskra
- [14] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gaz-de-petrole-liquefies-gpl> consulté le (22/2/2022)
- [15] <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-combustion/> consulté le (15/6/2022)
- [16] <https://enasis.univ-lyon1.fr/clarolinepdfplayerbundle/pdf/45007> consulté le (18/5/2022)
- [17] cours de combustion 2ième partie combustions réelles, combustibles complexes christian guilié novembre 2011
- [18] <https://www.ecom.fr/comprendre-la-combustion.html> consulté le (29/4/2022)
- [19] thermodynamique une approche programmatique (2 eme edition) yunus a.cengel michael a.boles page 689