



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
La République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
قسم الهندسة الميكانيكية  
Département Génie Mécanique



N° d'ordre : M

/GM/2019

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

## *Thème*

**Simulation des effets de la combustion du kérosène.**

Présenté par :

- ❖ AZROUG Oussama
- ❖ ABDERRAHIM EL ouali

***Soutenu le 06/07/2019 devant le jury composé de :***

Président	Dr. A. GUERMAT	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. A. FLITTI	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. A. KHALDI	Université de Mostaganem UMAB

**Année Universitaire : 2018 / 2019**

## Remerciements

Nous remercions en premier lieu notre encadreur Dr. KHALDI Abdelaziz, pour sa disponibilité, pour son suivi, ses nombreux conseils et ses critiques constructives pour l'élaboration de ce travail.

Nous remercions aussi les membres du jury, Dr. A. GUERMAT et Dr. A. FLITTI qui ont accepté d'examiner le travail du présent mémoire. J'espère que leurs remarques, critiques, orientations et conseils nous seront très utiles pour une continuité dans nos études.

A tous les enseignants du département génie mécanique, qui ont contribué de près ou de loin à notre formation, qu'ils trouvent toutes nos gratitude.

Nous remercions toute l'équipe de la bibliothèque de la faculté pour leurs aides, leurs gentillesse et leurs compréhensions.

Nous remercions nos parentes qui ont œuvés pour notre réussite pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, et leurs prières tout au long de nos études.

---

## Sommaire

Remerciements .....	i
Sommaire .....	ii
Liste des figures .....	iv
Liste des tableaux .....	iv
Résumé .....	v
Introduction générale. ....	1
<b>CHAPITRE I : Généralités sur le kérosène</b>	
I. Introduction .....	2
I.1. Définition .....	3
I.2. Composition chimique du kérosène .....	3
I.3. La production du kérosène .....	4
I.4. Types du kérosène .....	5
I.5 Utilisation du kérosène .....	5
I.6. Les caractéristiques du kérosène .....	6
I.6.1 Propriétés chimiques .....	6
I.6.2. Les propriétés physiques .....	6
<b>CHAPITRE II : Généralités sur la combustion</b>	
II. Introduction générale .....	7
II.1. Définition de la combustion .....	7
II.2. Les combustibles .....	8
II.3. Limites d'inflammabilité .....	8
II.4. Pouvoir calorifiques .....	8
II.5. Température de flamme adiabatique .....	9
II.6. La combustion théorique .....	9
II.7. Pouvoir comburivore .....	10
II.8. Pouvoir fumigène .....	11

---

II.8. 1. Le pouvoir fumigène humide .....	11
II.8.2. Le pouvoir fumigène sec .....	11
II.9. La combustion réel .....	11
II.9.1. Combustion complète (en excès d'air) .....	11
II.9.2. Combustion incomplète (en défaut d'air) .....	12
<b>CHAPITRE III : Modélisation numérique de la combustion du kérosène</b>	
III. Introduction .....	13
III.1. Organigramme du programme .....	13
III.2. Résultats et interprétation	
III.2.1. Calcule du pouvoir comburivore réel en fonction de l'excès d'air .....	15
III.2.2. Calcule du pouvoir fumigène sec réel en fonction de l'excès d'air .....	16
III.2.3. Calcule du pouvoir fumigène humide réel en fonction de l'excès d'air .....	17
III.3. Calcule les teneurs des fumées sèches et humides en fonction de l'excès d'air	
III.3.1. Les teneurs des fumées sèches .....	17
III.3.2. Les teneurs des fumées humides .....	19
Conclusion générale.....	22
Références Bibliographiques .....	23

---

## Résumé :

Dans ce mémoire on a étudié la combustion du kérosène  $C_{11}H_{22}$ , par l'élaboration d'un programme avec le logiciel Matlab afin de déterminer les pouvoirs comburivore et les pouvoirs fumigènes émis en fonction de l'excès d'air ainsi que les proportions de leurs composantes.

Les résultats obtenus montrent que si on augmente l'excès d'air alors le pouvoir comburivore réel et les pouvoirs fumigènes augmentent.

La concentration de  $O_2$  augmente elle aussi si on augmente l'excès d'air, contrairement aux concentrations de  $CO_2$  et la teneur de  $H_2O$  qui diminue, et on a trouvé que la concentration de  $N_2$  augmente dans le cas des fumées séchées et diminue dans le cas des fumées humides.

## Summary :

In this thesis we have studied the combustion of kerosene  $C_{11}H_{22}$ , by the elaboration of a program with the software Matlab to determine the comburivorous powers and the smoke powers emitted according to the excess of air as well as the proportions of their components.

The results obtained show that if we increase the excess of air then the actual comburivorous power and the smoke powers increase.

The concentration of  $O_2$  also increases if the excess air is increased, contrary to the  $CO_2$  concentrations and the  $H_2O$  content which decreases, and it has been found that the  $N_2$  concentration increases in the case of the dried fumes and decreases in the case of humid fumes.

## Mots clés :

Modélisation, combustion, kérosène, excès d'air.

---

### Liste des figures :

Figure 1 : Chromatogramme d'un échantillon de kérosène de type TR0.....	4
Figure 2 : la production du kérosène. ....	5
Figure 3 : chauffage au kérosène. ....	6
Figure 4 : carburant d'avion. ....	6
Figure 5 : L'évolution de pouvoir comburivore réel en fonction l'excès d'air. ....	15
Figure 6 : courbe l'évolution de pouvoir fumigène sec en fonction l'excès d'air. ....	16
Figure 7 : courbe l'évolution de pouvoir fumigène humide en fonction l'excès d'air. ....	17
Figure 8 : courbe d'évolution de teneur de CO <sub>2</sub> dans les fumées sèches en fonction de l'excès d'air. ....	18
Figure 9 : courbe d'évolution de teneur de N <sub>2</sub> dans les fumées sèches en fonction de l'excès d'air. ....	18
Figure 10 : courbe d'évolution de teneur d'O <sub>2</sub> dans les fumées sèches en fonction de l'excès d'air. ....	19
Figure 11 : courbe d'évolution de teneur de CO <sub>2</sub> dans les fumées humides en fonction de l'excès d'air.....	19
Figure 12 : courbe d'évolution de teneur de N <sub>2</sub> dans les fumées humides en fonction de l'excès d'air.....	20
Figure 13 : courbe d'évolution de teneur d'O <sub>2</sub> dans les fumées humides en fonction de l'excès d'air.....	20
Figure 14 : courbe d'évolution de teneur de H <sub>2</sub> O dans les fumées humides en fonction de l'excès d'air.....	21

### Liste de tableaux

Tableau 1 : Formule chimique du kérosène conventionnel. ....	3
Tableau 2 : les propriétés physiques du kérosène.....	6
Tableau 3 : Exemples de limites d'inflammabilité. ....	8

# Introduction général

---

Avec l'augmentation de la population mondiale dans les années à venir, la production et la consommation d'énergie vont elles aussi croître de manière conséquente. Cette production d'énergie est actuellement dominée à plus de 85 % par la combustion de matières premières comme le charbon, le gaz naturel ou le pétrole.

Cette combustion de ces matières premières est une réaction chimique exothermique d'oxydo-réduction entre un combustible et un comburant.

Dans la combustion avec excès d'air, on trouve de l'oxygène dans les produits de combustion ce qui n'était pas le cas de la combustion complète avec la quantité adéquate d'air. Il est important de noter que les quantités de  $\text{CO}_2$  et d'eau dans les produits sont les mêmes pour une combustion complète en présence d'oxygène pur, d'air stœchiométrique ou d'air en excès. La différence entre les différentes combustions réside uniquement sur les flux d'oxygène et d'azote.

Le kérosène par sa combustion très énergétique, est un combustible de choix utilisable pour fournir de la chaleur et de l'énergie mécanique sans autre résidu que de l'eau.

Notre étude consiste à étudier la combustion du kérosène en élaborant un programme de calcul à l'aide du logiciel Matlab pour étudier les différents paramètres de sa combustion.

Notre travail est structuré comme suit :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude sur le kérosène (définition, composition chimique, production, utilisation, spécifications et caractéristiques).

Dans le deuxième chapitre, on a présenté la définition de la combustion et les combustibles, température minimale, limite d'inflammabilité inférieur et supérieur, pouvoir calorifiques, température de flamme adiabatique, et on a aussi présenté le pouvoir comburivore, pouvoir fumigène et la combustion réelle.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté un programme de calcul des différents paramètres de la combustion théorique puis la combustion réelle à savoir : le pouvoir comburivore, le pouvoir fumigène et les émissions des gaz à effet de serre comme le  $\text{CO}_2$  pour des différents facteurs d'air.

Enfin nous avons achevé notre travail avec une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur le kérosène**

**I.Introduction :**

Le pétrole, du latin *petra* et *oleum*, soit « huile de pierre » est une roche liquide carbonée, il est aussi une huile minérale naturelle utilisée comme source d'énergie. Le pétrole est issu d'un mélange variable d'hydrocarbures (molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène) associé à d'autres atomes, et de divers composés organiques piégés dans des formations géologiques particulières, principalement de soufre, d'azote et d'oxygène. La valeur d'un pétrole brut dépend de son origine géographique et de ses caractéristiques physico-chimiques propres [1].

L'utilisation de pétrole est large et variée. Il est constitué d'hydrocarbures ; toutes fois le pétrole brut ne peut être utilisé directement comme combustible. L'essentiel de ce pétrole est raffiné, transformé en plusieurs coupes pétrolières telles que les gasoils et les coupes naphthas d'où dérivent les essences automobiles [2].

Les carburants sont des produits dont la combustion en présence d'air permet le fonctionnement des moteurs thermiques à pistons (de type essence ou gasoil) ou à combustion continue (réacteurs d'avion, turbines à gaz). On ne doit pas confondre les termes carburant et combustible, ce dernier étant, quant à lui, réservé aux produits utilisés pour la fourniture d'énergie thermique dans les chaudières, les fours et les centrales [3].

Le kérosène est un produit de distillation directe intermédiaire entre l'essence et le gazole à l'origine jusqu'au début du xx siècle le kérosène sous le nom de pétrole lampant fut la principale utilisation du pétrole. Le kérosène est désormais surtout utilisé comme carburacteur. L'utilisation du pétrole lampant (éclairage) ne subsiste que dans certains pays en développement, dans des zones où l'électricité n'est pas disponible et dans certains cas pour la cuisine [4].

Le chapitre I de ce mémoire est consacré à une présentation et des généralités sur le kérosène (définition, composition chimique, production, types, utilisation, spécifications et caractéristiques).

**I.1. Définition :**

Le kérosène (ou pétrole lampant), est un produit issu du pétrole, un mélange d'hydrocarbures distillant entre 140 et 300°C, dont les principaux constituants sont des hydrocarbures de C<sub>9</sub> à C<sub>16</sub>, des hydrocarbures n- et iso-aliphatiques (paraffiniques et isoparaffiniques), des hydrocarbures cycloaliphatiques (cycloparaffiniques ou naphéniques) et des hydrocarbures aromatiques (environ 15 à 20 % et 0≤5 % si il est désaromatisé). Le benzène est en général absent de ces coupes [5].

Il alimente les moteurs à réaction équipant les avions. Par ses propriétés physiques, ce mélange se situe entre l'essence et le gasoil. son utilisation à haute altitude impose des spécifications sévères assurant un maximum de sécurité [6].

Les hydrocarbures aromatiques : regroupent tous les composés renfermant un ou plusieurs cycles benzéniques. Les plus connus sont le benzène, le toluène, les xylènes, l'éthylbenzène, les propylbenzènes et le mésithylène.

Les hydrocarbures paraffiniques: regroupent les hydrocarbures comportant des chaînes hydrocarbonées linéaires (C<sub>n</sub> H<sub>2n+2</sub>), sans cycle et dont le plus courant est le méthane (CH<sub>4</sub>)

Les hydrocarbures cycloparaffiniques : regroupent les hydrocarbures comportant des chaînes hydrocarbonées cycliques [7].

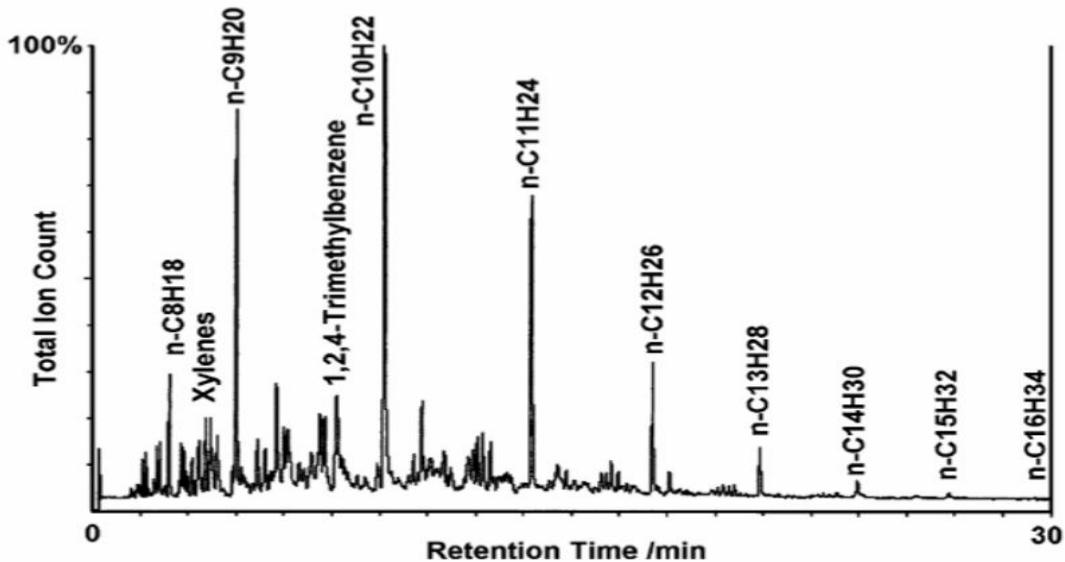
**I.2. Composition chimique du kérosène :**

Le carburant kérosène est un mélange de plusieurs milliers d'hydrocarbures. On y trouve principalement des hydrocarbures de types paraffiniques ou alcanes (50-65% vol.), naphéniques ou cyclanes (20-30% vol.) et mono- et poly-aromatiques (10-20% vol.) [8].

Comme nous le montre le tableau ci-dessous, la formule chimique moyenne du kérosène diffère d'une source à une autre et varie globalement de C<sub>10,9</sub>H<sub>20,9</sub> et C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>:

Sources	Formule chimique
Gracia-Salcedo et al	C <sub>12</sub> H <sub>23</sub>
Edwards et Maurice	C <sub>11</sub> H <sub>21</sub>
Martel	C <sub>11,6</sub> H <sub>22</sub>
Guéret	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
Nguyen et Ying	C <sub>11</sub> H <sub>23</sub>

**Tableau I.1 : Formule chimique du kérosène conventionnel**



**Figure I.1 : Chromatogramme d'un échantillon de kérosène de type TR0.**

La figure ci-dessus (Figure I.1) montre les résultats d'une analyse chromatographique en phase gazeuse couplée à un détecteur à spectrométrie de masse (CG/SM) d'un échantillon de kérosène de type TR0 destiné à l'aviation militaire. Le chromatogramme montre bien l'importance de la famille chimique des alcanes ( $n\text{-C}_9\text{H}_{20}$ ,  $n\text{-C}_{10}\text{H}_{22}$ ,  $n\text{-C}_{11}\text{H}_{24}$ ,  $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ ) dans le carburéacteur.

### **I.3. La production du kérosène :**

Le kérosène est une coupe pétrolière issue de la distillation atmosphérique du pétrole. Cette coupe est traitée à l'hydrogène afin de convertir le soufre organique en hydrogène sulfuré qui est ensuite éliminé [7].

Les procédés de distillation permettent de fractionner le pétrole brut en différentes coupes d'hydrocarbures selon leur différence de volatilité et donc la taille des molécules qu'elles renferment. La distillation atmosphérique sépare le pétrole en gaz, essences, distillats moyens et en résidu atmosphérique. Parmi ces distillats moyens, on retrouve :

D'une part, la coupe kérosène provenant de l'intervalle de distillation 140 - 250 °C qui est une fraction légère constituée de composés dont les chaînes carbonées sont comprises entre 9 et 15 atomes de carbone ( $\text{C}_9 - \text{C}_{15}$ ), principalement des paraffines. Cette base est surtout utilisée pour la formulation du carburant d'aviation Jet A-1, mais elle constitue également un excellent moyen de correction de la tenue à froid des gazoles moteurs [9].

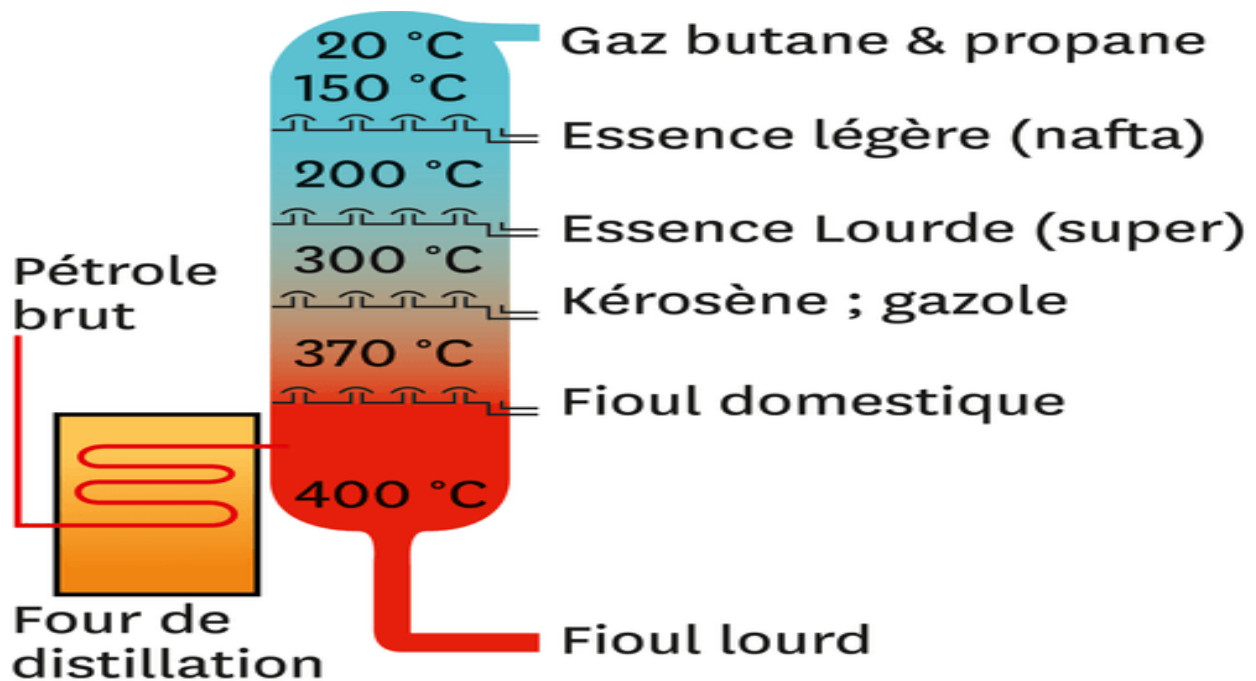


Figure I.2: la production du kérosène

#### I.4. Types du kérosène:

Le kérosène (Jet A-1, Jet A, TR0, JP-8) est le carburéacteur utilisé dans le secteur aéronautique. Il existe plusieurs types de carburéacteur dans le monde. Le Jet A-1 est un carburant de type kérosène utilisé dans l'aviation civile internationale. Il présente des similitudes avec le Jet A utilisé aux Etats-Unis. En France le kérosène utilisé pour l'aviation militaire est appelé TR0 (JP-8 aux Etats-Unis et AVATUR au Royaume-Uni). [10].

#### I.5. Utilisation du kérosène:

Durant le XIXe siècle, le "pétrole lampant" était presque exclusivement utilisé à des fins d'éclairage, comme combustible des lampes à pétrole (d'où son nom). Ce n'est qu'à partir des années 1950 qu'il trouve une importance industrielle, comme carburant des avions à réaction et on parle alors de kérosène. Il a également été utilisé comme dégraissant des métaux [7].

Il peut être utilisé dans d'autres domaines tels que :

- Diluant pour peintures et vernis.
- Solvant pour la préparation d'insecticides.
- De produits anti-mousse, d'agents de démoulage et de produits de nettoyage.
- Agent de dégraissage, Fuel pour chauffage domestique...



Figure I.3: chauffage au kérosène



Figure I.4: carburant d'avion

### I.6. Les caractéristiques du kérosène :

Une des caractéristiques du kérosène, est la très faible pression de vapeur saturante (non mesurable à 38°C). Cette propriété, associée à un point éclair à une température élevée, assure une sécurité maximale d'utilisation de ce carburant en particulier sur les aéroports. Le kérosène étant très peu volatil, il est nécessaire de se placer à des températures élevées pour obtenir une teneur en vapeur non négligeable de ce combustible dans l'air.

Les pétroles lampants sont des liquides de faible viscosité, incolores ou légèrement jaunes, pratiquement insolubles dans l'eau, mais miscibles à un grand nombre de solvants usuels. Intervalle de distillation : entre 140 et 300 °C.

#### I.6.1. Propriétés chimiques :

Dans les conditions normales de température et de pression, les pétroles lampants sont des produits stables. Ils peuvent cependant réagir vivement avec les agents oxydants forts [11].

#### I.6.2 Les propriétés physiques:

Le tableau suivant regroupe les propriétés physiques du kérosène :

Les paramètres	Les propriétés physiques
Température de fusion	- 48 à -26 °C
Température d'ébullition	150 à 300 °C
Solubilité	Pratiquement insoluble (eau)
Masse volumique	0.8g .cm <sup>3</sup> à 15°C
Température d'auto inflammation	220 °C
Point d'éclair	49 à 55 °C
Limites d'explosivité dans l'air	0.6-6.5% vol

Tableau I.2 : les propriétés physiques du kérosène [11]

# **CHAPITRE II**

## **Généralités sur la combustion**

**II. Introduction :**

La combustion reste encore aujourd'hui le principal moyen de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans de nombreux systèmes pratiques aussi bien pour produire de la chaleur (chaudières ou fours domestiques et industriels), de l'électricité (centrales thermiques, turbines à gaz) que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, statoréacteurs, moteurs fusées) ou encore la destruction de déchets (incinérateurs) [12].

On sait facilement faire un feu à partir de charbon ou de bois mais on ne sait pas reconstituer du charbon ou du bois à partir de la fumée. Dans le cas de la combustion d'hydrocarbures, il y a oxydation du carbone et de l'hydrogène pour donner naissance à du dioxyde de carbone et de l'eau [13].

Dans ce chapitre, on a présenté la définition de la combustion et les combustibles, température minimale, limites d'inflammabilité inférieur et supérieur, pouvoir calorifiques, température de flamme adiabatique, pouvoir comburivore, pouvoir fumigène et la combustion réel.

**II.1. Définition de la combustion :**

La combustion est une réaction chimique globalement et généralement fortement exothermique, autonome, susceptible de s'accélérer brutalement et d'être accompagnée d'émission de rayonnements. Elle peut être lente ou vive, turbulente, spontanée, catalytique. Elle nécessite un comburant (généralement l'air ou l'oxygène) et un combustible (tels que les composés hydrocarbonés et oxygénés).

D'une manière générale, la combustion complète d'un composé hydrocarboné produit du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de l'eau. Cependant, cette réaction ne représente qu'un bilan global de la combustion. Des espèces intermédiaires de réaction sont formées à partir du combustible initial et contribuent à la production de ces produits ( $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) ainsi qu'à celle de composés plus lourds lors d'une combustion incomplète.

Dans le monde moderne, la combustion est surtout utilisée pour produire de l'énergie (chaleur, électricité) mais aussi pour obtenir des détonations (explosions utilisées pour la sécurité industrielle, la propulsion hypersonique, la pyrotechnie) [12].

## II.2. Les combustibles :

Les combustibles sont des 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 industrielles 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. En général, un combustible naturel ou bien artificiel peut être sous forme liquide, gazeux ou solide.

## II.3. Limites d'inflammabilité:

Le mélange n'est inflammable que si ses proportions d'oxygène et de combustible sont comprises dans le domaine d'inflammabilité délimité par la Limite Supérieure d'Inflammabilité (LSI) et la Limite Inférieure de l'Inflammabilité (LII). LSI et LII représentent respectivement les concentrations maximale et minimale de combustible qui doivent être présentes dans le mélange pour qu'il y ait inflammation. Au-dessous de la LII, le mélange est trop pauvre en combustible pour brûler et au dessus de la LSI, le mélange est trop pauvre en comburant pour s'enflammer [20].

Combustible	Li (% volume)	Ls (% volume)
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	4	94
Méthane (CH <sub>4</sub> )	5	60
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	3	52.5
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2.2	45
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	1.7	40
CO	12.5	94

**Tableau II.1: Exemples de limites d'inflammabilité [14]**

## II.4. Pouvoir calorifiques :

Le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'un kilogramme de combustible solide ou bien liquide ou un mètre cube de combustible gazeux dans les conditions standards  $T_{std}=298.15^{\circ}\text{K}$  ( $25^{\circ}\text{C}$ ) pour les liquides et normales pour les gaz  $T_{std}=273.15^{\circ}\text{K}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ) à une pression  $P_{std}=1$  atm (1013.25 mbar ou 1.01325 Pa). Le pouvoir calorifique est exprimé en kcal/kg et en kJ/kg pour les substances solides et liquides et en kcal/Nm<sup>3</sup> et en kJ/Nm<sup>3</sup> pour les

substances gazeuses. Les pouvoirs calorifiques sont mesurables tout comme les chaleurs spécifiques à pression et à volume constants dans un calorimètre.

La quantité de chaleur dégagée dépend de :

- Le type de combustion (soit à P constant, soit à V constant).
- Les températures et pressions du combustible et du comburant avant la combustion.
- La température des produits de combustion.
- L'état physique de l'eau (vapeur ou bien condensée).

### **II.5. Température de flamme adiabatique :**

La température théorique de combustion est la température maximale permise par la thermodynamique, que peuvent atteindre les gaz brûlés résultant de la combustion en phase gazeuse de réactifs parfaitement mélangés. Cette température est dite (adiabatique), car la flamme est supposée ne pas échanger de flux calorifique par rayonnement ou convection avec l'extérieur. C'est une grandeur calculable.

Une caractéristique fondamentale entrant dans ce calcul est la chaleur de combustion ou enthalpie de réaction : c'est la variation d'enthalpie accompagnant la réaction chimique d'oxydation du combustible considérée comme étant complète, cette réaction étant supposée s'effectuer dans des conditions standard de température et de pression (298 K, 1 atm) [16].

### **II.6. La combustion théorique :**

Il s'agit d'une combustion complète opérant sans excès ni défaut de comburant, c'est-à-dire en milieu stœchiométrique à la richesse  $\Psi = 1$ .

Elle est dite (neutre), car les produits de combustion ne renferment ni oxydant à l'état libre, ni composés autres que ceux résultant d'une oxydation totale, ils sont donc chimiquement inactifs.

Elle est dite (théorique), car il est bien connu qu'une combustion complète obtenue à partir d'un mélange stœchiométrique constitue un cas idéal.

Son étude présente un grand intérêt pratique du fait qu'elle conduit à établir des relations caractéristiques de la nature des réactifs, et qu'elle permet de définir des grandeurs qui sont d'un emploi universel [16].

**II.7. Pouvoir comburivore :**

C'est la quantité d'air comburant nécessaire et suffisante pour brûler 1 kg de combustible solide ou liquide. (Pour les gaz le pouvoir comburivore est rapporté au mètre-cube de combustible). La quantité d'air peut être exprimée en poids, ou en volume [17].

$$Va = \frac{1}{\psi} (V_{CO_2} + V_{SO_2} + \frac{V_{H_2O}}{2} - V_{O_2}) \quad [1]$$

Pour le calcul des volumes  $V_{CO_2}$ ,  $V_{SO_2}$ ,  $V_{H_2O}$ ,  $V_{O_2}$ ,  $V_{N_2}$  et  $V_w$  il ya deux méthode :

- Pour les combustibles solides et liquides :

$$V_{CO_2} = c \times \frac{22.4}{12} \left[ \frac{Nm^3}{Kg} \right] \quad [2]$$

$$V_{SO_2} = s \times \frac{22.4}{32} \left[ \frac{Nm^3}{Kg} \right] \quad [3]$$

$$V_{H_2O} = h \times \frac{22.4}{2} \left[ \frac{Nm^3}{Kg} \right] \quad [4]$$

$$V_{O_2} = o \times \frac{22.4}{32} \left[ \frac{Nm^3}{Kg} \right] \quad [5]$$

$$V_{N_2} = n \times \frac{22.4}{28} \left[ \frac{Nm^3}{Kg} \right] \quad [6]$$

$$V_w = w \times \frac{22.4}{18} \left[ \frac{Nm^3}{Kg} \right] \quad [7]$$

- Pour les combustibles gazeux le calcul des volumes se fait comme suit [19]:

$V_{CO_2}$  = 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.8. Pouvoir fumigène [19]:

D'une manière générale le pouvoir fumigène est la quantité de produits de combustion gazeux émise par la combustion stœchiométrique théorique de l'unité de volume ou de masse de combustible en général, le pouvoir fumigène s'exprime :

- En  $Nm^3$  de produits de combustion ou fumées par  $Nm$  cube de combustible gazeux.
- En  $Nm^3$  de fumées par kg de combustible liquide ou solide.

On distingue :

### 8.1. Le pouvoir fumigène humide :

L'eau produite par la combustion est à l'état de vapeur. C'est la quantité réelle de produits gazeux qu'il faudrait évacuer au cours d'une combustion théorique bien que par définition, le volume soit ramené aux conditions de référence TPN.

$$V_{FH} = V_{FS} + V_{H_2O} + V_W \quad [8]$$

### 8.2. Le pouvoir fumigène sec :

L'eau produite par la combustion est supposée condensée dans ces conditions, on ne tient compte que des produits gazeux [16].

$$V_{FS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + (1-\psi)V_a \quad [9]$$

## II.9. La combustion réel :

### 9.1. Combustion complète (en excès d'air) [19]:

Il s'agit d'une combustion dont le principe est appliqué dans le vaste domaine de la « production de chaleur ».

Elle est dite « oxydant » du fait qu'elle se déroule en présence d'un excès de comburant  $\epsilon$  (%), c'est-à-dire à la richesse  $\Psi < 1$ .

$$\mathbf{V}'_{\mathbf{a}} = \lambda \mathbf{V}_{\mathbf{a}} = (1+e)\mathbf{V}_{\mathbf{a}} \quad [10]$$

$$\mathbf{V}'_{\text{FS}} = \mathbf{V}_{\text{FS}} + e \mathbf{V}_{\mathbf{a}} \quad [11]$$

$$\mathbf{V}'_{\text{FH}} = \mathbf{V}_{\text{FH}} + e \mathbf{V}_{\mathbf{a}} \quad [12]$$

elle est dite « complète » du fait qu'au même titre que la combustion neutre théorique vue précédemment les réactions chimiques se déroulent d'une manière idéale pour conduire à la formation exclusive de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{SO}_2$  [16].

### 9.2. Combustion incomplète (en défaut d'air):

La combustion incomplète aura lieu quand il n'y aura pas assez de comburant pour permettre la réaction complète du combustible ou lorsque le temps de contact à une température rendant la combustion possible est trop faible. Elle produit donc des résidus de combustion, sous forme de cendres qui génèrent des fumées, dont certains composés sont très toxiques pour l'homme et pour l'environnement tel que le monoxyde de carbone (gaz mortel), des particules de carbone pur (suie, goudron, cendres), des oxydes d'azote, des hydrocarbures (cancérogènes tel le benzène), des composés organiques volatiles [18].

# **CHAPITRE III**

## **Modélisation numérique de la combustion du kérosène**

### III. Introduction :

Vu l'importance du kérosène et son impact sur l'environnement, nous avons choisi l'étude de sa combustion en fonction du taux d'excès d'air et voir l'influence de ce dernier sur les taux d'émission de différentes composantes des gaz brûlés.

Pour cela nous avons utilisé le logiciel Matlab pour élaborer un programme qui calcule le volume comburivore théorique et réel, ainsi que le volume de fumée sèche et humide dégagé après la combustion plus les teneurs des diverses composantes des fumées.

Les équations utilisées sont détaillées dans le deuxième chapitre.

#### Hypothèses :

Kérosène  $C_{11}H_{22}$ .

Combustible gazeux.

Combustion complet.

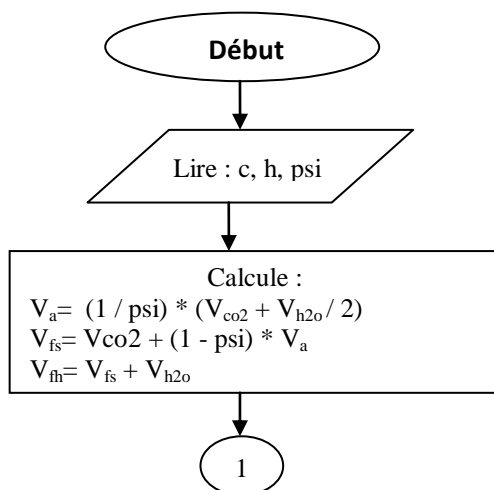
#### Donnés fixes :

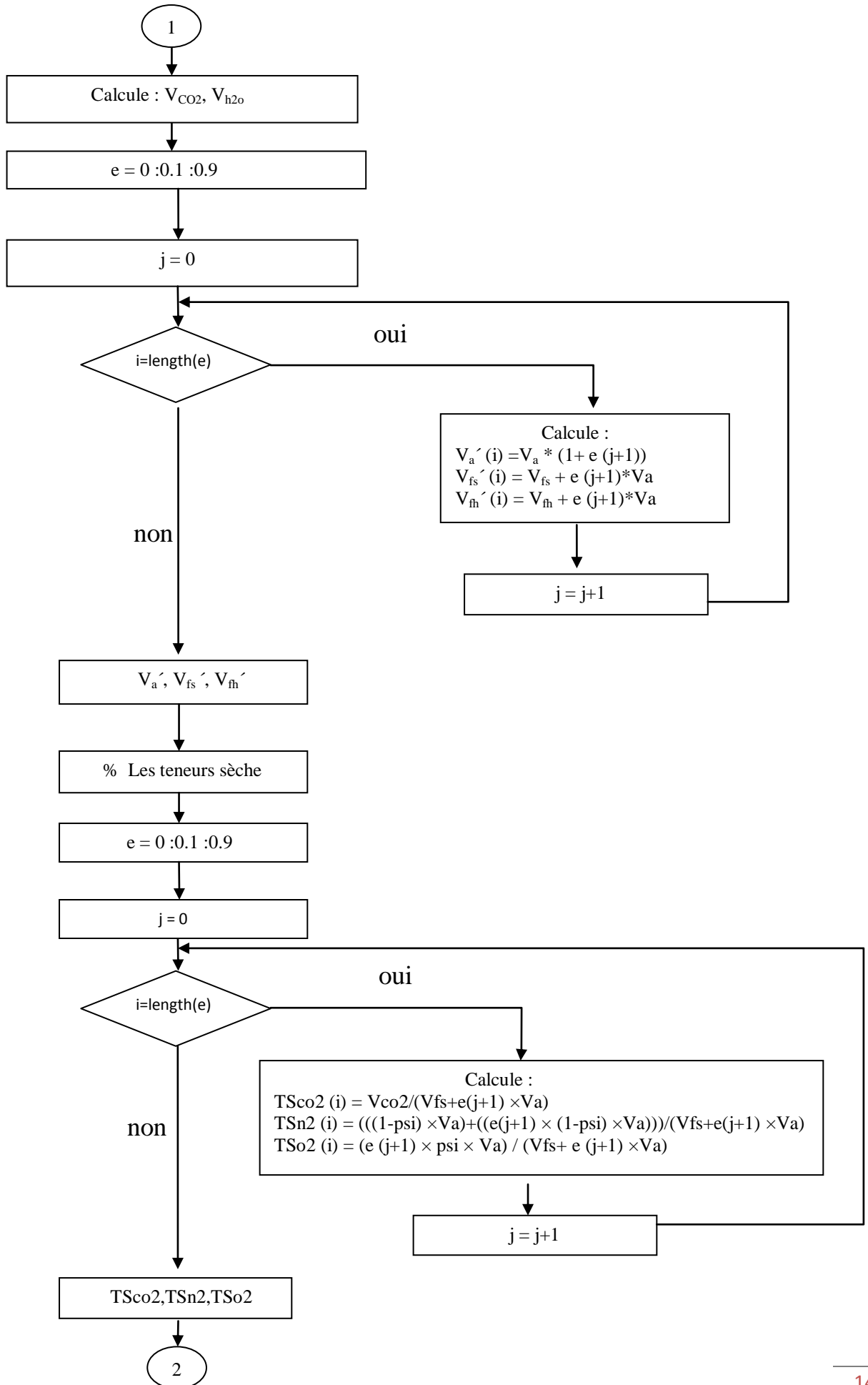
Excès d'air par pas 10 %.

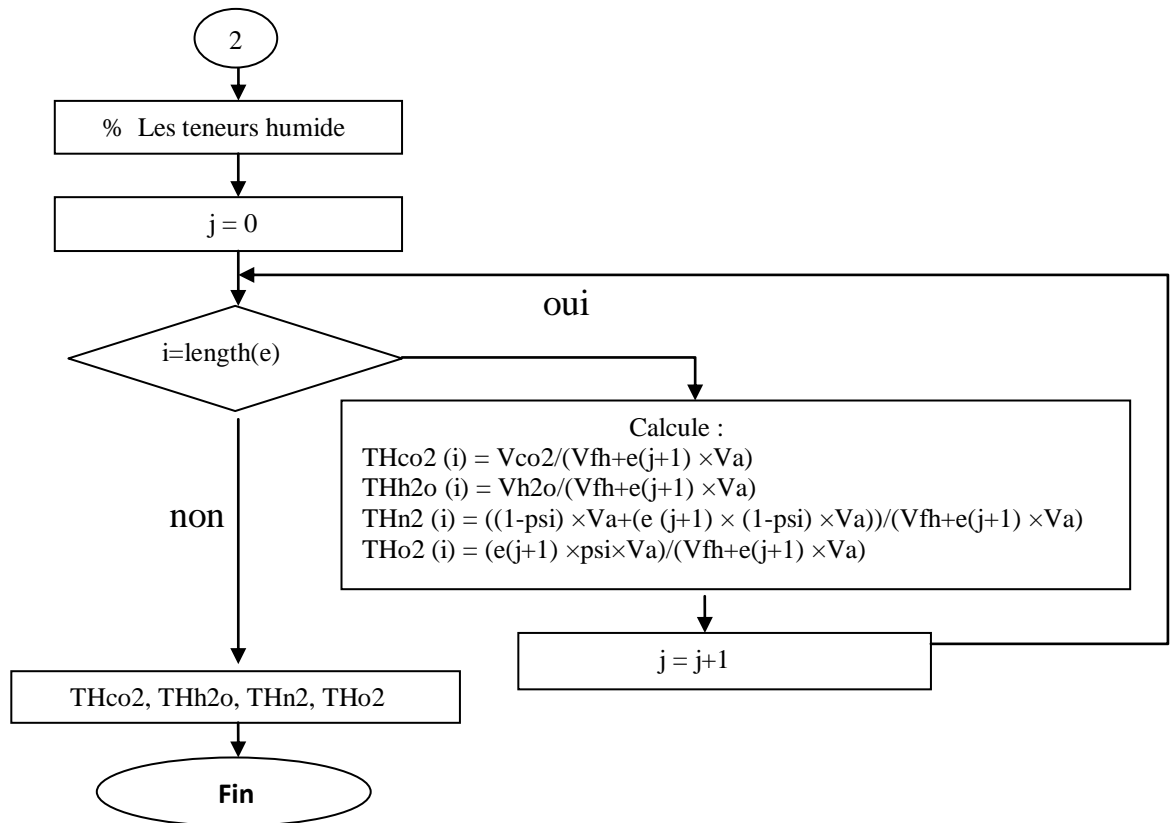
La richesse ( $\Psi = 0.21$ ).

#### III.1. Organigramme du programme :

Pour faciliter la compréhension du programme nous avons fait un organigramme simplifié qui représente les différentes étapes de calcul.







### III.2. Résultats et interprétation :

#### III.2.1 Calcul du pouvoir comburivore réel en fonction de l'excès d'air :

Après avoir calculé le pouvoir comburivore théorique nécessaire pour brûler le kérosène à la stœchiométrie, nous avons trouvé une valeur de  $78.5714 \text{ Nm}^3$  d'air pour (1) un  $\text{Nm}^3$  de kérosène.

Nous avons calculé le pouvoir comburivore réel en variant le taux d'excès d'air de 0% à 90% par pas de 10%.

Les résultats obtenus sont représentés sur le graphe suivant :

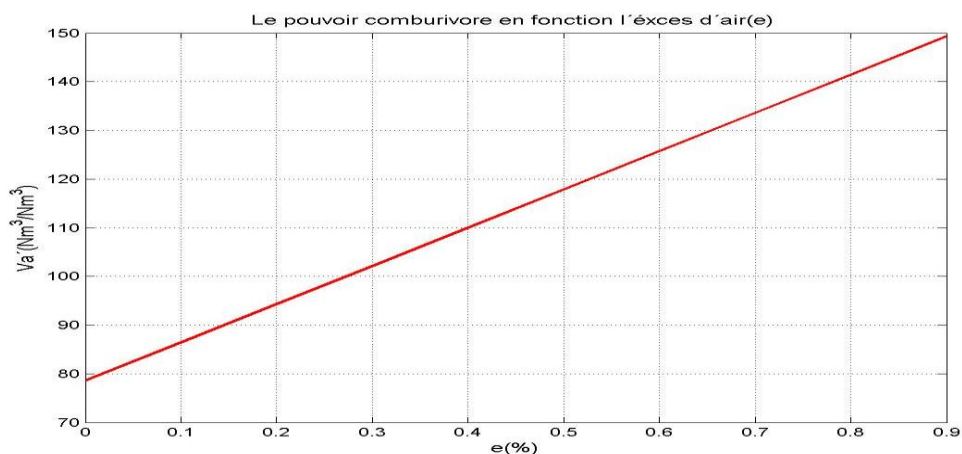


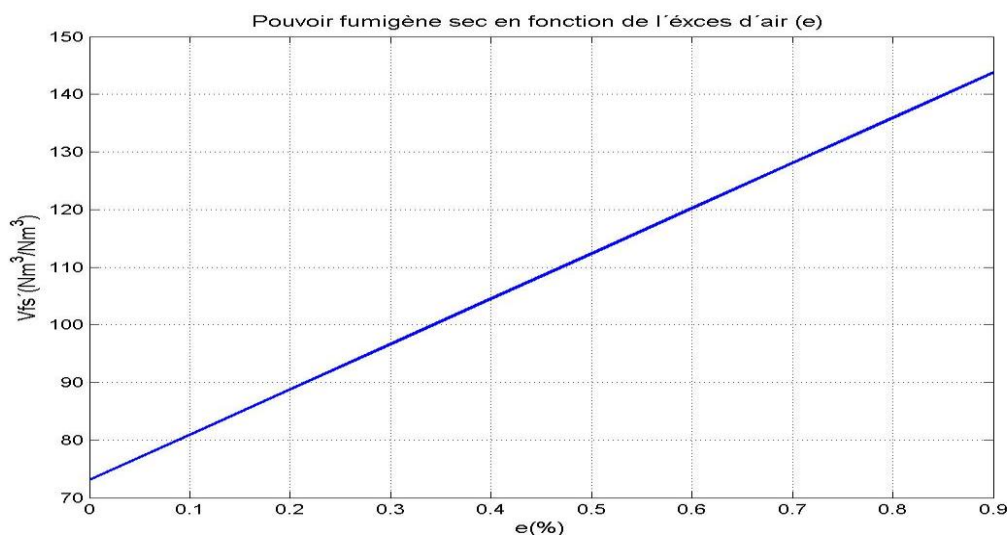
Figure III.1: L'évolution de pouvoir comburivore réel en fonction l'excès d'air.

On remarque dans la figure (1) une courbe linéaire croissante. Le pouvoir comburivore augmente en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de  $78.5714 \text{ Nm}^3$  d'air pour un excès d'air de 0% jusqu'à  $149.2857 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3)$  lorsque l'excès d'air atteint les 90%.

### III.2.2. Calcul du pouvoir fumigène sec réel en fonction de l'excès d'air :

Après avoir calculé le pouvoir fumigène sec théorique produit par la combustion théorique du kérosène, nous avons trouvé une valeur de  $84.0714 \text{ Nm}^3$  de fumée sec émis par (1) un  $\text{Nm}^3$  de kérosène.

Les résultats obtenus sont représentés sur le graphe suivant :



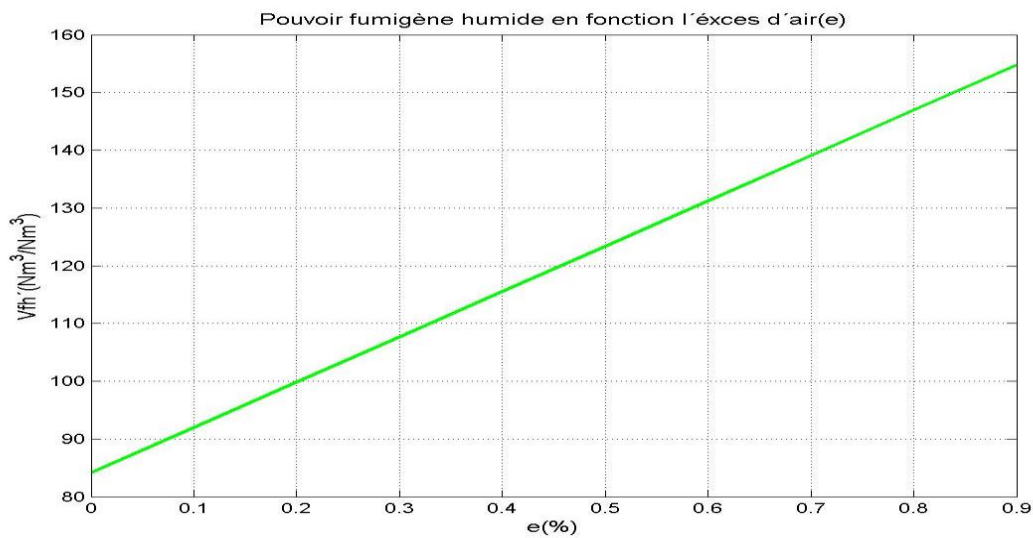
**Figure III.2:** courbe l'évolution de pouvoir fumigène sec en fonction l'excès d'air

On remarque dans la figure (2) une courbe linéaire croissante. Le pouvoir fumigène sec augmente en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de  $73.0714 \text{ Nm}^3$  d'air pour un excès d'air de 0% jusqu'à  $143.7857 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3)$  lorsque l'excès d'air atteint les 90%.

### III.2.3. Calcul du pouvoir fumigène humide réel en fonction de l'excès d'air :

Après avoir calculé le pouvoir fumigène humide théorique produit par la combustion théorique du kérosène, nous avons trouvé une valeur de  $84.0714 \text{ Nm}^3$  de fumée humide émis par (1) un  $\text{Nm}^3$  de kérosène.

Les résultats obtenus sont représentés sur le graphe suivant :



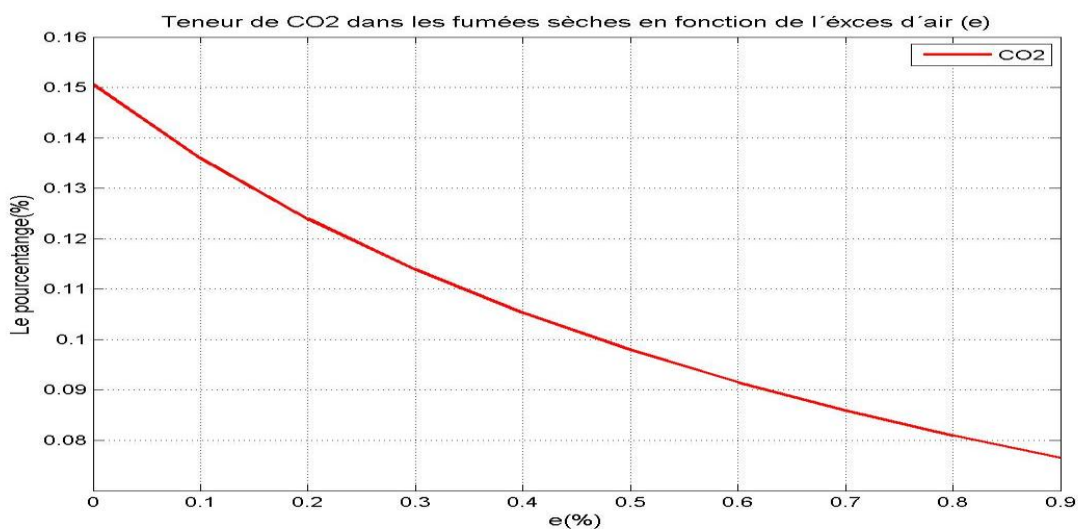
**Figure III.3: courbe l'évolution de pouvoir fumigène humide en fonction l'excès d'air.**

On remarque dans la figure (3) une courbe linéaire croissante. Le pouvoir fumigène humide augmente en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de 84.0714 Nm<sup>3</sup> d'air pour un excès d'air de 0% jusqu'à 154.7857 (Nm<sup>3</sup>/ Nm<sup>3</sup>) lorsque l'excès d'air atteint les 90%.

### III.3. Calcul les teneurs des fumées sèches et humides en fonction de l'excès d'air :

#### III.3.1 Les teneurs des fumées sèches :

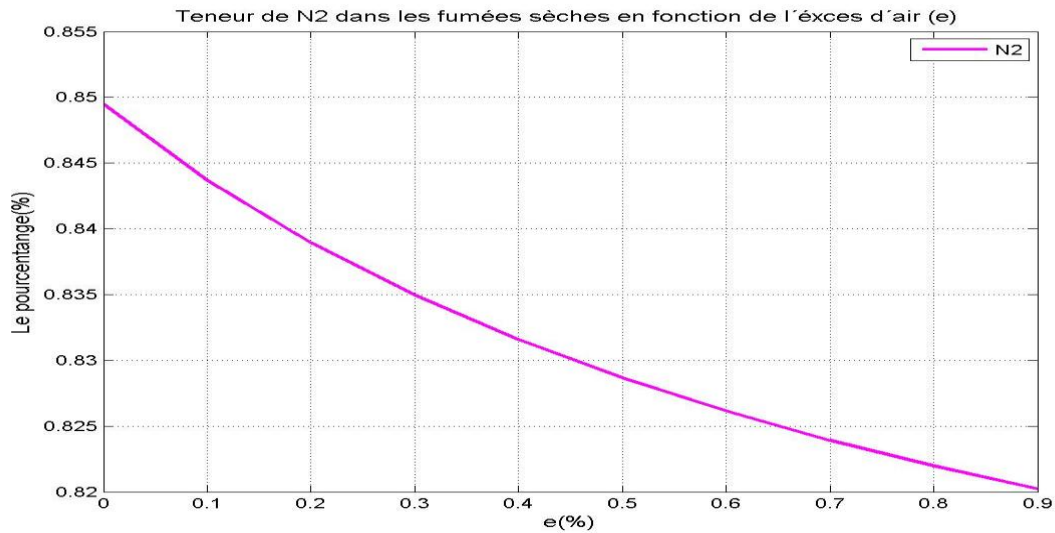
Lorsqu'il y a excès d'air on a les concentrations en CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Nous avons calculé la teneur de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> dans les fumées sèches en varions le taux d'excès d'air de 0% à 90% par pas de 10%



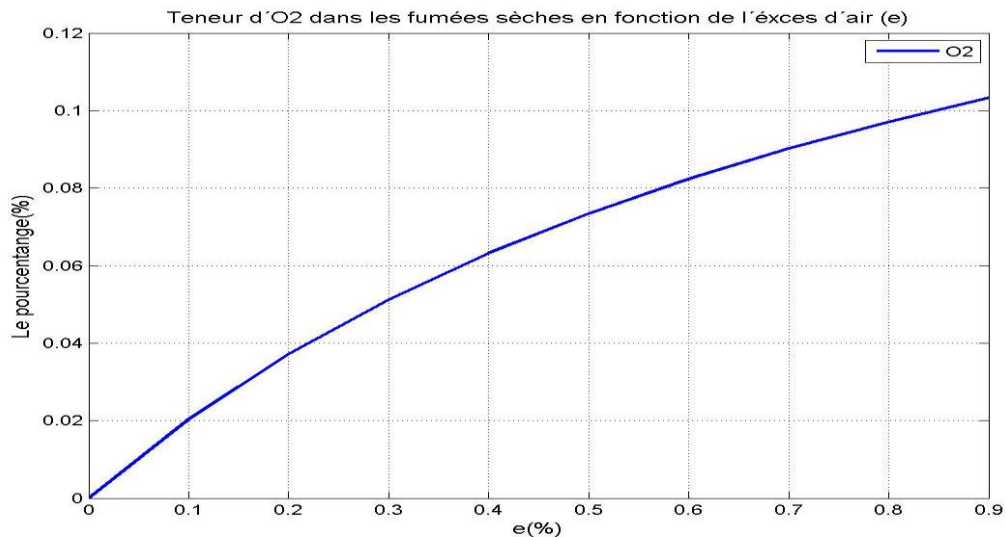
**Figure III.4: courbe d'évolution de teneur de CO<sub>2</sub> dans les fumées sèches en fonction de l'excès d'air**

On remarque dans la figure (4) une courbe décroissante. La teneur de  $\text{CO}_2$  dans les fumées sèches diminue en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de 0.15 (%) pour un excès d'air de 0% jusqu'à 0.06 (%) lorsque l'excès d'air atteint les 90%.

La figure (5) montre que la teneur de  $\text{N}_2$  dans les fumées sèches diminue en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de 0.8495 pour un excès d'air de 0% jusqu'à 0.82 (%) lorsque l'excès d'air atteint les 90%.



**Figure III.5: courbe d'évolution de teneur de  $\text{N}_2$  dans les fumées sèches en fonction de l'excès d'air**

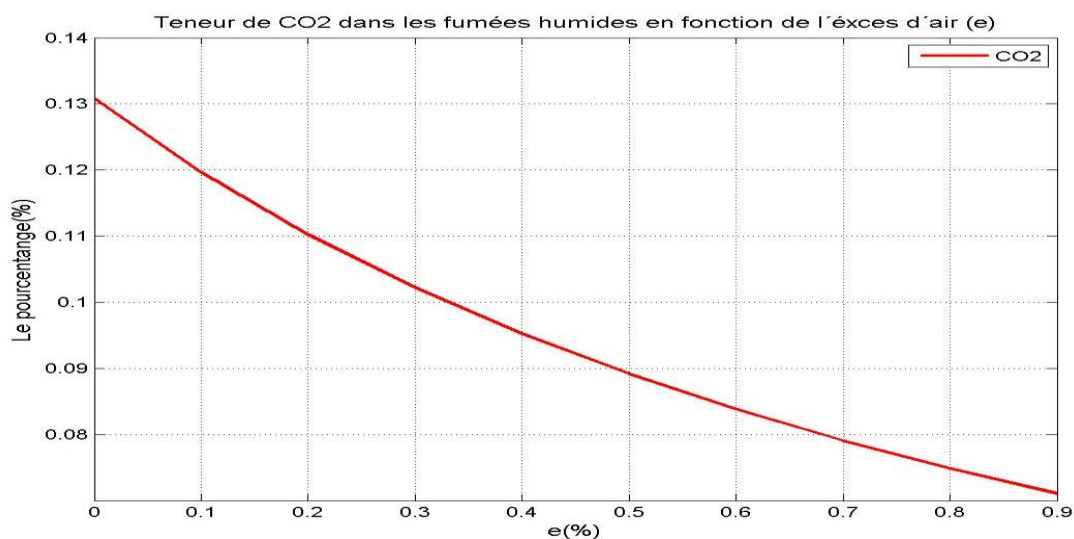


**Figure III.6: courbe d'évolution de teneur d' $\text{O}_2$  dans les fumées sèches en fonction de l'excès d'air**

On remarque dans la figure (6) une courbe croissante. La teneur d' $\text{O}_2$  dans les fumées sèches augmente en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de 0 (%) pour un excès d'air de 0% jusqu'à 0.1033 (%) lorsque l'excès d'air atteint les 90%.

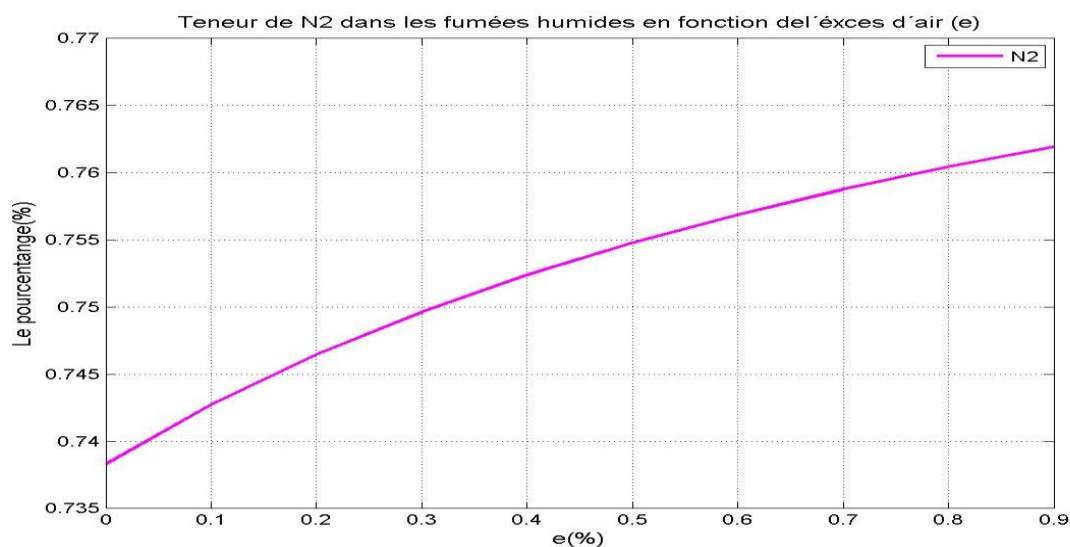
### III.3.2. Les teneurs des fumées humides :

Lorsqu'il y a excès d'air on a les concentrations en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , Nous avons calculé les proportions de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  dans les fumées humides en variant le taux d'excès d'air de 0% à 90% par pas de 10%.



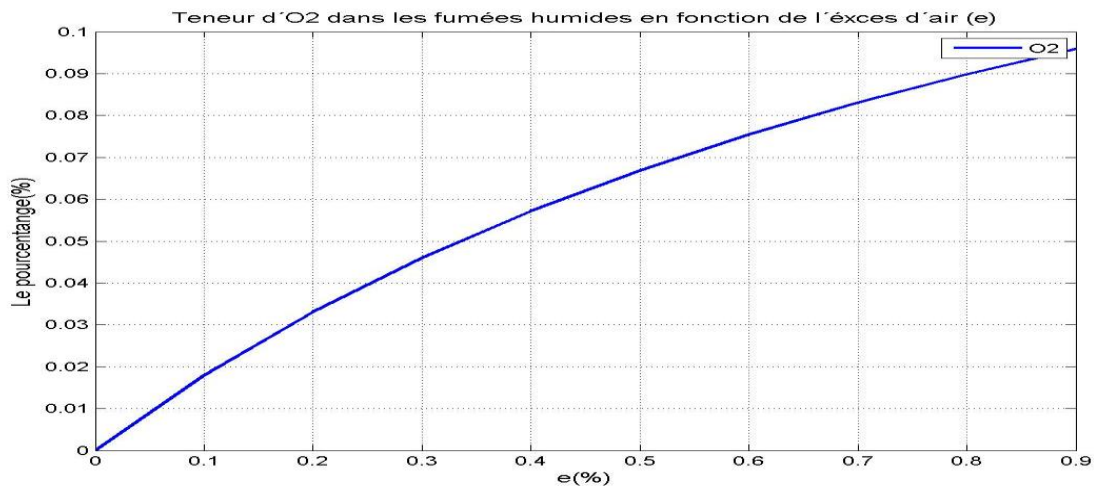
**Figure III.7: courbe d'évolution de teneur de  $\text{CO}_2$  dans les fumées humides en fonction de l'excès d'air**

On remarque dans la figure (7) une courbe décroissante. La teneur de  $\text{CO}_2$  dans les fumées humides diminue en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de 0.1308 (%) pour un excès d'air de 0% jusqu'à 0.0711 (%) lorsque l'excès d'air atteint les 90%.



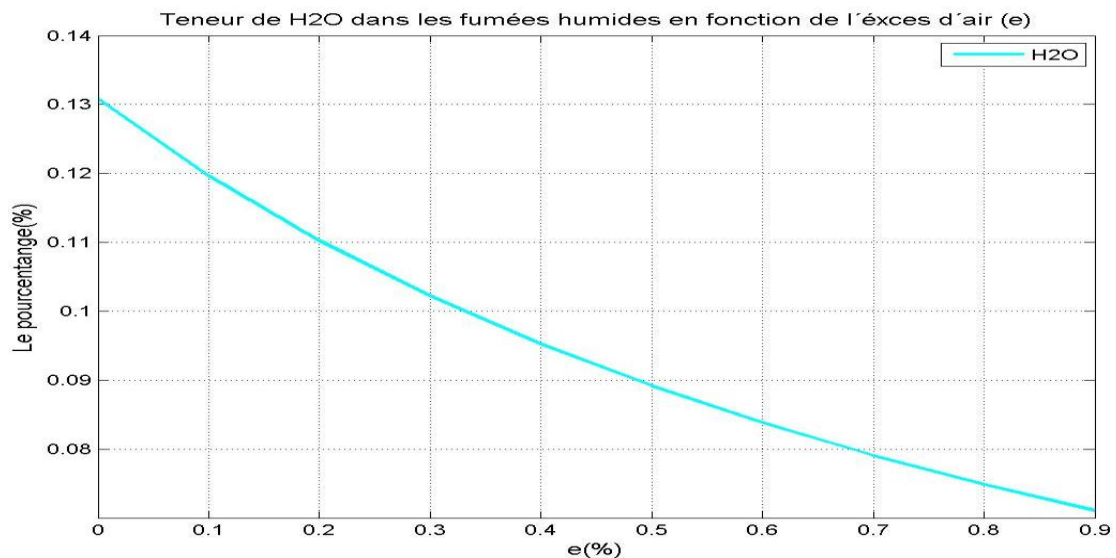
**Figure III.8: courbe d'évolution de teneur de  $\text{N}_2$  dans les fumées humides en fonction de l'excès d'air**

On remarque dans la figure (8) une courbe décroissante. La teneur de  $N_2$  dans les fumées humides diminue en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de 0.8495 (%) pour un excès d'air de 0% jusqu'à 0.82 (%) lorsque l'excès d'air atteint les 90%.



**Figure III.9: courbe d'évolution de teneur d'O<sub>2</sub> dans les fumées humides en fonction de l'excès d'air**

On remarque dans la figure (9) une courbe croissante. La teneur humide d'O<sub>2</sub> augmente en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de 0 (%) pour un excès d'air de 0% jusqu'à 0.0959 (%) lorsque l'excès d'air atteint les 90%.



**Figure III.10: courbe d'évolution de teneur de H<sub>2</sub>O dans les fumées humides en fonction de l'excès d'air**

On remarque dans la figure (10) une courbe décroissante. La teneur de H<sub>2</sub>O dans les fumées humides diminue en fonction de l'augmentation de l'excès d'air d'une valeur de 0.1308 (%) pour un excès d'air de 0% jusqu'à 0.0711 (%) lorsque l'excès d'air atteint les 90%.

Enfin d'après les résultats obtenus on peut dire que si on augmente l'excès d'air alors le volume comburivore réel et les volumes des fumées sèches et humides réels augmentent.

La concentration de  $O_2$  augmente elle aussi si on augmente l'excès d'air, contrairement aux concentrations de  $CO_2$  et la teneur de  $H_2O$  qui diminue, et on a remarqué que la concentration de  $N_2$  augmente dans le cas des fumées séchées et diminue dans le cas des fumées humides.

## Conclusion générale

---

La qualité de la combustion est particulièrement influencée par le changement de la composition du mélange combustible/air qui conditionne considérablement la production des émissions polluantes en hydrocarbures imbrûlés et en monoxyde de carbone. Le dosage combustible/ air est très important, car la réaction de combustion n'est pas réalisable en toutes proportions. La richesse du mélange est donc déterminante pour la qualité de la combustion, elle contribue au contrôle des produits de combustion et à réduire considérablement les émissions.

Dans ce travail on a défini la combustion ainsi que ses différents types puis nous avons présenté les équations pour le calcul des différents paramètres étudiés dans notre recherche et qui sont utilisées dans le troisième chapitre pour la réalisation du programme avec le logiciel Matlab.

On a vu que le pouvoir comburivore réel et le pouvoir fumigène sec et humide réel augmente en fonction de l'augmentation de l'excès d'air.

Enfin notre travail a permis d'identifier que la teneur de  $O_2$  augmente dans les deux fumées sèches et humides accompagnée avec une diminution dans la teneur de  $CO_2$  et  $H_2O$  mais la teneur de  $N_2$  augmente dans le cas des fumées humides et diminue dans le cas de fumées sèches.

---

## Références Bibliographiques

- [1] : Y.BARBIER. Dictionnaire du pétrole. Editions SCM. Paris (1980). ISBN-13: 978-2901133193. Page (271).
- [2] : JC. GUIBET. Carburants liquides, caractéristiques et principes généraux. BE 8543 Techniques de l'ingénieur, pp.1-2. 2011.
- [3] : JC. GUIBET, Carburants liquides, Caractéristiques et principes généraux. Montagne X (2011). ([www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire](http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire)).
- [4] : JP. FAVENNEC, Raffinage du pétrole. Tome 5. Exploitation et gestion de la raffinerie. ISBN13 : 978-2-7108-0742-1. Page (70,71).
- [5] : INRS, Fiche toxicologique "White-spirit". (1998), INRS. 5 p.
- [6] : ZM. AYISSI. Essai d'élaboration et analyse chimico-calorifique d'un biocarburant à base de manioc (2007). Mémoire de master DIPET II. École normale supérieure d'enseignement technique, Cameroun (Douala), 2007.74p.
- [7] : Union française des industries pétrolières. Pétro Dico. Le lexique de l'industrie pétrolière.2007; <http://www.ufip.fr> (UFIP : Siège social : 4, avenue Hoche, 75008 Paris).
- [8] : P. DAGAUT, A. EL BAKALI, A. RISTORI, The combustion of kérosène : Experimental results and kinetic modeling using 1 to 3 component surrogate mode fuels, Fuel, 2006, vol. 85, pp. 944-956.
- [9] : "Pétrole." Techniques de l'ingénieur Sources d'énergie hors nucléaire base documentaire : TIB21 DUO. 2010. Vol. ref.be8520, p. 1–24.
- [10] : I.SOCHET, F. FAUBERT, P. GILLARD., Combustion et explosion du kérosène : état de l'art, Combustion 1(4), pp. 229-254. (2001).
- [11] : Pétrole Lampant - Fiche de données de sécurité. Paris La Défense, Pétroles lampants - Edition : 1998. Total Raffinage Distribution, 1997.
- [12] : MTU, N. HYDRO et HEW constructeur d'électrolyseurs alcalins, joint venture. Ecole Nationale Polytechnique Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles (2007).
- [13] : Aide-mémoire de thermodynamique de l'ingénieur Énergétique Environnement. Dunod, Paris, 2004 ISBN 2 10 007154 8 .Page (239).
- [14] : K. K. KUI, J. WILEY & Sons, Principles of Combustion 2nd Ed, Inc, Interscience, ISBN 10: 0471046892 ISBN 13: 9780471046899. (2005).
- [15] : R.J. KEE, G. DIOXON-LEWIS, J. WARNATZ, M.E COLTRIN and J.A MILLE, A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties, SANDIA National Laboratoires.

---

[16] : E. PERTHUIS Combustion industrielle. (1983) Edition technip-paris ISBN 2-7108-0438-7. Page (70-85-165).

[17] : F. MAUSS. Combustibles liquides. . (1963) Edition technip 7, rue nélaton paris ISBN D8TE-2UL-YTGO. Page (152)

[18] : BOURAS FETHI, mémoire magister simulation numérique de la combustion non pré mélangés par la méthode.(2017).

[19] : C. GUILIE. Cours de combustion 1 ère partie. Notions. I rappels sur la structure de la matière et les forces naturelles (2013) et (2015). I-1 Généralités.

[20] : M.J. BURGESS and R.V. WHEELER, The lower limit of inflammation of mixtures of paraffin hydrocarbons with air. Journal of Chemical Society Transactions, XCIX – 2013:2030, 1911.