

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

\*\_\*\_\*\_\*\_\*\_\*

École Normale Supérieure

\*\_\*\_\*\_\*\_\*\_\*

Département de Physique

\*\_\*\_\*\_\*\_\*\_\*



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\_\*\_\*\_\*\_\*\_\*

Higher Teacher Training College

\*\_\*\_\*\_\*\_\*\_\*

Department of Physics

\*\_\*\_\*\_\*\_\*\_\*

**ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA STABILITÉ  
D'UNE FLAMME TURBULENTE DANS UN  
FOUR DE FONDERIE**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Professeur  
d'Enseignement Secondaire, 2<sup>ème</sup> grade (D.I.P.E.S. II)*

Par :

**TEUNEKEU TAPONDJOU Roméo Castro**

*Licencié en Physique*

*Matricule: 07W933*

Sous la Direction de :

**Docteur Marcel OBOUNOU**

*Chargé de Cours*

*Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Département de Physique*

*Année Académique 2015/2016*

## DÉDICACE

Je dédie ce travail à JÉHOVAH sans qui rien n'est possible.

Je dédie également cet humble travail à la mémoire de :

- Mme SONFACK Julienne, ma maman chérie qui m'est toujours la plus chère,
- Mr TEUNEKEU Jean Marie, son époux bien-aimé,
- Mlle DONKEN Rosine, ma petite sœur.

Tout le mérite leur revient pour leurs sacrifices, leur affection et leur amour. Que Dieu le Père tout puissant ait pitié de leur âme.

Un succès dans la vie s'obtient par un travail courageux et plein de volonté, par un amusement dans un milieu familial, amical et social et par une ferme conviction et croyance. Tous dans une atmosphère paisible et tranquille.

## REMERCIEMENTS

Je commence tout naturellement par remercier **Docteur Marcel Brice OBOUNOU AKONG**, mon directeur de mémoire.

Merci de m'avoir encadré tout au long de ce travail et de m'avoir fait confiance. J'ai beaucoup appris à votre contact et pas seulement dans le domaine de la combustion. Aujourd'hui, je ne suis plus tout à fait le même qu'il y a deux ans. Je pense avoir mûri et c'est en partie grâce à vous. Ce fût une chance d'avoir un « chef » aussi compétent que vous mais surtout aussi humain et compréhensif. Votre humanisme et votre dévouement m'ont permis de travailler sereinement et avec enthousiasme sur une thématique porteuse et passionnante. Pour tout cela, je vous exprime ma profonde gratitude.

Je tiens également à remercier **Arnaud** et **Junior** pour leurs disponibilités, leurs conseils, leurs suggestions. Je salue en eux leurs minuties et leurs diligences. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma respectueuse gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements à :

- Tous les enseignants du département de Physique en particulier et tous les départements de l'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé en général pour toutes les connaissances et la formation qu'ils m'ont transmis jusqu'ici.
- Mes Camarades de promotion, pour les moments de joie et de dures épreuves que nous avons eu à partager et pour toute l'attention et la chaleur familiale dont ils ont fait preuve à mon égard. Je pense à Emmanuel, Éric, Franklin, Crépin, Inès, Juliette, Sonia, Honorine, Ebénézer, les deux délégués de promotion pour ne citer que ceux-là.
- Toutes les personnes que j'ai dû embêter pour tel ou tel problème, qui m'ont aidé et sans qui je n'aurais jamais avancé.
- Ma famille pour leur éducation, leur dévouement, leur amour et pour leur soutien précieux et inconditionnel et leur appui indéniable dans les moments difficiles. Ce travail est aussi, à sa façon, le leur, car j'ai pu parvenir à l'aboutissement de cette étape de ma vie, grâce à leur amour et leur attention. Je leur voue une gratitude infinie.

J'ai dû oublier certaines personnes qui, je l'espère, comprendront que c'est bien involontaire.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vi
NOMENCLATURE .....	vii
LISTE DES FIGURES .....	x
LISTE DES TABLEAUX .....	xii
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : GÉNÉRALITES SUR LES FOURS ET LES FLAMMES DE COMBUSTION..</b>	<b>3</b>
Introduction .....	4
I-1 Généralités sur les fours.....	4
I-1-1 Les fours électriques .....	5
I-1-2 Les fours à combustible.....	7
I-2 Généralités sur les flammes de combustion.....	9
I-2-1 Définition de la combustion.....	9
I-2-2 Types de combustion .....	11
I-2-3 La combustion complète et incomplète.....	15
I-2-4 Les Applications industrielles de la combustion.....	16
I-2-5 Processus de combustion multiphasique des solides .....	16
I-2-6 Les modes de transfert thermique.....	19
I-3 Coques de noix de palmistes.....	22
I-3-1 Présentation .....	22
I-3-2 Propriétés des coques noix de palmistes.....	23
I-4 Notion de stabilité d'une flamme.....	26
Conclusion partielle.....	27
<b>CHAPITRE II : LES OUTILS THÉORIQUES ET LES OUTILS NUMÉRIQUES.....</b>	<b>28</b>
Introduction .....	29

II-1 Les outils théoriques de la combustion multiphasique .....	29
II-1-1 Equations de l'aérothermochimie .....	29
II-2 Les outils numériques utilisés pour la combustion multiphasique des solides.....	39
II-2-1 Logiciel GAMBIT.....	39
II-2-2 Logiciel FLUENT .....	40
II-3 Description géométrique du four et paramètres de fonctionnement.....	43
II-3-1 Description du dispositif expérimental .....	43
II-3-2 Paramètres de fonctionnement .....	45
II-3-3 Construction du maillage .....	47
Conclusion partielle.....	47
<b>CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>48</b>
Introduction .....	49
III-1 Résultats de la stabilité de la flamme .....	49
III-2 Variation des paramètres de contrôle de la stabilité de la flamme .....	54
III-2-1 Variation des vitesses des gaz à l'entrée .....	54
III-2-2 Variation des températures des gaz à l'entrée .....	56
Conclusion partielle.....	59
<b>CHAPITRE IV : IMPLICATION SUR LE SYSTÈME ÉDUCATIF .....</b>	<b>60</b>
Introduction .....	61
IV-1 Le lien avec le programme du secondaire.....	61
IV-2 Application dans le four de fonderie.....	62
Conclusion partielle.....	62
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>63</b>
PERSPECTIVES.....	64
<b>BIBLIOGRAPHIES ET RÉFÉRENCES.....</b>	<b>65</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>68</b>

## RÉSUMÉ

La croissance démographique et l'expansion industrielle demandent de l'énergie en quantité importante. Cependant, la question est qu'il existe de grandes quantités de résidus de la biomasse qui restent non utilisées alors qu'elles constituent une réserve. Il se pose alors un problème de recyclage de la biomasse via le traitement de ces déchets. Le présent travail d'initialisation à la recherche nécessaire à ce souci, est consacré à optimiser le fonctionnement d'un four de fonderie de combustion à palmiste par l'identification des paramètres influents et l'étude de la stabilité de la flamme à travers deux paramètres de contrôle. Ces deux paramètres de contrôle pris dans cette étude sont la vitesse des gaz à l'entrée et la température des gaz à l'entrée, les gaz à l'entrée étant l'air et le fuel. Pour aborder et résoudre cette situation, les généralités sur les fours et sur les flammes de combustion ont été présentées, Les analyses élémentaire, immédiate et chimique des échantillons de coques de noix de palmistes ont été présentées, la notion de la stabilité de la flamme a été étudiée, les outils théoriques et numériques ont été étudiés et les résultats numériques ont été présentés. A propos de ces résultats, le logiciel **Gambit** a servi pour le maillage du four et le logiciel de calcul **Fluent** a servi pour la résolution, la simulation numérique et la présentation des résultats de la stabilité de la flamme c'est-à-dire les résultats des champs de température et de la fraction massique des espèces ainsi que les résultats servant à optimiser (la moyenne des valeurs minimales et maximales des paramètres pour chaque cas) la stabilité de la flamme en fonction de la variation des deux paramètres de contrôle. La variation des valeurs des paramètres de contrôles de la stabilité de la flamme entraîne l'augmentation (lorsque la vitesse augmente) et la diminution (lorsque la température augmente) de la flamme.

**Mots clés** : Combustion multiphasique, four, stabilité de la flamme, coques de noix de palmistes, Simulation numérique.

**ABSTRACT**

Demographic growth and the industrial expansion require energy in significant quantity. However, the question is that there are great quantities of residues of the biomass which remain not used whereas they constitute a reserve. It then poses a problem of recycling of the biomass by the intermediary of the treatment of this waste. This work of initialization at research necessary to this concern is devoted to optimize the operation of a furnace of foundry of combustion to cabbage tree by the identification of the influential parameters and the study of the stability of the flame through two parameters of control. These two parameters of control taken in this study are the speed of gases at the entry and the temperature of gases at the entry, the gases at the entry being the air and fuel. To approach and solve this situation, the general information on the furnaces and the flames of combustion was presented, the analyses elementary, immediate and chemical of the samples of nut hulls of cabbage trees were presented, the notion of the stability of the flame was studied, the theoretical and numerical tools were studied and the numerical results were presented. In connection with these results, the **Gambit** software was useful for the grid of the furnace and the computation software **Fluent** was useful for the resolution, the digital simulation and the presentation of the results of the stability of the flame i.e. the results of the fields of temperature and the mass fraction of the species as well as the results serving to optimize (the average of the minimal and maximum values of the parameters for each case) the stability of the flame according to the variation as the two parameters of control. The variation of the values of the parameters of controls of the stability of the flame involves the increase (when speed increases) and the reduction (when the temperature increases) flame.

**Key words:** Multiphasic combustion, furnace, stability of the flame, nut hulls of cabbage trees, Digital simulation.

## NOMENCLATURE

### Lettres romaines

$E$  : Energie d'activation [ $\text{J.mol}^{-1}$ ];

$h_t$  : Enthalpie massique totale [ $\text{J.kg}^{-1}$ ];

$K$  : énergie cinétique de la turbulence [ $\text{m}^2.\text{s}^{-2}$ ];

$R$  : Constante des gaz parfaits [ $\text{J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ];

$P$  : Pression [Pa];

$T$  : Température [K];

$u_i$  : Vitesse instantanée dans la direction  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) [ $\text{m.s}^{-1}$ ];

$u''_i$  : Fluctuation de vitesse selon Favre [ $\text{m.s}^{-1}$ ];

$\tilde{u}_i$  : Vitesse moyenne selon Favre [ $\text{m.s}^{-1}$ ];

$Y_i$  : Fraction massique de l'espèce  $i$  ;

$\tilde{Y}_i$  : Fraction massique moyenne selon Favre de l'espèce  $i$  ;

$J_u$  : Flux de diffusion de la quantité de mouvement [W];

$J_{h_t}$  : Flux de diffusion de l'énergie [W] ou [ $\text{J.s}^{-1}$ ];

$J_{Y_i}$  : Flux de diffusion des espèces [W];

$D_i$  : Diffusivité moléculaire de l'espèce  $i$  [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ];

$S_u$  : Terme source de la quantité de mouvement ;

$S_{h_t}$  : Terme source de l'énergie ;

$S_{Y_i}$  : Terme source des espèces ;

$a_g$  : Surface spécifique [ $\text{m}^2$ ];

$k_m$  : Coefficient de transfert de masse [ $\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ ];

$M_{\text{H}_2\text{O}}$  : Masse molaire de l'eau [ $\text{mol.kg}^{-1}$ ];

$T_g$  : Température du gaz [K];

$T_p$  : Température de surface [K];

$p_{\text{eau, surf}}$  : Pression de la vapeur saturante de l'eau à la surface du solide [Pa];

$p_{\text{eau, } \infty}$  : Pression partielle en vapeur d'eau dans le gaz [Pa];

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ )

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $Wm^{-2} \circ C^{-1}$ )

### **Lettres grecques**

$\tau$  : Tenseur des contraintes visqueuses [Pa];

$\varepsilon$  : Taux de dissipation de l'énergie cinétique [ $m^2.s^{-3}$ ];

$\phi$  : Flux de chaleur transmis par convection [ $W.m^{-2}$ ];

$\mu_t$  : Viscosité dynamique turbulente [ $kg.m^{-1}.s^{-1}$ ] ou [Pa.s];

$\delta_{ij}$  : Symbole de Kronecker ;

$\rho$  : Masse volumique [ $kg.m^{-3}$ ];

$\bar{\rho}$  : Masse volumique moyenne [ $kg.m^{-3}$ ] ;

$\dot{\omega}_i$  : Taux de consommation ou de production de l'espèce  $i$  ;

$\widetilde{\omega}_i$  : Taux de production ou de consommation moyen de l'espèce  $i$  ;

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $Wm^{-1} \circ C^{-1}$ )

$\varphi$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\phi$  : Flux de chaleur transmis par convection (W) ;

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67.10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$ ) ;

$\varepsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface.

### **Indices**

G : Gaz ;

p : Particule ;

p,0 : Particule avant la pyrolyse ;

v, 0; w, 0 volatiles initiales.

### **Abréviations et acronymes**

C, H, O, N et S : Carbone, Hydrogène, Oxygène, Azote et Soufre ;

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur ;

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur ;

1-D : une dimension ; 2-D : deux dimensions ; 3-D : trois dimensions ;

m/s : mètre par seconde ;

UDF : user define fonction ;

GES : gaz à effet de serre.

DTRM: Discret Transfer Radiation model

S2S: surface to surface

DO: Discret Ordinary

PDF: Probability Density Function

DPM: Discret Phase Model

CFD: Computational Fluid Dynamics

SI: Système International

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Four à arc électrique .....	5
Figure 2 : Four à induction sans noyau .....	6
Figure 3 : Four à induction à canal.....	7
Figure 4 : Four rotatif .....	7
Figure 5 : Coupe schématique d'un four rotatif.....	8
Figure 6 : Schéma d'un cubilot à gauche et Coupe schématique d'un cubilot à droite .....	9
Figure 7 : Réaction chimique de combustion.....	10
Figure 8 : Le tétraèdre du feu .....	11
Figure 9 : Une première classification de la combustion, basée sur les vitesses .....	11
Figure 10 : Une deuxième classification de la combustion, basée sur l'absence et la présence de la flamme .....	12
Figure 11 : La flamme et ses zones .....	13
Figure 12 : Flamme d'un bec de gaz laminaire.....	14
Figure 13 : Flamme de diffusion (Photo à gauche).....	14
Figure 14 : Flamme d'un bec de gaz turbulent .....	15
Figure 15 : Applications pratiques des types de combustion.....	15
Figure 16 : Modes de transfert de chaleur.....	20
Figure 17 : (a) Noix de palme, (b) noix de palmiste et (c) coques de noix de palmistes .....	23
Figure 18 : Stabilisation de la flamme .....	26
Figure 19 : Zone de recirculation .....	27
Figure 20 : Schéma d'injection des particules dans le four .....	37

Figure 21 : Exemple de maillage d'un demi-four réalisé dans Gambit ..... 40

Figure 22 : Interface de Fluent ..... 42

Figure 23 : Les étapes de la simulation numérique ..... 43

Figure 24 : Dispositif expérimental utilisé ..... 44

Figure 25 : Vue en coupe et vue d'ensemble de l'unité pilote (échelle 1 :20) ..... 44

Figure 26 : Figure du maillage du four de fonderie. .... 47

Figure 27 : Courbes de convergence ..... 50

Figure 28 : Champ de température ..... 51

Figure 29 : Champ de vitesse ..... 51

Figure 30 : Champ de la fraction massique du dioxygène ..... 52

Figure 31 : Champ de la fraction massique du dioxyde de carbone..... 52

Figure 32 : Champ de la fraction massique du monoxyde du carbone ..... 53

Figure 33 : Champ de la fraction massique des matières volatiles ..... 53

Figure 34 : Champs de la température en fonction de la variation de la vitesse de l'air à l'entrée  
du four. .... 54

Figure 35 : Champs de la température en fonction de la variation de la vitesse du fuel à  
l'entrée du four..... 55

Figure 36 : Champs de température en fonction de la variation de la température d'air à  
l'entrée du four..... 57

Figure 37 : Champs de température en fonction de la variation de la température du fuel à  
l'entrée du four..... 58

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Analyses de base des coques de noix de palmistes .....	24
Tableau 2 : Analyse élémentaire des coques de noix de palmistes .....	24
Tableau 3 : Analyses thermiques des coques de noix de palmistes .....	25
Tableau 4 : Analyses thermiques et chimiques des métaux dans les coques de noix de palmistes.....	25
Tableau 5 : Les paramètres de modélisation du modèle k- $\epsilon$ .....	32
Tableau 6 : Caractéristiques de fonctionnement du cubilot .....	45
Tableau 7 : Analyse élémentaire des coques de noix de palmistes .....	45
Tableau 8 : Analyse immédiate des coques de noix de palmistes.....	46
Tableau 9 : Valeurs des paramètres d'air à l'entrée du four.....	49
Tableau 10 : Valeurs des paramètres du fuel à l'entrée du four. ....	49
Tableau 11 : Valeurs des paramètres à la sortie du four. ....	50



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La croissance de la population mondiale, le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation se traduisent par une demande d'énergie en forte expansion. Or la prise de conscience à l'échelle mondiale illustre que le développement des populations et la protection de l'environnement doivent se faire de manière durable. Pour le développement durable, les scientifiques et les industriels ne cessent de réfléchir face à ce défi pour intervenir positivement pour un apport d'énergie supplémentaire. La solution n'est certainement pas unique et passe par le développement de l'exploitation de diverses énergies renouvelables, dont la plus courante est l'énergie stockée sous forme de biomasse. La valorisation énergétique de la biomasse apparaît comme une alternative séduisante aux énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz), elle présente de nombreux avantages, de par sa disponibilité et sa neutralité en terme de pollution (principalement CO<sub>2</sub>), d'un intérêt de plus en plus important, notamment en raison du désir, de créer les emplois, de réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES). A priori, la biomasse est inépuisable et perturbe moins l'environnement que les énergies fossiles.

Le terme "biomasse" désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante englobant la matière organique d'origine animale, végétale et humaine mais aussi les résidus organiques générés par l'activité humaine comme les ordures ménagères et les boues de station d'épuration. La biomasse est très abondante sur la planète et existe sous différentes formes naturelles (bois, algues) ou résulte d'activités agricoles (cultures énergétiques et sous-produits des cultures alimentaires) ou d'élevages (lisiers, fumiers). Le bois est la forme la plus utilisée actuellement dans le monde. Les filières de conversion énergétique de la biomasse sont nombreuses. Elles reposent essentiellement sur deux familles : la voie biochimique et la voie thermochimique. Ici, nous nous intéressons à un phénomène de conversion thermochimique de la biomasse qui est la combustion.

La combustion des produits issus de la biomasse est de nos jours un axe de recherche fort apprécié. En effet, comparativement aux produits fossiles, le bilan gazeux en terme de CO<sub>2</sub> (gaz à effet de serre) produit lors de la combustion est nul. Le combustible libérant dans l'atmosphère le gaz carbonique retiré de celui-ci pendant la photosynthèse. Le gaz carbonique CO<sub>2</sub> est donc neutre pour ces sources d'énergie renouvelable.

Cependant, la question est qu'il existe de grandes quantités de résidus de la biomasse qui restent non utilisées alors qu'elles constituent une réserve. Il se pose alors un problème de recyclage de la biomasse via le traitement de ces déchets. Néanmoins, la mise sur pied d'une unité de production technologique de conversions énergétiques appropriées de ces résidus solides au regard de leur potentiel énergétique peut satisfaire une partie considérable de la demande en énergie. Au regard de cette disponibilité, la valorisation des déchets obtenus après extraction de l'huile de palme et de palmiste à savoir les coques de noix de palmistes,

pouvait ainsi être envisagée dans le domaine de la métallurgie dans un four de fonderie d'acier à combustion de palmiste [5]. Ces combustibles issus de la biomasse étant dans ce cas employés comme ingrédients par excellence pour la production de la chaleur dans les foyers en vue de faire fondre les métaux en présence d'une flamme. La disponibilité des coques de noix de palmistes dans le monde étant réelle, (Sud-Est Asiatique, Afrique) en général et Cameroun en particulier. Ce mode de traitement par la combustion de nos jours pour valoriser les coques de noix de palmistes permet de produire dans le four une flamme favorable.

L'objectif général de ces travaux étant l'optimisation du fonctionnement d'un four de fonderie, les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Identifier les paramètres influents sur la stabilité de la flamme dans un four de fonderie.
- Étudier numériquement la stabilité de la flamme dans un four de fonderie à travers deux paramètres de contrôle.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de réaliser un calcul 3-D d'un four de fonderie. Ce dernier a été réalisé en 1-D par le Docteur EPESSE (2015) [6], dont le travail a porté sur la valorisation de la biomasse par utilisation des coques de noix de palmistes comme combustible alternatif aux cokes métallurgiques dans un four de fusion de la ferraille. On veut avoir une position optimum de la flamme dans le four et également ajuster cette flamme pour que le four fonctionne dans les bonnes conditions de stabilité de la flamme à travers la maîtrise et la fixation des paramètres de contrôle de combustion multiphasique dans le four à l'aide de l'utilisation couplée des logiciels de calculs **GAMBIT** pour le maillage et **FLUENT** pour la résolution et les résultats.

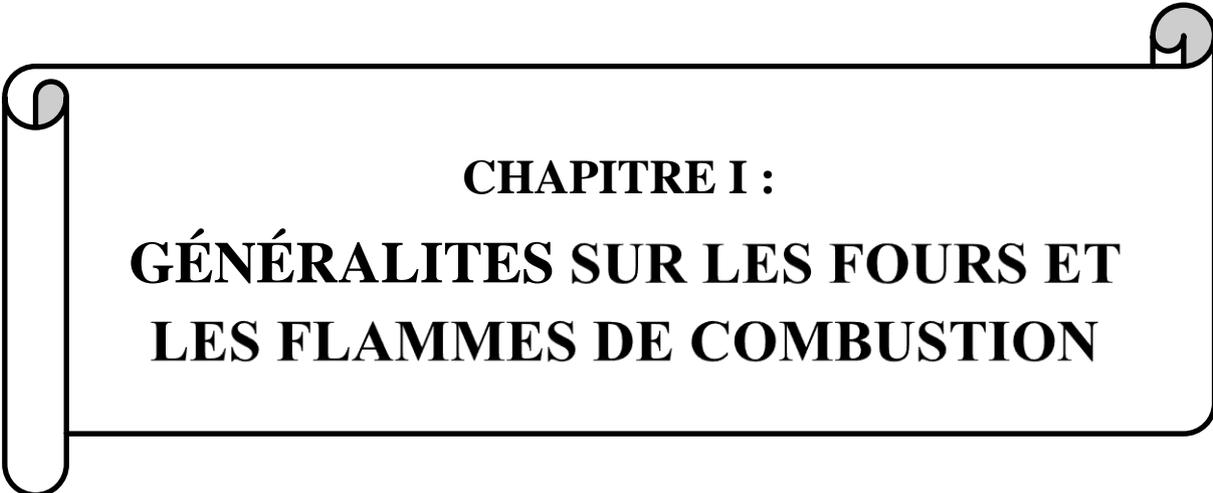
Nos travaux se décomposent en quatre parties :

Le premier chapitre précise le cadre de l'étude sur les généralités en décrivant le fonctionnement de certains fours de combustion, en présentant les flammes de combustion et en présentant les processus de combustion des solides. Ce chapitre présente aussi les propriétés des coques de noix de palmistes et la notion de la stabilité de la flamme.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les outils théoriques, ainsi que les outils numériques que nous avons utilisés pour résoudre notre problème.

Le troisième chapitre intitulé "résultats et discussions" constitue la clé de voute de ce travail. Il présente les résultats de la stabilité de la flamme et les résultats de cette stabilité de la flamme correspondant à la variation de deux paramètres de contrôle de la stabilité de la flamme. Tous ces résultats sont accompagnés de différentes discussions.

Le quatrième et dernier chapitre présente le lien entre ce travail mené et le métier d'enseignement du secondaire.



**CHAPITRE I :**  
**GÉNÉRALITES SUR LES FOURS ET**  
**LES FLAMMES DE COMBUSTION**

## Introduction

Une flamme est un écoulement d'espèces solides, liquides ou généralement gazeuses en cours de réaction chimique ; cette réaction qui s'accompagne le plus souvent d'un fort dégagement de chaleur, s'appelle la combustion.

L'étude des flammes est pluridisciplinaire (chimie, mécanique des fluides, thermodynamique, modélisation informatique, physique des systèmes dynamiques...). La combustion de la biomasse en présence de l'air passe par différentes phases en fonction des températures atteintes. Elle est caractérisée par un ensemble de réactions chimiques, généralement exothermiques, rapides. Globalement, son mécanisme de cinétique chimique se traduit par

Combustible + comburant  $\rightarrow$  produit de la réaction ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) + chaleur (énergie)

Dans ce chapitre il est question de présenter les généralités sur les fours, les généralités sur les flammes de combustion en précisant le processus de combustion multiphasique des solides, les caractéristiques des coques de noix de palmistes et la notion de stabilité d'une flamme.

### I-1 Généralités sur les fours

Un four est un appareil destiné à chauffer une matière à très haute température, pour opérer une transformation physique ou chimique. C'est un outil de production, destiné à élaborer ou transformer des matériaux grâce aux transferts thermiques entre une source de chaleur et la matière à traiter. Les dimensions et formes des fours varient beaucoup d'une application à une autre. L'opération du four peut s'effectuer soit en mode continu, soit en mode discontinu. Le mode opératoire du four est intimement lié à la planification d'une production escomptée. Certains paramètres peuvent affecter l'efficacité globale énergétique ou encore la productivité du four [6] tels que :

- le dimensionnement du four,
- la puissance et la position du ou des brûleurs,
- le type de combustible, le type de flamme,
- la qualité d'isolation des réfractaires,
- la masse, la forme et la position du solide,
- l'ordre et la durée relative des différentes opérations incluses dans la fournée,
- le préchauffage de l'air de combustion et du combustible,
- la quantité d'air en excès au brûleur, l'oxygène d'enrichissement,
- la pression statique dans le four au niveau de la perte par les flammes ou par l'air d'infiltration,
- l'ouverture des portes du four,
- le brassage en continu à l'azote.

Enfin, le contrôle du four peut s'effectuer manuellement ou en mode automatique.

Notre travail porte essentiellement sur les fours de fusion du métal.

Le choix d'un four de fusion est un aspect important de l'élaboration d'un procédé de fonderie. En effet, chaque type de four possède des propriétés qui lui sont propres en ce qui concerne ses besoins en alimentation et ses possibilités d'alliage. Ceux-ci auront à leur tour des répercussions sur l'ensemble du procédé de fonderie. D'un autre côté, le type de métal à fondre détermine quel four peut ou ne peut pas être utilisé. On différencie deux fonctions principales des fours soit : la refonte du métal solide et le maintien du métal liquide à une température appropriée pour la coulée. Nous nous intéressons plus particulièrement dans ce travail à la refonte du métal. Son opération peut s'effectuer soit en mode continu, chargement et prélèvement du métal à intervalles réguliers, soit en mode discontinu avec chargement, fusion, maintien et coulée de la quasi-totalité du métal.

## I-1-1 Les fours électriques

### I-1-1-1 Le four à arc électrique

C'est un four à fusion par lot se composant d'un corps garni de réfractaire en forme de grand bol avec une sole en forme d'assiette. La forme large du four permet la manipulation de charges volumineuses de matériau et entraîne des réactions efficaces entre le laitier et le métal.

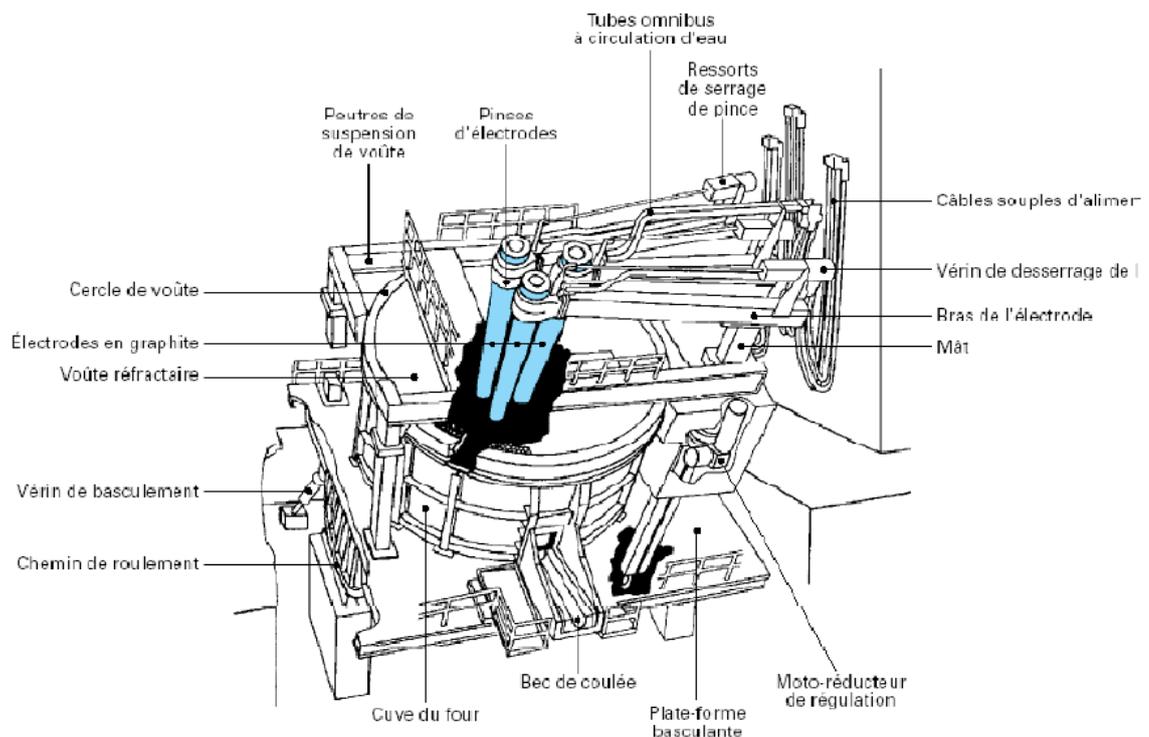


Figure 1 : Four à arc électrique [6]

### I-1-1-2 Le four à induction

Il utilise un puissant champ magnétique créé par le passage d'un courant électrique à travers une bobine enroulée autour du four. Le champ magnétique crée à son tour une tension, et par conséquent un courant électrique, à travers le métal qui doit être fondu. La résistance électrique du métal produit de la chaleur qui à son tour fait fondre le métal. Du fait qu'il n'y a aucun contact entre la charge et le porteur d'énergie, le four à induction convient à la fusion d'acier, de fonte et de métaux non ferreux, pour autant qu'on puisse trouver un matériau de garnissage. L'on distingue le four à induction sans noyau et le four à induction à canal.

- **Le four à induction sans noyau** : c'est un four à fusion par lot contenant une bobine de cuivre refroidie à l'eau dont l'intérieur est garni de réfractaire.

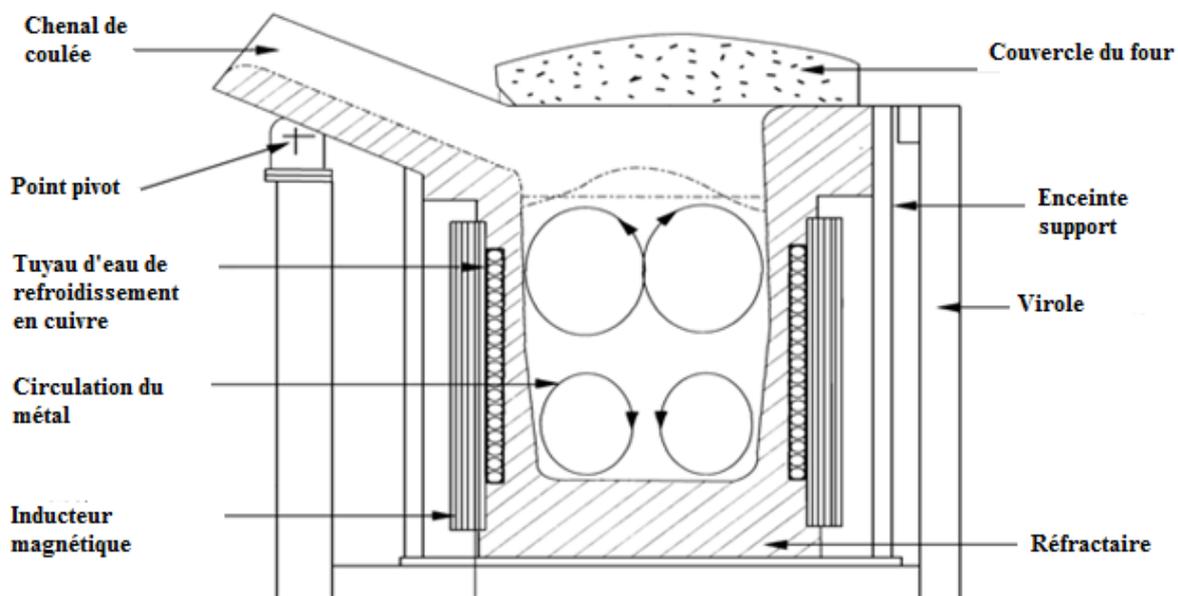


Figure 2 : Four à induction sans noyau [6]

- **Le four à induction à canal** : Il consiste en une grande benne isolée thermiquement équipée d'un couvercle supérieur isolé permettant l'introduction de la charge. Le fond est équipé d'un ou de plusieurs canaux en U. Autour de ces canaux se trouve une bobine d'induction refroidie à l'eau qui chauffe et fait circuler le métal.

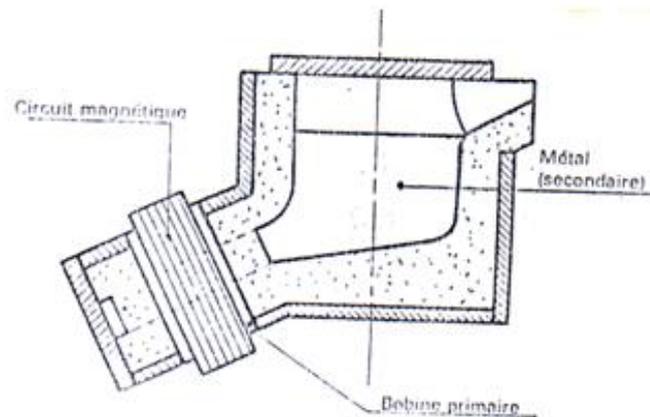


Figure 3 : Four à induction à canal [6]

## I-1-2 Les fours à combustible

### I-1-2-1 Le four rotatif

Le four rotatif consiste en une cuve horizontale cylindrique dans laquelle la charge métallique est chauffée par un brûleur situé au niveau d'un côté du four. Les fumées quittent le four de cuisson par le côté opposé. Pour générer la chaleur nécessaire, un combustible ou du gaz naturel est utilisé en combinaison avec l'air ou de l'oxygène pur.



Figure 4 : Four rotatif [6]

Un mécanisme de basculement permet au four d'être soulevé selon un certain angle ou dans une position verticale. Cette position est utilisée pour le chargement du four avec une benne à fond ouvrant ou un couloir vibrant, et pour la réparation et le renouvellement du garnissage.

Au cours du réchauffage et de la fusion, le four est mis en rotation lentement pour permettre le transfert et la répartition de chaleur.

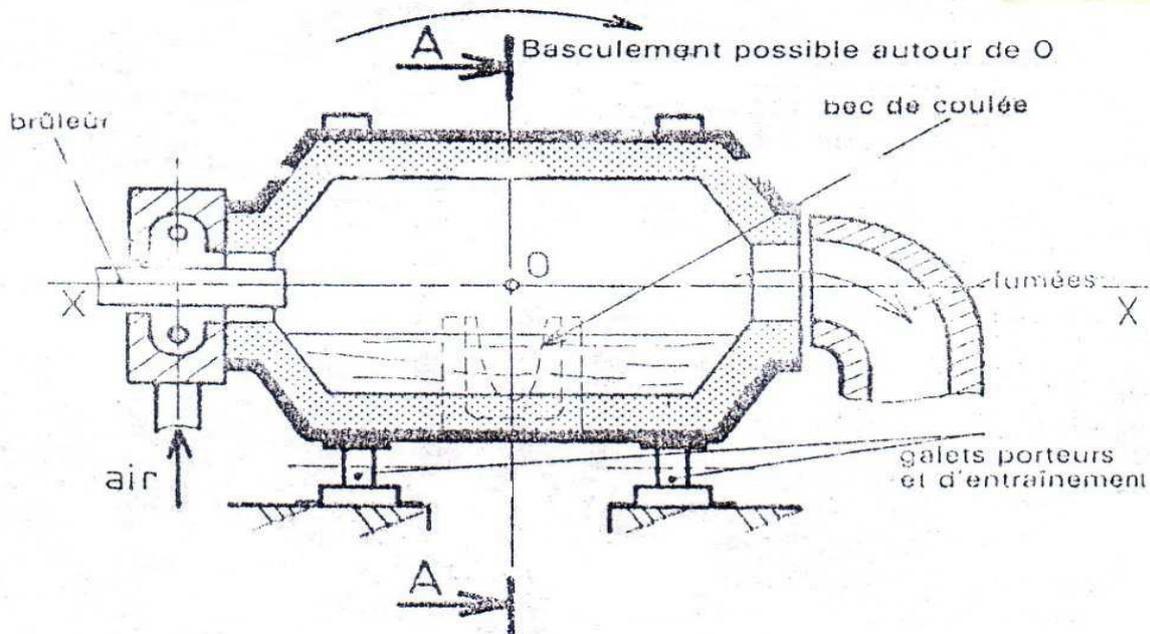


Figure 5 : Coupe schématique d'un four rotatif [6]

Une fois que le métal est fondu, et après une vérification et un réglage de la composition, un trou de coulée à l'avant du four est ouvert et le métal contenu dans le four est déchargé dans des poches de coulée.

Ces fours permettent l'élaboration d'alliages spéciaux grâce aux hautes températures atteintes et au brassage du métal. Ce brassage permet l'homogénéisation du bain et favorise l'évacuation des gaz. La fusion est rapide grâce à la faible inertie thermique de ces fours et à leur rotation qui accélère les échanges thermiques.

### I-1-2-2 Le cubilot

Le cubilot est un four à cuve réfractaire dans lequel la charge métallique est chauffée par la combustion du coke qui se produit dans la partie inférieure de la cuve. L'air de combustion, amené par les ventilateurs, est injecté dans la sole par l'intermédiaire d'un certain nombre de tuyères. Le métal (fonte en gueuse, déchets d'acier, déchets de fonte, retours de fonderie), le coke, les éléments d'alliage (par exemple du FeSi, du SiC), un agent de formation de laitier ( $\text{SiO}_2$ ) et un fondant (par exemple du  $\text{CaCO}_3$ ) sont introduits dans la cuve par l'intermédiaire d'un gueulard au niveau de la partie supérieure de la cuve. Les gaz de combustion se déplacent vers le haut depuis la sole et s'échangent la chaleur avec la charge, avant de quitter le four par l'intermédiaire de la cheminée du cubilot.

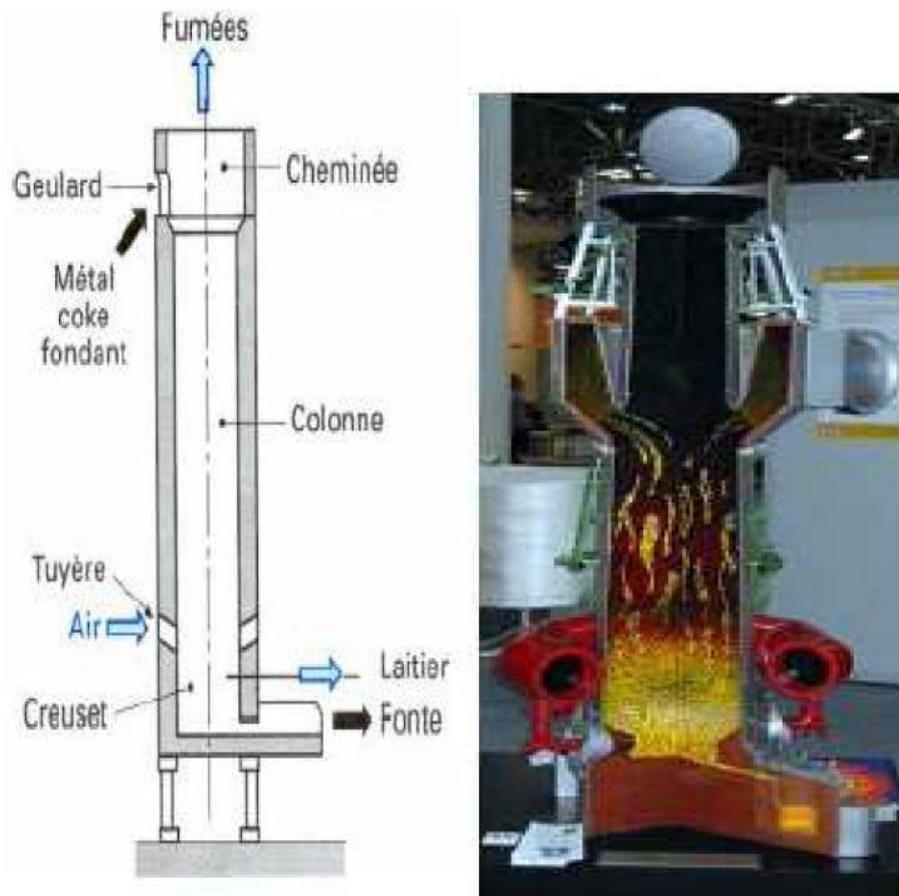


Figure 6 : Schéma d'un cubilot à gauche et Coupe schématique d'un cubilot à droite [6]

## I-2 Généralités sur les flammes de combustion

### I-2-1 Définition de la combustion

La combustion est une action de brûler entièrement, de l'entière décomposition d'une substance par l'action du feu. Elle est également une réaction chimique ou thermo-chimique exothermique et rapide avec fort dégagement de chaleur, de type d'oxydoréduction entre un corps réducteur (combustible) et l'oxydant ou comburant (dioxygène) ou un autre corps oxydant. En fait, La combustion est un ensemble de réactions chimiques d'oxydoréduction produisant de l'énergie dont les réactifs consommés lors de ces réactions sont le combustible et le comburant en présence d'une source de chaleur et les produits obtenus sont généralement le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau qui s'appellent aussi gaz brûlés (gaz de combustion) ou fumées (figure 7). La combustion fournit de l'énergie calorifique et émet généralement de la lumière.

La réaction chimique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant, une énergie d'activation en quantités suffisantes. C'est pourquoi on parle du « triangle du feu » ou « triangle de combustion ». Cependant depuis les années 1980 on a découvert qu'une des étapes indispensable de la réaction chimique est la production de radicaux libres ; cette étape est nécessaire pour que la combustion s'entretienne

et que l'on puisse parler d'incendie. C'est la raison pour laquelle on parle depuis de « tétraèdre du feu » [12].

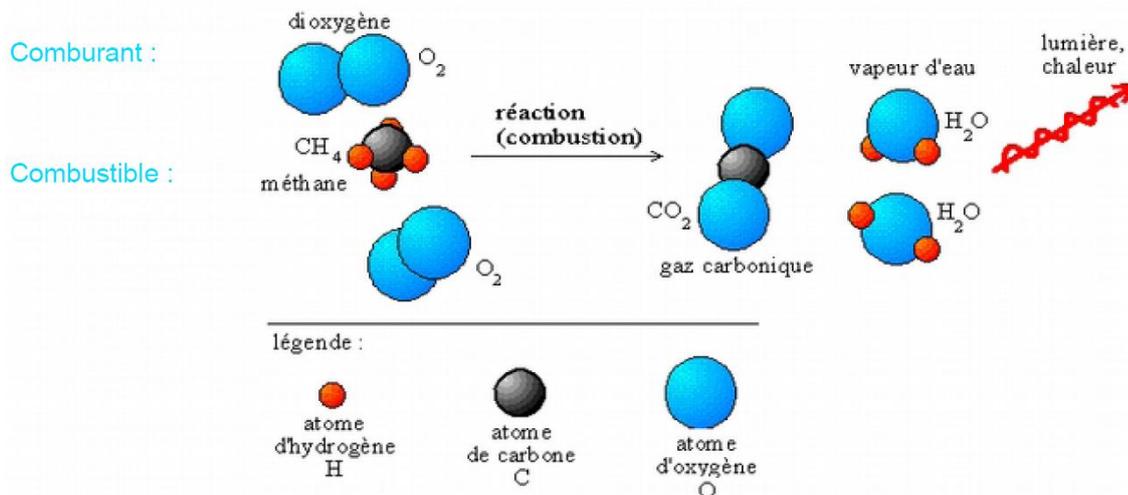


Figure 7 : Réaction chimique de combustion [21]

Les **combustibles** sont très nombreux : pratiquement tous les composés contenant l'élément carbone (C) ou hydrogène (H). Le combustible peut être : un solide formant des braises (charbon, bois, papier, carton, tissu ...) ; un liquide (essence, gazole, fioul, huile, kérosène ...) ; un gaz (gaz naturel, butane, propane, méthane, dihydrogène ...) ; un métal (fer, aluminium, sodium, magnésium ...). Cependant, quelle que soit la nature du combustible, la réaction de combustion proprement dite ne peut avoir lieu que lorsque les réactifs sont sous forme gazeuse. Si le combustible n'est pas à l'état gazeux, il se vaporise (état liquide à l'état gazeux) ou se sublime (état solide à l'état gazeux) préalablement (éventuellement après décomposition chimique).

Le **comburant** est l'autre réactif de la réaction chimique. La plupart du temps, il s'agit de l'air ambiant, et plus particulièrement de l'un de ses composants principaux, le dioxygène.

La réaction est déclenchée par un **activateur** (énergie d'activation), généralement de la chaleur ou une flamme. Par exemple, ce sera l'échauffement par frottement pour une allumette, le câble électrique suralimenté qui chauffe l'isolant, ou une autre flamme (propagation du feu), l'étincelle (de l'allume-gaz, de la pierre à briquet ou celle provoquée par une machine électrique qui se met en route ou s'arrête). Mais il existe d'autres façons de fournir l'énergie d'activation : arc électrique, radiation, élévation de la température par compression de l'air, par exemple dans un moteur Diesel.

Dans la combustion, les **radicaux** sont créés par rupture de liaison chimique due à l'énergie thermique, et ils vont pouvoir agir sur les molécules du produit (libérant d'autres radicaux) et engendrant de ce fait une réaction en chaîne qui va perdurer tant que les deux conditions suivantes seront réunies : présence de combustible et de comburant.

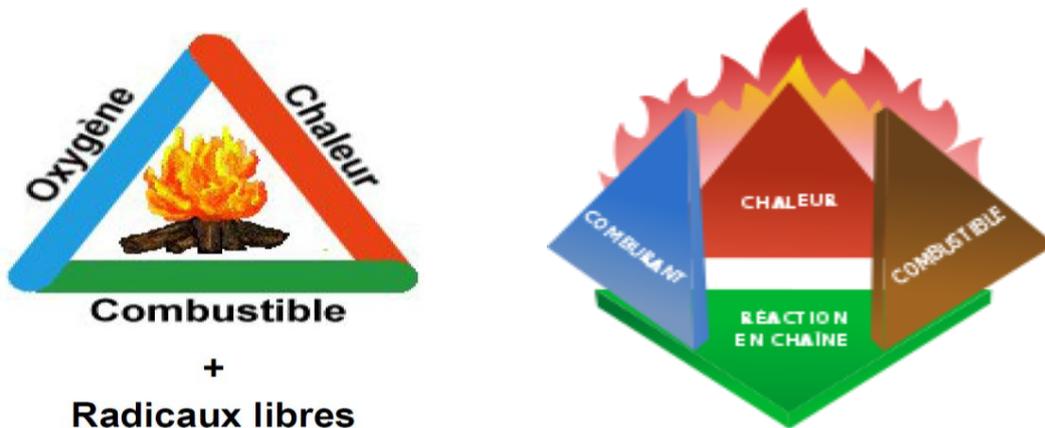


Figure 8 : Le tétraèdre du feu [27]

### I-2-2 Types de combustion

Parmi les classifications existantes de types de combustion, deux sont très souvent utilisées. La première consiste à classer les types de combustion en comparant la vitesse de leur réaction d'oxydation (figure 9). Quant à la deuxième, elle se base sur l'absence et la présence de flamme lors de la réaction de combustion (figure 10). C'est cette dernière classification qui sera étudiée en détail.

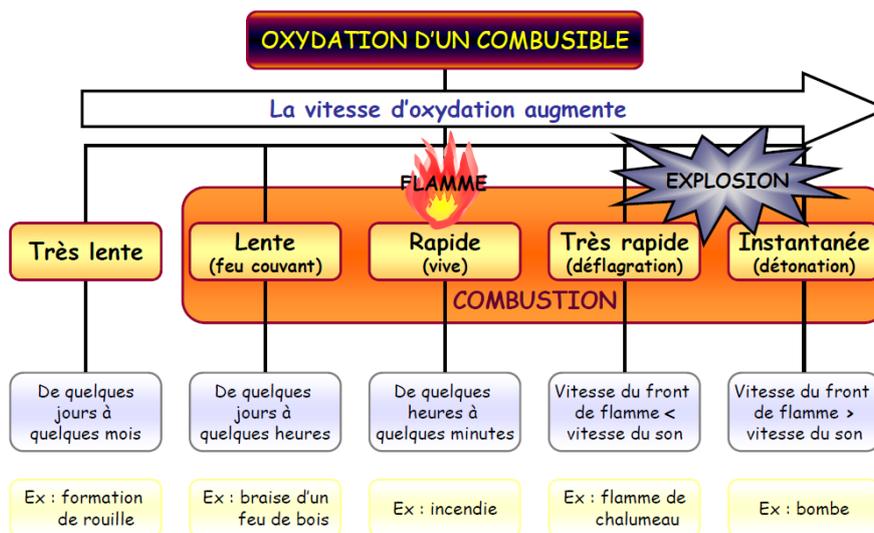


Figure 9 : Une première classification de la combustion, basée sur les vitesses d'oxydation [23]

Une combustion rapide produit une flamme visible, tandis qu'une combustion lente ne produit pas de flamme visible.

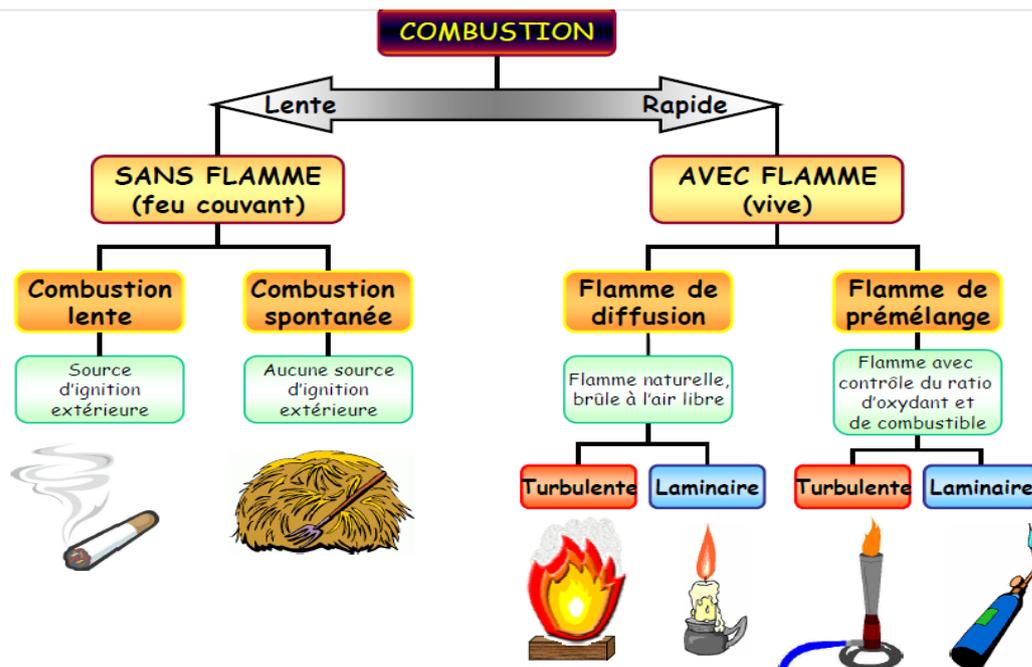


Figure 10 : Une deuxième classification de la combustion, basée sur l'absence et la présence de la flamme [23]

### I-2-2-1 La combustion sans flamme

La combustion sans flamme est caractérisée par une plage de température beaucoup plus faible (typiquement de 400 à 1000°C) et par le temps d'oxydation beaucoup plus long que dans une combustion avec flamme. Elle peut être divisée en deux grandes catégories :

- La **combustion lente** qui est un processus lent de combustion. Dans ce type de combustion, la source d'ignition est extérieure à la réaction c'est-à-dire toute cause externe pour amorcer l'oxydation. Comme exemple, nous avons la combustion de la cigarette, la braise d'un feu éteint et le charbon « rougit » dans le barbecue illustrent bien la combustion lente.

- La **combustion spontanée** qui est l'oxydation lente d'un combustible exposé à l'oxygène de l'air. Elle résulte d'un auto-échauffement du combustible sans apport extérieur d'énergie thermique. C'est sous l'effet de sa propre chaleur que le combustible peut commencer à brûler.

### I-2-2-2 La combustion avec flamme ou rapide

Une flamme est un milieu réactionnel gazeux, hautement énergétique et de volume limité où se produit un ensemble de réactions chimiques élémentaires (combustion vive) décomposant les molécules des combustibles en espèces plus petites (espèces intermédiaires) qui se recombinent pour donner des produits plus stables (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>), un fort dégagement de

chaleur et l'émission de rayonnements visibles. Une flamme est également une région de l'espace où se produisent les phénomènes de cinétiques chimiques couplés aux phénomènes d'écoulement. La combustion désigne un ensemble de réactions chimiques qui se produisent au sein de cet écoulement, accompagné d'émission lumineuse et d'un important dégagement de chaleur.

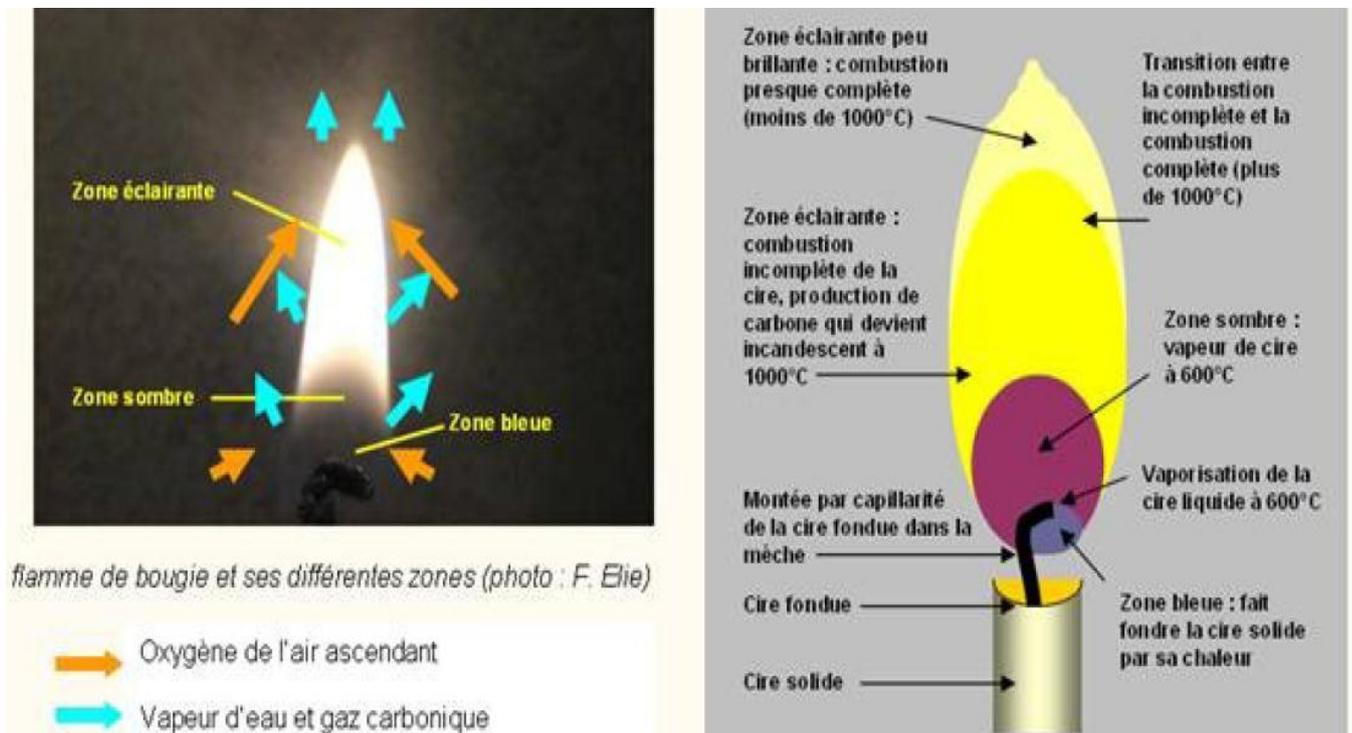


Figure 11 : La flamme et ses zones [8]

Ainsi on distingue deux types de combustion avec flamme :

- **Combustion laminaire** : Dans ce cas, les flammes évoluent dans des écoulements laminaires c'est-à-dire dans un milieu où les écoulements sont à faible Reynolds. Le nombre de Reynolds désigne un nombre sans dimension qui donne la nature de l'écoulement (inférieur à 2000 pour laminaire et supérieur à 2000 pour turbulent), il se définit de la manière suivante :

$$R_e = \frac{uD}{\nu} \quad (I.1)$$

Où  $u$  est la vitesse de l'écoulement,  $D$  est le diamètre caractéristique et  $\nu$  est la viscosité cinétique du fluide. On distingue aussi :

- **La flamme laminaire pré mélangée** : dans ce cas le combustible et le comburant sont préalablement mélangés où la caractéristique principale dite de diffusion qui consiste à présenter une zone de réaction séparant les réactifs, combustible et oxydant.

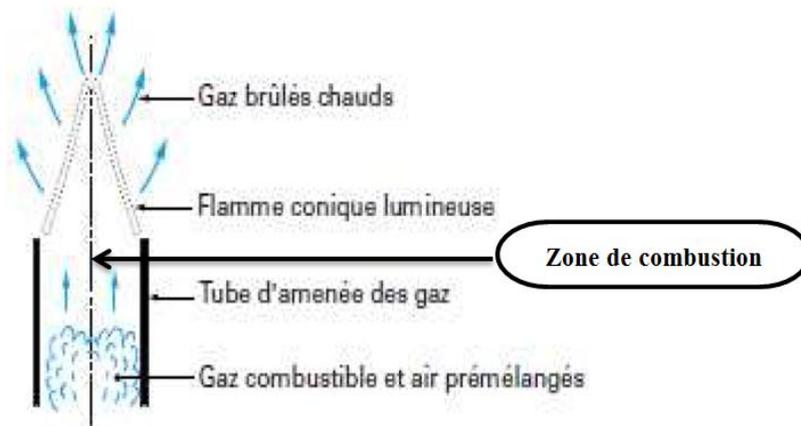


Figure 12 : Flamme d'un bec de gaz laminaire [6]

- **La flamme laminaire non-pré mélangée ou de diffusion** qui est une flamme où le combustible entre de manière séparé par rapport au comburant (par exemple le bruleur d'une cuisinière) où le combustible et le comburant sont mélangés avant l'inflammation.

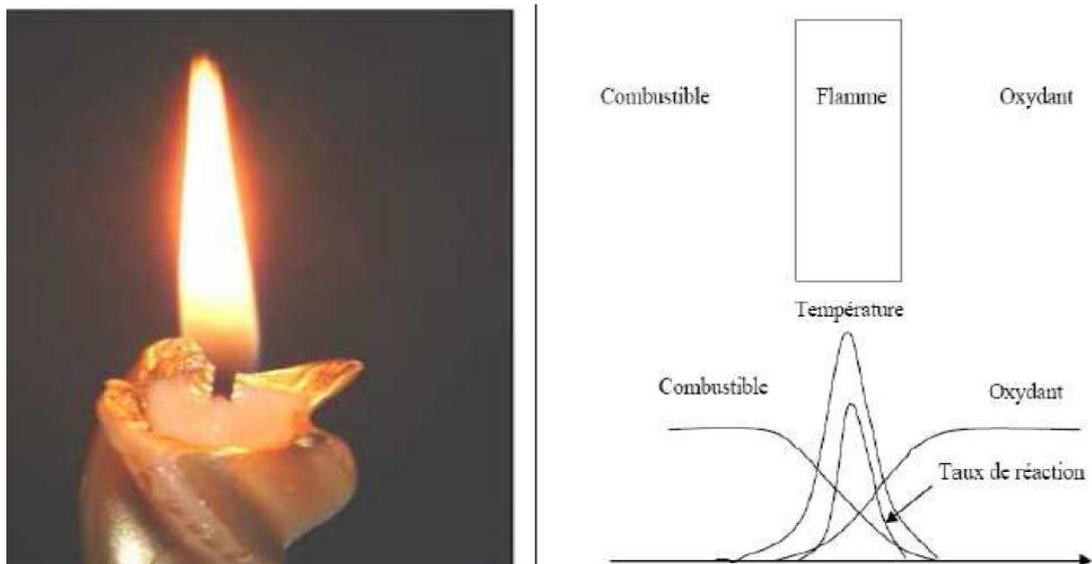


Figure 13 : Flamme de diffusion (Photo à gauche) [6]

- **Combustion Turbulente** : Dans un brûleur, l'écoulement est généralement turbulent, c'est-à-dire que le nombre de Reynolds de l'écoulement est grand. Cette turbulence est donc due à une forte vitesse de l'écoulement entrant, suite au développement dans le canal amont de gradients de vitesse aux parois et à partir d'obstacles.

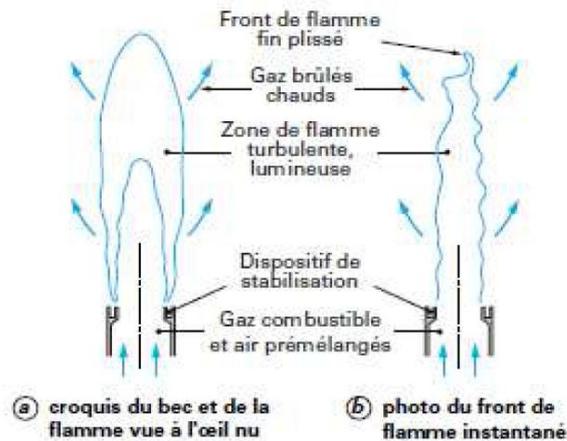


Figure 14 : Flamme d'un bec de gaz turbulent [6]

Ces différentes situations de types de combustion permettent d'obtenir dans leurs applications pratiques le schéma des systèmes pratiques de combustion suivant :

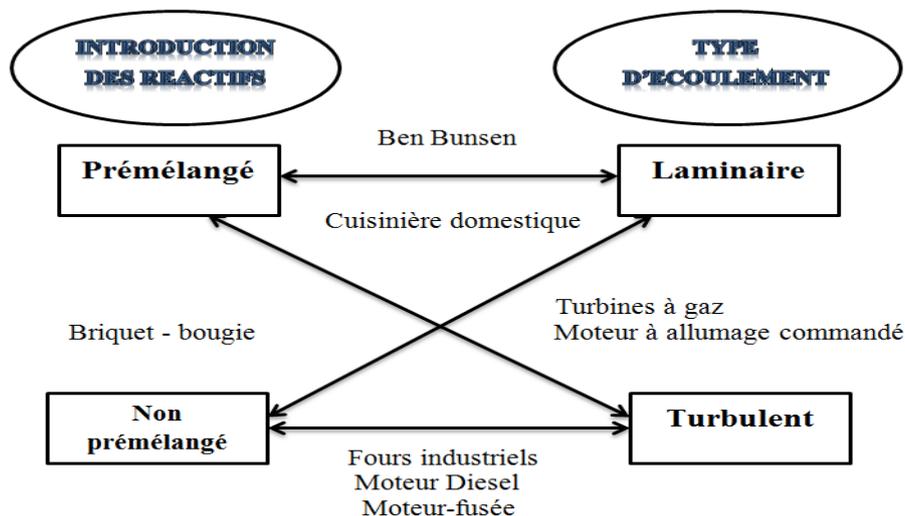


Figure 15 : Applications pratiques des types de combustion [6]

### I-2-3 La combustion complète et incomplète

On parle de combustion complète quand l'oxydation des éléments chimiques du combustible est menée à son terme. C'est une réaction qui conduit à l'oxydation maximale du combustible. Dans ce cas l'élément chimique carbone est entièrement oxydé en dioxyde de carbone et l'élément chimique hydrogène est entièrement oxydé en eau et la flamme est de couleur bleue.

La combustion est incomplète lorsque les éléments chimiques du combustible sont partiellement oxydés par l'oxydant. Elle peut donner un mélange de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone, d'eau, de carbone, de dihydrogène... Dans ce cas la flamme est de couleur jaune.

### I-2-4 Les Applications industrielles de la combustion

La combustion est appliquée dans les fours (à fonderie du métal), les moteurs à combustion interne (essence, Diesel), dans la turbine à gaz, dans les chaudières industrielles et domestiques, dans le statoréacteur, turboréacteur et pour la conversion d'énergie chimique potentielle en énergie thermique, mécanique, rayonnante, électrique. Ces énergies sont utilisées directement ou indirectement, pour le chauffage, la propulsion, la production d'électricité.

### I-2-5 Processus de combustion multiphasique des solides

Le processus de combustion est l'évolution irréversible d'un mélange réactif vers son état d'équilibre. Cette évolution est un ensemble de réactions chimiques (collisions moléculaires efficaces) décrivant au final l'oxydation d'un combustible par un comburant ou oxydant (dioxygène de l'air). Ce processus forme majoritairement de l'eau (H<sub>2</sub>O) et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Pour faire la simulation numérique et l'optimisation de la combustion des solides il faut connaître les différents processus se déroulant dans la zone de combustion. Elles sont de cinq types à savoir:

- Le chauffage et le séchage
- La pyrolyse ou dévolatilisation
- La combustion des résidus charbonneux
- L'écoulement des gaz en milieu poreux
- La combustion des matières volatile

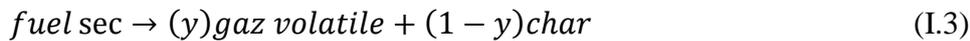
#### I-2-5-1 Le chauffage et le séchage

Le chauffage désigne toute augmentation de température et de chaleur dans un corps ; le séchage est tout traitement qui a pour but d'éliminer d'un corps, en totalité ou en partie, l'eau qui s'y trouve incorporée. Le séchage est donc la phase d'évaporation de l'eau contenue dans le corps. Domaine de température : jusqu'à 150°C. Le séchage de tout solide poreux et humide fait appel à différents processus de transport de matière et de chaleur couplés. L'eau liquide peut être déplacée par capillarité, par diffusion, par évaporation-condensation; La vapeur d'eau est, quant à elle transportée par diffusion et sous l'effet d'un gradient de pression totale. Au début du séchage, en dessous d'une humidité dite critique, le séchage se produit à vitesse décroissante, contrôlée par la cinétique des différents processus de transport interne de l'eau. Le séchage se traduit par la réaction [25] :



### I-2-5-2 La pyrolyse ou dévolatilisation

C'est le premier stade de transformation thermique après le séchage. Pendant la pyrolyse la matière organique est d'abord fragilisée puis, au fur et à mesure que la température augmente, décomposée en matières volatiles d'une part, et en un résidu carboné, d'autre part. L'opération est réalisée en l'absence d'oxygène. La pyrolyse s'exprime de façon globale comme suit [26] :



Il existe quatre modèles de dévolatilisation à savoir :

- **Le modèle à taux de dévolatilisation constant ;**

Ce modèle suppose que les matières volatiles sont libérées à un taux constant suivant [25] :

$$A_0 = -\frac{1}{f_{v,0}(1-f_{w,0})m_{p,0}} \frac{dm_p}{dt} \quad (\text{I.4})$$

Avec

$m_p$  : masse de la particule en kg

$m_{p,0}$  : masse initiale de la particule en kg

$f_{v,0}$  : la fraction de la matière volatile initialement présente dans la particule

$f_{w,0}$  : la fraction de masse d'évaporation/ébullition de la particule matérielle (si la combustion humide est modélisée)

$A_0$  : la constante de vitesse ( $s^{-1}$ ).

- **Le modèle à simple taux cinétique;**

Le modèle à simple taux cinétique suppose que le combustible est décomposé en gaz volatils et résidus charbonneux. Le taux de dévolatilisation dépend au premier ordre de la quantité de matières volatiles restantes dans la particule [26] :

$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}] \quad (\text{I.5})$$

Où  $k$  est obtenu par la donnée du facteur pré-exponentiel,  $E$  l'énergie d'activation selon :

$$k = A_1 e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (\text{I.6})$$

- ***Le modèle à deux réactions compétitives ;***

Le schéma cinétique du modèle de dévolatilisation à deux réactions a été mis au point pour des charbons bitumineux. Ce modèle scinde les espèces volatiles en deux catégories à savoir : petites molécules qui sont prépondérantes lorsque la température est basse. Elles deviennent minoritaires face à la fabrication des plus grosses molécules lorsque la température y est élevée.

- ***Le modèle par filtration chimique (CPD model)***

Il permet de caractériser le comportement de dévolatilisation rapide, basé sur les transformations physiques et chimiques de la structure du combustible.

Quel que soit le modèle de dévolatilisation, et la nature du combustible, on retrouve toujours le CO et le CO<sub>2</sub> dans les gaz de dévolatilisation. Les autres gaz, tels H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, sont représentés en fonction du combustible.

La combustion s'amorce une fois les étapes de séchage et de pyrolyse achevées.

### **I-2-5-3 Combustions du résidu charbonneux**

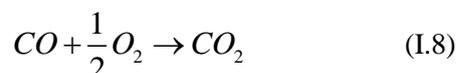
La combustion hétérogène du résidu charbonneux est une combustion lente dont le taux de réaction est imposé par la cinétique chimique et le transport d'oxygène vers la surface des particules. Dans la plupart des études bibliographiques, les auteurs se limitent aux composants suivants: carbone, hydrogène et soufre [16].

- ***Combustion du carbone***

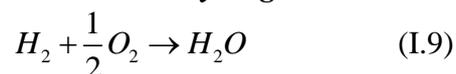
D'après la théorie du double film, qui suppose deux zones de réaction, la partie du cœur de la particule jusqu'à sa surface est le siège de la production de CO essentiellement.



Ensuite le CO réagit avec l'oxygène du milieu environnant pour former le CO<sub>2</sub>.

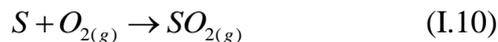


- ***Combustion du d'hydrogène***



- ***Combustion du soufre***

Le soufre organique s'oxyde pour former le dioxyde de soufre, un produit nocif pour l'environnement selon la réaction suivante :



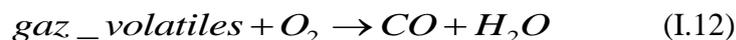
La combustion du soufre pyrique est plus difficile que le soufre organique à cause des liaisons inter atomiques plus fortes.



Cette réaction hétérogène parachève la transformation de la partie combustible des combustibles solides, dont il ne reste que des cendres.

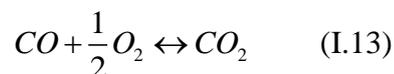
#### I-2-5-4 L'écoulement des gaz en milieux poreux

Les matières volatiles dégagées pendant l'étape de dévolatilisation quittent le solide et sont entraînées par l'écoulement des gaz entourant la particule de combustible. En présence d'air les gaz de dévolatilisation peuvent s'enflammer si la qualité de leur mélange avec le comburant et si la température du milieu sont suffisantes. A ce moment, la combustion en phase gazeuse (ou homogène ou vive) se déclenche pour produire du monoxyde de carbone et de l'eau. On la matérialise par la réaction suivante [25]:



#### I-2-5-5 La combustion des matières volatiles

Durant l'écoulement des gaz en milieux poreux, d'autres matières volatiles sont produites à l'instar du monoxyde de carbone qui instantanément s'oxyde à son tour pour former du dioxyde de carbone et inversement



#### I-2-6 Les modes de transfert thermique

Les modes fondamentaux de transfert de chaleur qui se déroulent dans la zone de combustion sont: transfert par conduction, transfert par convection et transfert par rayonnement.

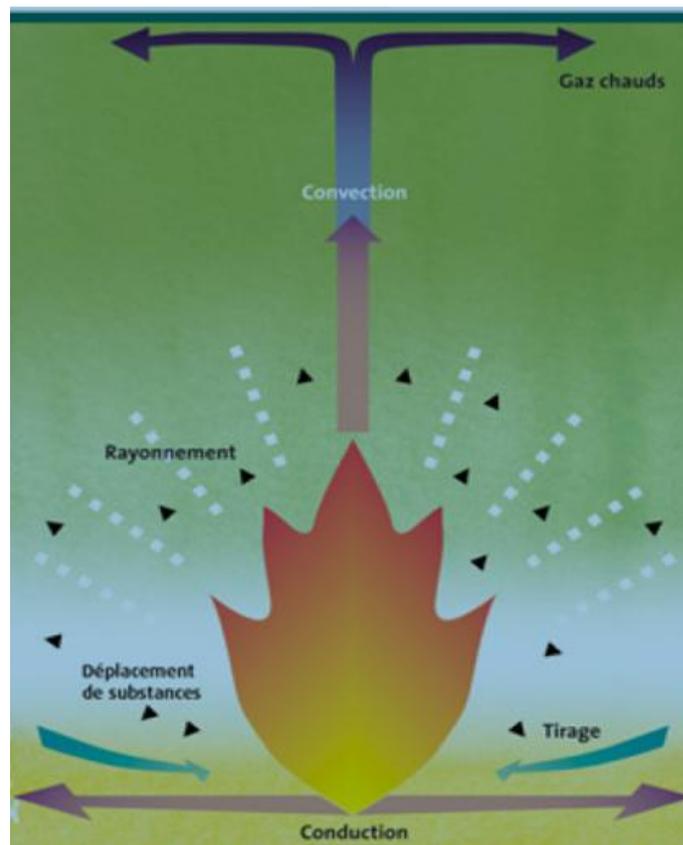


Figure 16 : Modes de transfert de chaleur [12]

### I-2-6-1 Transfert par conduction

La conduction représente le processus de propagation de la chaleur par le contact direct entre les particules du corps dont les différentes parties ne sont pas isothermes. Elle est le moyen par lequel la chaleur circule de proche en proche dans un matériau ou passe d'un corps à un autre en contact physique direct, par simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines. Lorsque les molécules s'échauffent à la surface d'un corps, elles transmettent cette chaleur aux molécules voisines ; et de proche en proche, la chaleur captée se répartit dans toute la masse du corps, jusqu'à atteindre à l'uniformité des températures. Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones froides. La vitesse de progression du flux de chaleur à travers un corps, sa conductivité thermique, dépend de l'aptitude de ses molécules et de ses électrons à recevoir et à transmettre la chaleur. La théorie de conduction repose sur la loi de **Fourier: la densité de flux est proportionnelle au gradient de température.**

$$\vec{\phi} = -\lambda S \overrightarrow{grad}(T) \quad (I.14)$$

avec

$\varphi$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$ )

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ )

### I-2-6-2 Transfert par convection

Ce mode de transfert est spécifique aux fluides. En plus du transfert de chaleur par conduction toujours présent dans la matière, il y a dans les fluides un transfert de chaleur provoqué par l'écoulement du fluide, c'est à dire par le mouvement d'ensemble des particules qui le composent. Ce phénomène est appelé advection : une masse de fluide qui se déplace transporte avec elle son énergie interne. On peut donc définir la convection comme la réunion de deux modes de transfert de chaleur : la conduction, qui s'effectue à l'échelle microscopique, et l'advection, qui est de nature macroscopique. La convection thermique est donc l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact. Dans le processus de convection, la chaleur se déplace comme toujours des zones chaudes vers les zones froides. Lorsque les molécules d'un fluide froid, tel que l'eau ou l'air, viennent au contact d'une paroi chaude, une partie de l'énergie de vibration animant les molécules superficielles du solide se communique aux molécules voisines du fluide. Le mouvement de convection peut tout aussi bien s'inverser. Lorsqu'un fluide chaud vient au contact d'une paroi froide, ses molécules plus chaudes communiquent une partie de leur énergie de vibration aux molécules superficielles de la paroi. La quantité de chaleur ainsi transmise est proportionnelle à la différence de température entre paroi et fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de **Newton**:

$$\phi = hS(T_p - T_{\infty}) \quad (I.15)$$

avec

$\phi$  : Flux de chaleur transmis par convection (W)

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$ )

$T_p$  : Température de surface du solide ( $^{\circ}C$ )

$T_{\infty}$  : Température du fluide loin de la surface du solide ( $^{\circ}C$ )

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $m^2$ )

### I-2-6-3 Transfert par rayonnement

Par définition, l'intensité du rayonnement thermique d'un corps dépend de la température de sa surface rayonnante. Elle correspond à l'émission de photons lors de la

vibration et rotation des molécules constituant les produits de combustion ainsi que des particules solides. Ce rayonnement lumineux peut être diffusé, absorbé et émis. C'est le mode de transfert de chaleur prépondérant au sein du lit de combustibles. C'est donc un élément primordial ; il est le principal vecteur d'énergie, responsable de la propagation du feu. Lorsque le feu est mourant, les flammes et les braises prennent une coloration rouge sombre et donnent moins de lumière et à peine moins de chaleur. Au bout d'un moment, les flammes disparaissent, les braises encore rouges se ternissent, s'assombrissent et finalement ne rougissent plus du tout. Les braises tièdes n'émettent plus de clarté, mais elles continuent à rayonner de la chaleur. Ce transfert d'énergie est instantané et sans support matériel. L'énergie est portée par les photons et opère donc à distance. Il est traduit par la loi de **Stefan-Boltzmann** suivante:

$$\phi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{I.16})$$

avec

$\phi$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$ )

$\varepsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface ; il est compris entre 0 et 1

$T_p$  : Température de la surface (K)

$T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface (K)

$S$  : Aire de la surface ( $\text{m}^2$ )

## I-3 Coques de noix de palmistes

### I-3-1 Présentation

Le palmier est un arbre des régions chaudes, à fleurs unisexuées, dont la tige, ou stipe, se termine par un bouquet de feuilles (palmes) et donc de nombreuses espèces fournissent des produits alimentaires (dattes, noix de coco, huile de palme, chou de palmiste) ou industriels (raphia, corozo, rotin). Les palmiers constituent la famille des palmacées, ou arécacées.

La coque de noix de palmiste est cette enveloppe très dure ou cette coquille ligneuse de la graine de noix de palme. Elle est un déchet obtenu après extraction de l'huile de palme et de la noix de palmiste, elle se présente comme tout produit issu de la biomasse, avec un bilan nul en CO<sub>2</sub> pendant la combustion.

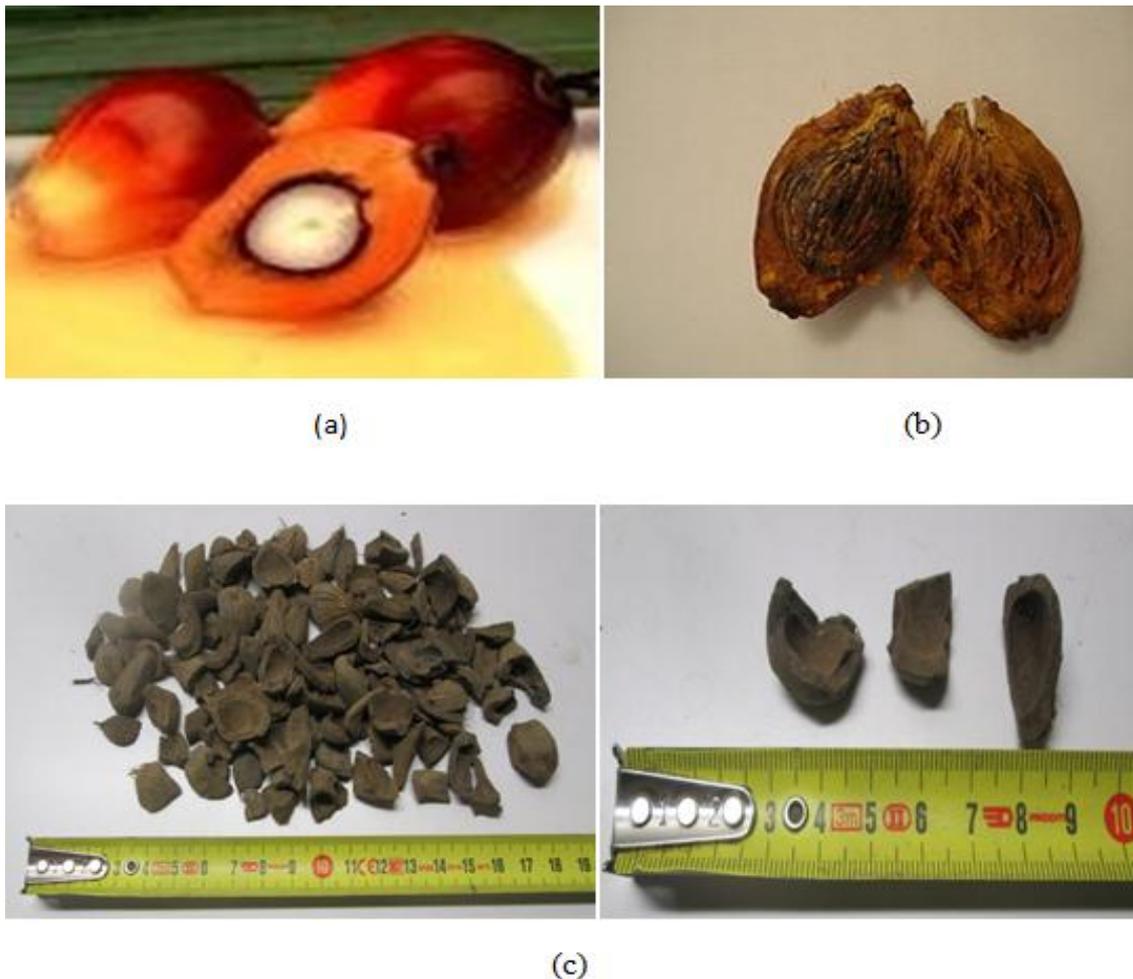


Figure 17 : (a) Noix de palme, (b) noix de palmiste et (c) coques de noix de palmistes [6]

### I-3-2 Propriétés des coques noix de palmistes

#### I-3-2-1 La taille des particules

La granulométrie (dimension de la taille des particules du solide) s'établit selon le type d'installation de combustion : type de foyer et système d'aménagement du combustible. Elle dépend de quatre paramètres principaux : l'état des couteaux, l'outil utilisé (type de broyeur ou de coupeuse), la dimension des éléments broyés et la vitesse d'introduction des solides dans la machine.

#### I-3-2-2 Propriétés et caractéristiques chimiques et physiques des coques de noix de palmistes

L'analyse physique de ce combustible montre que son humidité totale a pour valeur 9,3% brut [5], déterminé par la méthode de séchage en étuve.

L'analyse de base par les méthodes calcination et gravimétrie est donnée sur le tableau 1 suivant :

*Tableau 1 : Analyses de base des coques de noix de palmistes [5]*

Analyse de base	Résultats
Cendres à 815°C	1,3 % sec
Cendres à 815°C	1,4 % brut
Matières volatiles à 900°C pendant 7min	76,7 % sec
Matières volatiles à 900°C pendant 7min	69,6 % brut

L'analyse élémentaire consiste à déterminer les éléments suivants : C, H, O, N, S. Elle est réalisée par la méthode de microanalyseur. Le tableau 2 ci-dessous nous donne l'analyse élémentaire des coques de palmiste.

*Tableau 2 : Analyse élémentaire des coques de noix de palmistes [5]*

Analyse élémentaire	Résultats
Carbone	54,2 % sec 49,1 % brut
Hydrogène	6,22 % sec 6,68 % brut
Oxygène	39,0 % sec 43,86 % brut
Azote	0,39 % sec 0,36 % brut

Le soufre et le chlore par méthode de chromatologie ont respectivement pour résultats **375 mg/kg sec** et **313 mg/kg sec** [5].

### **I-1-2-3 Contenu énergétique : Pouvoir calorifique**

Le contenu énergétique des coques de palmistes est exprimé par son pouvoir calorifique. Le pouvoir calorifique représente la quantité d'énergie, exprimée en joule (unité SI), contenue dans une unité de masse du combustible, exprimée en gramme. Il représente également la chaleur dégagée par sa combustion complète. L'unité la plus fréquemment utilisée dans la littérature est la kilocalorie par kilogramme (kcal/kg). On distingue le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) exprime la quantité d'énergie dégagée par la combustion du combustible, en récupérant la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) exprime la quantité d'énergie dégagée par la combustion du combustible, sans récupérer la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion. Les mesures existantes ne peuvent déterminer directement cette énergie : il faut la calculer à partir du PCS. Elle est l'énergie théoriquement récupérable par l'utilisateur (dans le cas d'une combustion parfaite).

$$PCI = \left[ \begin{array}{l} \text{contenu énergétique total} \\ \text{du combustible (PC Supérieur)} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{contenu énergétique de la vapeur d'eau} \\ \text{émise lors de sa combustion complète} \end{array} \right]$$

$$PCI = PCS - mL_v \quad (I.17)$$

Où  $m$  = la masse de l'eau produite par la combustion

$L_v$  = la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C (2495 kJ kg<sup>-1</sup>).

Les valeurs du PCS et PCI des coques de noix de palmistes par les méthodes respectives de calorimétrie et calcul sont consignées sur le Tableau 3.

Tableau 3 : Analyses thermiques des coques de noix de palmistes [5]

Analyse thermique	Résultats	Méthodes
PCS	5069 cal/ g sec 21223 J/ g sec 4598 cal/ g brut 19251 J/ g brut	Calorimétrie
PCI	4763 cal/ g sec 19942 J/ g sec 4269 cal/ g brut 17873 J/ g brut	Calcul (EPESSE, 2015) [5] [6]

Tableau 4 : Analyses thermiques et chimiques des métaux dans les coques de noix de palmistes [5]

Métaux	Résultats	Unités
Arsenic	≤ 0,10	mg/ kg sec
Cadmium	≤ 0,40	mg/ kg sec
Chrome	4,5	mg/ kg sec
Cuivre	11	mg/ kg sec

Mercure	$\leq 0,05$	mg/ kg sec
Nickel	3,1	mg/ kg sec
Plomb	3,5	mg/ kg sec
Zinc	5,2	mg/ kg sec

#### I-4 Notion de stabilité d'une flamme

Une flamme est un milieu réactionnel gazeux où se produit un ensemble de réactions chimiques élémentaires. La flamme est donc le lieu où se déroulent dans un écoulement les réactions physiques et chimiques de la combustion. C'est une réaction de combustion vive.

La notion de stabilité de la flamme prend en compte deux phénomènes :

- **La cinétique chimique** qui se manifeste par un temps et un délai du processus ;
- **Le mélange turbulent** dû à la vitesse des réactions chimiques.

La stabilité de la flamme est donc le couplage en concurrence c'est-à-dire mettant en compétition la cinétique chimique du délai et le mélange turbulent provenant de la vitesse des réactions chimiques.

En effet, ces types de foyers tendent à optimiser la combustion en favorisant un bon mélange entre les produits de combustion, en créant un jet. Ce jet a la fonction principale d'augmenter la diffusion entre les espèces, dans le but de stabiliser la flamme générée. Le phénomène est lié à la présence de deux fluides (air et gaz) à des débits différents et permet simplement d'alimenter la réaction pour maintenir la stabilité de la flamme.

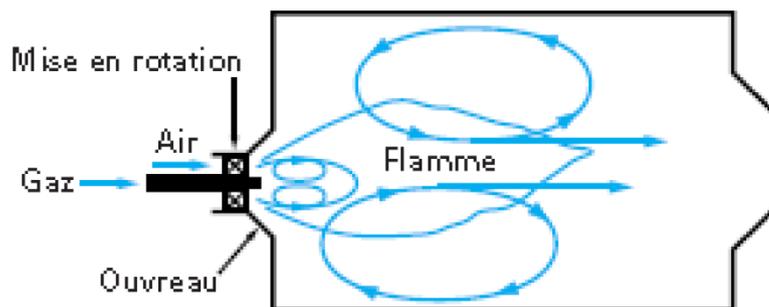


Figure 18 : Stabilisation de la flamme [18]

Le tourbillonnement consiste à ajouter une composante azimutale au champ de vitesse d'un écoulement. Il en résulte, dans un écoulement confiné, un équilibre entre les forces centrifuges agissant sur les particules fluides et les forces de pressions, conférant à l'écoulement un effet de courbure au niveau de la zone de mélange. Le jet rend les structures cohérentes, fortement organisées dans le cas du jet libre, plus faibles en supprimant l'appariement des tourbillons et en favorisant un accroissement de la turbulence.

Il a été observé qu'à partir d'une certaine intensité de jet une zone de recirculation apparaissait dans l'écoulement principal. La zone de recirculation est une région dans laquelle les gaz frais et les gaz brûlés sont bien mélangés. Elle constitue alors une zone de stockage de chaleur et d'espèces réactives en proche sortie du brûleur, si tant que l'intensité du jet soit suffisamment importante. La taille et la position de cette zone de recirculation varient avec l'intensité du jet. Cette zone est un élément essentiel pour stabiliser les flammes car elle contient des gaz frais préchauffés et permet l'accrochage de la combustion.

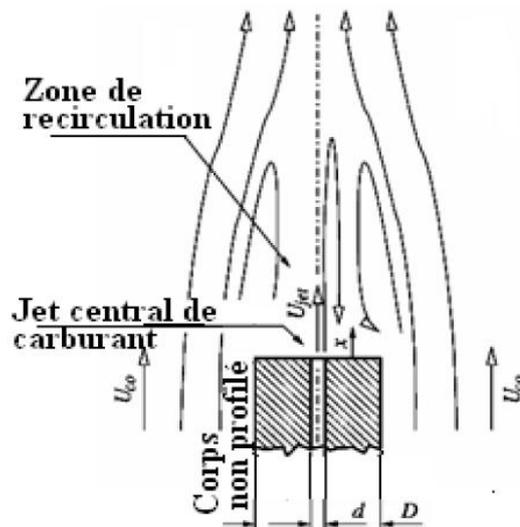
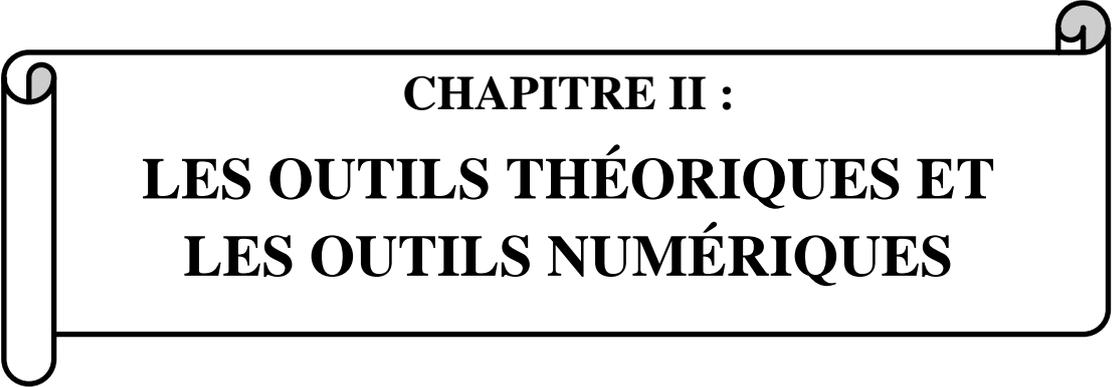


Figure 19 : Zone de recirculation [13]

La nature de l'écoulement (géométrie et stationnarité) conditionne en grande partie la géométrie de la flamme donc la nature de l'écoulement joue un rôle primordial dans la stabilité de la flamme.

## Conclusion partielle

Le présent chapitre après avoir passé en revue les principaux fours de fusion utilisés dans l'industrie métallurgique entre autres les fours électriques et les fours à combustible, aborde par la suite le phénomène de combustion dans ses généralités des flammes puis le processus multiphasique de combustion des solides en retenant que la flamme est un milieu réactionnel gazeux où se produit un ensemble de réactions chimiques élémentaires. Les coques de palmistes ainsi que leurs propriétés et caractéristiques physiques et chimiques ont été présentés. En fin la notion de la stabilité d'une flamme a été abordée s'agissant ainsi de l'effet de couplage en compétition entre le mélange turbulent et la cinétique chimique. Les outils théoriques et numériques seront présentés au chapitre II.



**CHAPITRE II :**  
**LES OUTILS THÉORIQUES ET**  
**LES OUTILS NUMÉRIQUES**

## Introduction

Le chapitre précédent a présenté l'état de l'art de la combustion et les phénomènes physico-chimiques qui interviennent dans la combustion. Ces phénomènes sont modélisés par les équations mathématiques. Les équations qui régissent un écoulement avec réaction, sont dans ce cas celles de l'aérothermochimie qui comprennent : une équation de conservation de la masse, une équation de conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes), une équation bilan pour les espèces, une équation de conservation de l'énergie et les équations moyennées. La simulation numérique repose sur la résolution de ces équations en utilisant des méthodes numériques. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord ces équations décrivant l'écoulement réactif, et ensuite les outils numériques utilisés pour résoudre ces équations et en fin la description du dispositif expérimental utilisé et ces paramètres de fonctionnement.

## II-1 Les outils théoriques de la combustion multiphasique

La combustion mettant en jeu un écoulement fluide et réactif, et en raison de la physique qu'elle inclut, la combustion est modélisée par un système d'équations et lois connus sous le nom d'équations de l'aérothermochimie. Il s'agit des équations de Navier-Stokes (du bilan de la masse et de la quantité de mouvement), de l'énergie des espèces ou scalaires et l'équation de conservation de la masse volumique. Chaque bilan peut être mis sous la forme d'une équation de transports instantanés et moyennés décrivant l'écoulement réactif à savoir:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{instationnaire}} + \underbrace{\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \phi}_{\text{convection}} = \underbrace{\nabla \cdot (J_\phi)}_{\text{diffusion}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{terme source}} \quad (\text{II.1})$$

### II-1-1 Equations de l'aérothermochimie

#### II-1-1-1 Equations de transport instantanées

##### a) Equation de conservation de la masse ou de continuité

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (\text{II.2})$$

$\rho$  est la masse volumique et  $\mathbf{u}$  la vitesse.

##### b) Equation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \nabla \cdot (J_u) + S_u \quad (\text{II.3})$$

Avec  $J_u = -P + \tau$  où  $P$  est la pression;  $\tau$  représente la partie dissipative du tenseur des contraintes visqueuses. Dans le cas d'un fluide Newtonien,  $\tau$  peut se mettre sous la forme générale :

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (\text{II.4})$$

Avec  $\mu$  la viscosité dynamique,  $\delta_{ij}$  le symbole de Kronecker et  $S_u = \rho g$  où  $g$  représente la gravité.

### c) Equation bilan des espèces

L'équation qui décrit l'évolution de chaque espèce s'écrit :

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = \nabla \cdot (J_{Y_i}) + S_{Y_i} \quad (\text{II.5})$$

Où  $Y_i$  représente la fraction massique de l'espèce  $i$ ,  $J_{Y_i} = \rho D_i Y_i$  est le flux de diffusion où  $D_i$  représente le coefficient de diffusion moléculaire de l'espèce  $i$ ; le terme source des espèces  $S_{Y_i}$  est donné par :  $S_{Y_i} = \rho \dot{\omega}_i$ . Ici,  $\dot{\omega}_i$  représente le terme de production ou consommation de l'espèce.

### d) Equation de conservation de l'énergie ou de l'enthalpie

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h_t) = \nabla \cdot (J_{h_t}) + S_{h_t} \quad (\text{II.6})$$

$h_t$  est l'enthalpie totale,  $J_{h_t} = \lambda \nabla T$  donnée par la loi de **Fourier** est le flux de diffusion et  $S_{h_t} = \frac{\partial P}{\partial t} + \dot{q}'''$  est le terme source de l'enthalpie avec  $\dot{q}'''$  les pertes thermiques (combustion, rayonnement).

### e) Etat du gaz

Il s'exprime par la loi des gaz parfaits suivante :

$$P = \rho RT \sum_j \frac{Y_j}{W_j} \quad (\text{II.7})$$

Où  $R$  est la constante des gaz parfaits par unité de masse et  $T$  la température du fluide.

## II-1-1-2 Equations de transport moyennées

Pour écrire ces équations, deux types de décomposition sont utilisés :

- La décomposition de Reynolds pour les fluides à masse volumique constante :

$$G = \bar{G} + G' \quad (\text{II.8})$$

Où  $\bar{G}$  est la moyenne statistique conventionnelle de  $G$  (sur un grand nombre de réalisations) et  $G'$  sa fluctuation correspondante telle que :  $\overline{G'} = 0$

- La décomposition de Favre pour les fluides à masse volumique variable:

$$G = \check{G} + G'' \quad (\text{II. 9})$$

Où  $\check{G} = \frac{\bar{\rho}G}{\bar{\rho}}$  est la moyenne selon Favre, et  $G''$  sa fluctuation correspondante telle que :  $\overline{G''} = 0$

Dans le cas des grandes variations de masse volumique au cours des écoulements réactifs, la décomposition de Favre est plus appropriée. Les équations de conservation moyennées obtenues à partir de la décomposition de Favre s'écrivent alors :

#### a) Equation de continuité

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i = 0 \quad (\text{II.10})$$

#### b) Equation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}_z}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\rho} \widetilde{u''_j u''_i}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \bar{g} \quad (\text{II.11})$$

#### c) Equation de conservation de l'enthalpie

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h}_t)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_t}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{\rho} \widetilde{u''_j h''_t}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\bar{q}) + \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \bar{q}''' \quad (\text{II.12})$$

#### d) Equation de conservation des espèces

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_i)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{\rho} \widetilde{u''_j Y''_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{D}_i \tilde{Y}_i) + \bar{\rho} \tilde{\omega}_i \quad (\text{II.13})$$

### II-1-1-3 Fermeture des équations moyennées

Nous constatons l'apparition des termes de type  $\bar{\rho} \widetilde{u''_i \phi''}$ . Afin d'assurer la fermeture du système, ces termes sont approximés comme suit :

$\bar{\rho} \widetilde{u''_j u''_i}$  appelé tenseur de Reynolds, approximé à partir de l'hypothèse de Boussinesq par :

$$\bar{\rho} \widetilde{u''_j u''_i} = -\mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{2}{3} K \quad (II.14)$$

avec  $\mu_t$  la viscosité dynamique turbulente et  $K$  l'énergie cinétique de turbulence donnée par :  $K = \frac{1}{2} \widetilde{u''_k u''_k}$

- $\bar{\rho} \widetilde{u''_j h''_t} = -\frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial \tilde{h}_t}{\partial x_j}$  est le flux turbulent d'enthalpie
- $\bar{\rho} \widetilde{u''_j Y''_i} = \frac{\mu_t}{Sc} \frac{\partial \tilde{Y}_i}{\partial x_j}$  représente le flux turbulent d'espèces

Où  $\mu_t$  est la viscosité dynamique turbulente,  $Pr$  le nombre de Prandtl et  $Sc$  le nombre Schmidt.

Plusieurs modèles de turbulence sont proposés pour modéliser le tenseur de Reynolds. nous allons présenter ici le modèle qui sera utilisé lors de notre simulation numérique:

### Modèle k-ε standard

Ce modèle a été initialement développé pour les écoulements incompressibles où les fluctuations de la densité peuvent être négligées, il a ensuite été élargi aux écoulements compressibles.

Ce modèle est donc donné par les équations suivantes:

$$\frac{\partial \bar{\rho} K}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i K}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_i} \right) + \bar{\rho} \widetilde{u''_j u''_i} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \bar{\rho} \varepsilon \quad (II.15)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} \bar{\rho} \widetilde{u''_j u''_i} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (II.16)$$

$K$  est l'énergie cinétique de la turbulence,  $\varepsilon$  le taux de dissipation de l'énergie cinétique et  $\mu_t$  la viscosité turbulente modélisée par :  $\mu_t = C_\mu \bar{\rho} \frac{K^2}{\varepsilon}$

Le tableau suivant donne les valeurs des paramètres du modèle k – ε.

Tableau 5 : Les paramètres de modélisation du modèle k-ε [25]

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.09	1.44	1.9	1.0	1.3

Et aussi, les moyennes des termes sources de l'enthalpie  $\bar{q}'''$  et des espèces  $\tilde{\omega}_i$  sont des termes de la cinétique chimique. Ils sont fermés par les modèles de combustion turbulente.

En résumé, les équations moyennées de transport intervenant dans la combustion sont:

- **Equation de conservation de la masse**

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i = 0 \quad (\text{II. 17})$$

- **Equation de conservation de la quantité de mouvement**

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}_z}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\rho} u''_j u''_i}{\partial x_j} + \bar{\rho} \bar{g} \quad (\text{II. 18})$$

Avec

$$\bar{\rho} u''_j u''_i = -\mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{2}{3} K \quad (\text{II. 19})$$

- **Equation de conservation de l'enthalpie**

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h}_t)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_t}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{\rho} u''_j h''_t}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\bar{q}) + \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \bar{q}''' \quad (\text{II. 20})$$

Avec  $\bar{\rho} u''_j h''_t = -\frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial \tilde{h}_t}{\partial x_j}$

- **Equation de conservation des espèces**

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_i)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{\rho} u''_j Y''_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{D}_i \tilde{Y}_i) + \bar{\rho} \tilde{\omega}_i \quad (\text{II. 21})$$

Avec  $\bar{\rho} u''_j Y''_i = \frac{\mu_t}{Sc} \frac{\partial \tilde{Y}_i}{\partial x_j}$

- **Equations liées au modèle k - ε.**

$$\frac{\partial \bar{\rho} K}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i K}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_i} \right) + \bar{\rho} u''_j u''_i \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \bar{\rho} \varepsilon \quad (\text{II. 22})$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} \bar{\rho} u''_j u''_i \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (\text{II. 23})$$

## II-1-1-4 Combustion des solides sous FLUENT

### a) Le séchage

Au début du séchage, En dessous d'une humidité dite critique, le séchage se poursuit à vitesse décroissante, contrôlée par la cinétique des différents processus de transport interne de l'eau. Plusieurs auteurs modélisent le séchage des déchets solides sous l'hypothèse simplificatrice que le séchage a lieu à vitesse constante, et écrivent la vitesse de séchage du lit  $r_{sèche}$  (en kg d'eau par seconde et par  $m^3$  de lit) en introduisant un coefficient de transfert de matière gaz-particule  $k_m$  [25].

$$r_{s\grave{e}che} = \frac{k_m a_g M_{H_2O}}{RT_g} (\rho_{eau,surface} - \rho_{eau,\infty}) \quad (\text{II. 24})$$

$a_g$  : Surface spécifique [ $m^2 m^{-3}$  de lit]

$k_m$  : Coefficient de transfert de masse [ $m.s^{-1}$ ]

$M_{H_2O}$  : Masse molaire de l'eau [ $kg.mol^{-1}$ ]

$R$  : Constante des gaz parfaits [ $J.mol^{-1}k^{-1}$ ]

$T_g$  : Température du gaz [ $K$ ]

$\rho_{eau,surface}$  : Pression de la vapeur saturante de l'eau à la surface du solide [ $Pa$ ]

$\rho_{eau,\infty}$  : Pression partielle en vapeur d'eau dans le gaz [ $Pa$ ]

Le séchage dans le code FLUENT se fait par atomisation. En effet, ce processus physique complexe développé et utilisé dans fluent permet de représenter l'eau contenue dans le combustible humide en fine gouttelette. On peut supposer que d'abord l'eau libre s'évapore dans les cavités de la particule. Dans ce cas le séchage peut être subdivisé en quatre étapes : chauffage de la particule, évaporation de l'eau libre, désorption et évaporation de l'eau adsorbée et finalement la séparation de l'eau liée. Pour besoin de simplification dans nos calculs, nous avons supposé notre combustible sec.

### b) La pyrolyse ou la dévolatilisation à deux réactions compétitives de Kobayashi

L'étape de dévolatilisation survient lorsque la température du combustible devient supérieure à la température de dévolatilisation fixée  $T_{vap}$  ou lorsque la masse de la particule est supérieure à la masse de la matière non volatile dans la particule [16]. C'est-à-dire

$$T_p \geq T_{vap} \quad (\text{II. 25})$$

$$m_p \geq (1 - f_{v,o}) m_{p,o} \quad (\text{II. 26})$$

$T_{vap}$  = température de vaporisation.

$m_p$  = masse de la particule (kg)

### c) Combustion en phase gazeuse :

On distingue deux méthodes de combustions : la flamme de prémélange (où le combustible et le comburant sont au préalable mélangés avant l'inflammation) et la flamme de diffusion (combustible et comburant ne sont à leur premier contact qu'au lieu de l'inflammation). Le code de calcul Fluent utilise la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations aux dérivées partielles moyennées de l'aérothermochimie décrites précédemment.

**- Modèle Eddy Dissipation**

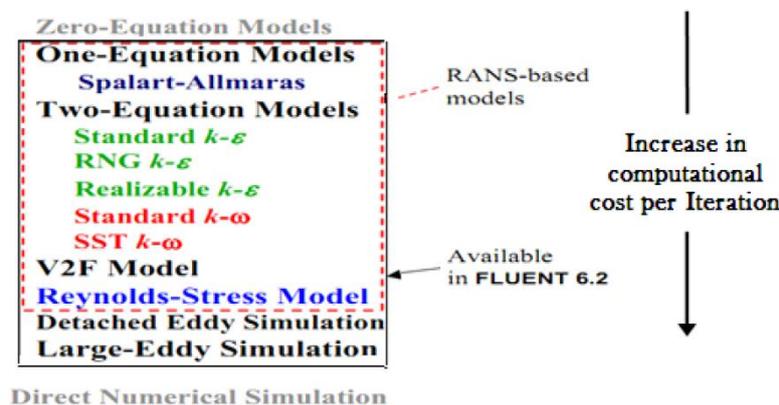
Selon le type de combustion, la cinétique chimique utilisée pour la modélisation donne lieu à plusieurs méthodes, d'où la multiplicité des modèles de combustion :

- Le Modèle « finite rate / Eddy-dissipation »
- Le modèle de la PDF
- *Le Modèle des flammelettes*
- *Le Modèle « Eddy Dissipation »*

Ce dernier modèle est basé sur la turbulence, (tel que son nom l'indique). Ici, la chimie est considérée très rapide. Il est par ailleurs largement utilisé pour les flammes turbulentes. Son avantage est qu'il demande moins de temps de calcul par rapport à d'autres, mais il est limité à des mécanismes réactionnels globaux. Nous l'utilisons pour nos calculs.

**- Modèle de turbulence**

Le code FLUENT contient plusieurs modèles de turbulence, allant du moins couteux en temps machine au plus couteux. Ces modèles sont représentés comme suit :



Pour nos calculs nous avons utilisé le modèle  $k-\epsilon$  standard car les modèles  $k-\epsilon$  sont les plus utilisés pour décrire les écoulements turbulents réactifs.

**- Modèle de rayonnement : P1**

Plusieurs modèles de rayonnement sont définis dans FLUENT à savoir le modèle de ROSSELAND, la DTRM (Discret Transfer Radiation model), le modèle S2S (surface to surface), le modèle DO (Discret Ordinary) et le modèle P1. Nous utilisons le modèle de rayonnement P1 qui est un modèle approprié pour les échanges thermiques entre le gaz et les particules solides et adapté dans plusieurs configurations géométriques [16]

**d) Combustion en phase solide**

**- Modèle PDF / fraction de mélange dans une flamme de Diffusion**

Le modèle de la PDF est une approche statistique qui permet d'effectuer le calcul des écoulements réactifs, en réduisant considérablement le temps de calcul par rapport à d'autres méthodes. Pour simuler la combustion, on génère une table PDF (Probability Density Function) qui permet de tabuler la cinétique chimique. Elle est implémentée dans le code Fluent sous l'hypothèse des réactions à l'équilibre et de diffusion turbulente identique pour toutes les composantes du mélange gazeux. Elle est notée  $p(f)$  et représente la fraction de temps que le fluide passe au voisinage de l'état  $f$ . Elle est définie par

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (\text{II. 27})$$

$T$  est l'échelle de temps,  $\tau_i$  est la fraction de temps pour laquelle  $f$  passe dans  $\Delta f$  et  $p(f)$  dépend de la fluctuation de  $f$ . En pratique  $p(f)$  est inconnue et est alors modélisée mathématiquement. Elle permet de décrire les différentes fluctuations de  $f$  dans un écoulement turbulent. Elle permet de calculer les valeurs moyennes pondérées pour un système de simple fraction de mélange par la relation :

$$\bar{\phi} = \int_0^1 p(f) \phi_i(f) df \quad (\text{II. 28})$$

$\bar{\phi}$  est la valeur moyenne pondérée de la fraction de mélange. Pour un système ayant une seconde fraction de mélange elle utilise la relation :

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \int_0^1 p_1(f_{fuel}) p_2(p_{sec}) \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}) df_{fuel} dp_{sec} \quad (\text{II. 29})$$

Ici,  $p_1$  et  $p_2$  représentent respectivement les PDF du fuel et de la seconde fraction. Nous générons notre table en utilisant deux fractions de mélange. La première fraction de mélange contrôle la combustion du résidu carboné issu de la dévolatilisation, tandis que la seconde fraction contrôle la combustion des matières volatiles.  $\phi_i$  définit le ratio de mélange (combustible/air) à l'équilibre par rapport à celui à la stœchiométrie.

Pour une réaction globale définie sous la forme



Où  $\alpha$  est le rapport air /combustible initial, on exprime encore la fraction de mélange

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (\text{II. 31})$$

Où  $Z_i$  est la fraction massique de l'espèce  $i$ . Les indices  $ox$  et  $fuel$  désignent respectivement le comburant et le combustible. Cette fraction peut être exprimée en fonction du facteur d'air de mélange sous la forme :

$$f = \frac{\phi}{\phi + \alpha} \quad (\text{II. 32})$$

### e) Réaction à la surface du combustible

Après libération de la matière volatile, la surface du combustible commence à se consommer. Pour cela le code FLUENT propose quatre modèles de combustion hétérogène à la surface du combustible :

- **Modèle à taux de diffusion limité** : ce modèle suppose que la réaction extérieure est limitée par un taux déterminé par la diffusion de l'oxydant gazeux à la surface de la particule, il suppose que le diamètre des particules ne change pas. mais que la masse des particules ainsi que la densité diminue. Les particules de charbon deviennent donc plus poreuses
- **Modèle intrinsèque** : il suppose que la réaction à la surface est d'ordre 1. Comme celui précédent, ce modèle suppose que le taux extérieur de réaction inclut les effets de la diffusion
- **Modèle à multiple surface de réaction** ; Le modèle est disponible seulement avec le modèle de transport d'espèce « species transport » pour des réactions volumétriques.
- **Modèle à taux de vitesse et/ou diffusion limitée**. Pour ce modèle, la réaction à la surface de la particule est déterminée soit par le taux de cinétique chimique, soit par la vitesse de diffusion. Le diamètre des particules est supposé constant tandis que la densité est variable. Les paramètres de ce modèle sont contenus dans la base de données de Fluent. Nous l'avons utilisé pour nos calculs.

### f) Présentation de la « Discret Phase Model » (DPM)

Ici il est question pour nous de présenter la manière par laquelle Fluent traite les problèmes de plusieurs phases.

#### - Injections et trajectoire des particules

Dans Fluent, les particules peuvent arriveres différemment dans le brûleur (voir figure 20)

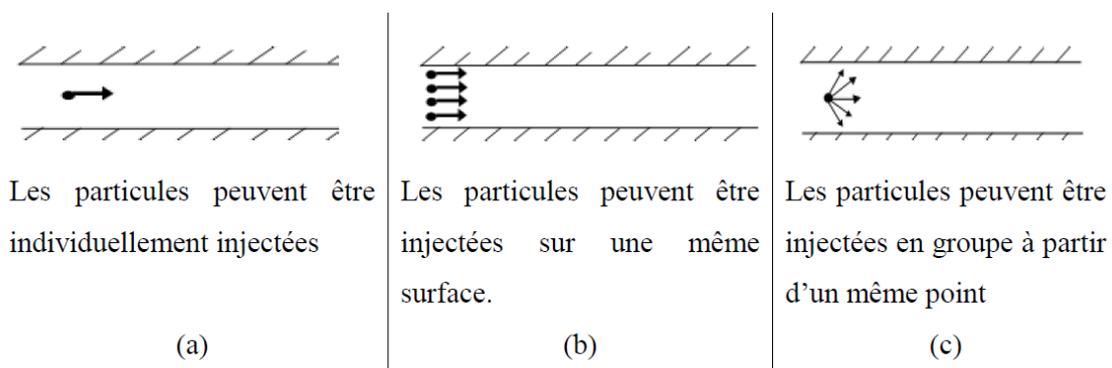


Figure 20 : Schéma d'injection des particules dans le four [16]

La DPM est une méthode d'étude dynamique qui étudie de façon lagrangienne l'évolution des particules, c'est-à-dire les unes après les autres. Leurs trajectoires respectives sont définies dans le système Lagrangien par [16].

$$\frac{d u_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_z(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_z \quad (\text{II. 33})$$

$F_z$  est la force d'accélération additionnelle (force par unité de masse de la particule)

$F_D(u - u_p)$  est la force de résistance de la particule ;

$\rho_p$  = densité de la particule

#### - Évolution du diamètre des particules

Au cours des différentes transformations, la structure des particules de solide peut évoluer de différentes façons. Nous avons choisi de représenter les étapes de séchage et de pyrolyse en considérant que la matière qui s'échappe de la matière solide est artificiellement remplacée par un volume poreux. Ce volume augmente au cours du séchage et de la pyrolyse, puis est totalement consommé au cours de l'étape de combustion du carbone résiduel. Pendant la dévolatilisation, le diamètre de la particule est décrit par l'équation différentielle suivante [14] :

$$\frac{d_p}{d_{p,0}} = 1 + (C_{sw} - 1) \frac{(1 - f_{w,0})m_{p,0} - m_p}{f_{v,0}(1 - f_{w,0})m_{p,0}} \quad (\text{II. 34})$$

Avec  $d_p$  = diamètre courant de la particule

$d_{p,0}$  = diamètre de la particule au début de la dévolatilisation

$\frac{(1 - f_{w,0})m_{p,0} - m_p}{f_{v,0}(1 - f_{w,0})m_{p,0}}$  représente le rapport de la masse dévolatilisée sur la masse totale de la matière volatile que libère la particule

$C_{sw}$  = coefficient de rétrécissement

#### g) Couplage entre la phase continue et la phase discrète et conditions aux limites

Le couplage entre les deux phases se fait par des effets de frottements et de turbulence. Il est modélisé à travers le terme source de l'équation de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Aux limites du milieu réactionnel, la particule peut avoir divers comportements ; Fluent dispose de quatre possibilités :

- *Le choc peut être élastique : la particule est alors réfléchiée au niveau des parois du four,*
- *Le choc peut être mou à la surface, elle y reste une fois en contact*
- *La particule peut s'échapper au niveau des parois,*
- *Elle peut diffuser une fois au contact avec les parois du four*

## II-2 Les outils numériques utilisés pour la combustion multiphasique des solides

Dans le cadre de notre travail nous avons utilisés les logiciels et code suivants :

- **GAMBIT** pour le maillage ;
- **FLUENT** pour la résolution des différentes équations de transport et l'obtention des résultats.

### II-2-1 Logiciel GAMBIT

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D ; pré-processeur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). C'est un logiciel industriel servant à la construction de maillages. Il possède en outre de nombreuses possibilités d'exportation qui permettent l'utilisation de ses maillages par des logiciels industriels comme FLUENT ou SATURNE. Il génère les fichiers \*.msh pour FLUENT. Pour la construction d'un maillage, Gambit crée quatre fichiers :

- un fichier d'extension « dbs » qui contient toutes les données de la session ;
- un fichier « jou », qui retrace l'historique de la session ;
- un fichier « trn », qui reprend toutes les commandes et leurs résultats lors des sessions ;
- un fichier « lok ».

GAMBIT regroupe trois fonctions essentielles:

- La définition de la géométrie du problème : la finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.
- La définition des domaines de calculs. C'est ici que Gambit discrétise le domaine de calcul en de petits volumes appelés maille.
- La définition des frontières (types de conditions aux limites) ; Il s'agit ici des conditions imposées aux différentes faces du domaine : à l'entrée, à la sortie, et sur les parois. La figure suivante nous donne un exemple de maillage effectué sur Gambit.

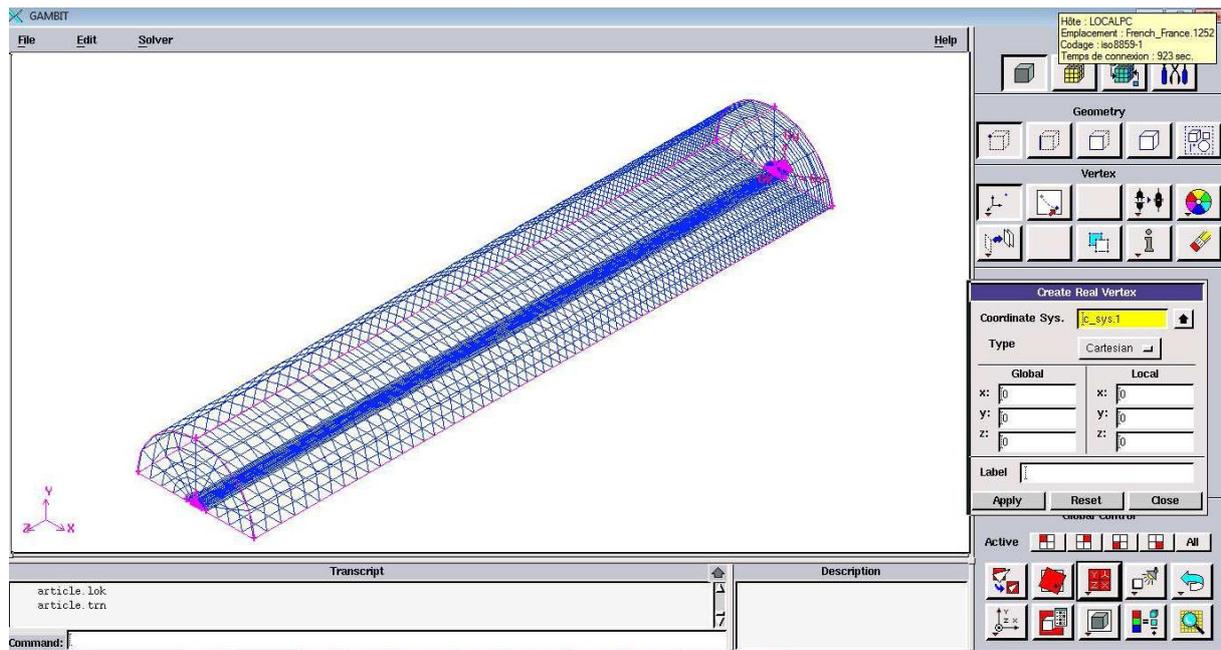


Figure 21 : Exemple de maillage d'un demi-four réalisé dans Gambit [25]

## II-2-2 Logiciel FLUENT

FLUENT est un logiciel qui résout par la méthode des volumes finis des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques, car il est a été conçu pour simuler les écoulements de fluide et le transfert de chaleur dans des géométries complexes. FLUENT est un code industriel offrant de nombreuses possibilités telles que la simulation d'écoulements bi phasiques (réactifs et non réactifs) dans les géométries en 2D et en 3D. Ce code écrit en langage de programmation C++ est utilisé dans l'industrie et dans la recherche. Ce logiciel dispose d'un outil de graphisme, permettant de suivre les résultats et de les exploiter. Il possède également l'option UDF (user define fonction) qui permet à l'utilisateur d'accéder au programme de Fluent et d'y ajouter des équations ou des termes sources. FLUENT a de multiples domaines d'applications notamment en aéronautique, automobile, architecture. Les principales étapes nécessaires pour réussir une simulation d'un problème en mécanique des fluides sous Fluent sont :

- Importation de la géométrie (\*.msh). Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sur Gambit.
- Vérification du maillage importé. Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs et ou de volumes de négatifs.
- Lissage du maillage. Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage.
- Vérification de l'échelle. Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.
- Choix du solveur. « segregated solver » est le plus approprié pour les écoulements incompressibles et « coupled solvers » sont plutôt réservés aux écoulements

compressibles à grande vitesse. C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

- Affichage de la grille. On peut afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.
- Choix du modèle de turbulence. Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement turbulent. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents etc.
- Définition des caractéristiques du fluide. Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.
- Operating conditions. Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ». Fluent effectue tous les calculs, avec une pression appelée gauge pressure. La relation liant la pression absolue à la « gauge pressure » est donnée par :

$$P_{abs} = P_{op} + P_{gauge} \quad (\text{II. 35})$$

Fluent prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme operating pressure ( $P_{op}$ ). Ensuite il faut choisir les conditions aux limites.

- Conditions aux limites usuelles. Il faut fixer les valeurs des conditions aux limites :
  - Velocity inlet ; utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue.
  - Pressure inlet ; utilisée pour les écoulements compressibles et incompressibles.
  - Mass flow inlet ; on impose un débit massique connu à l'entrée, il n'est pas nécessaire d'utiliser mass flow inlet en écoulement incompressible.
  - Pressure outlet ; spécifie la pression statistique de sortie.
  - Outflow ; utilisée pour modéliser les sorties de fluide dont on ne connaît à priori les détails de la vitesse et de la pression à la sortie. Il n'est pas approprié pour les calculs si le problème possède une condition de pressure inlet, si on modélise un écoulement compressible et si on modélise un écoulement instationnaire avec variation de la densité.
  - Wall ; utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides.
- Conditions aux limites en présence d'un domaine tournant. Pour le domaine fluide qui contient les pales du rotor, on spécifie qu'il est en mouvement avec une vitesse de rotation de 2400 tours/minute. Elles servent à une spécification des parois « wall » tournantes et à des définitions des interfaces (pour un maillage « sliding mesh »).
- Choix des critères de convergence. Il s'agit de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.
- Autres critères de contrôle de la convergence. Il s'agit de la conservation de masse, de l'évolution d'une intégrale (surfactive ou volumique) d'une variable pendant les calculs et de l'affichage pendant les calculs de l'évolution d'une force exercée sur une paroi.
- Initialisation des calculs. Il est dans nombreux cas d'initialiser les calculs aux conditions de l'entrée.

- Sauvegarde du fichier \*.cas. Il est conseillé qu'une fois le paramétrage est effectué, de sauvegarder le fichier en format \*.cas.
- Lancement de la simulation. Le paramétrage étant effectué, il ne reste plus qu'à choisir le nombre d'itérations que Fluent devra réaliser.
- Post-traitement numérique de la solution. Fluent fournit des outils pour calculer et rapporter des quantités intégrales sur des surfaces et des frontières. Ces outils vous permettent de trouver le débit massique, les forces et les moments sur des frontières, l'intégrale, le débit, la moyenne, et la moyenne de masse (entre autres des quantités) sur une surface ou un volume. En outre, on peut imprimer des histogrammes des données géométriques et de solution, placer des valeurs de référence pour le calcul des coefficients additionnels. On peut également imprimer ou sauver un compte rendu succinct des modèles, des conditions aux limites.

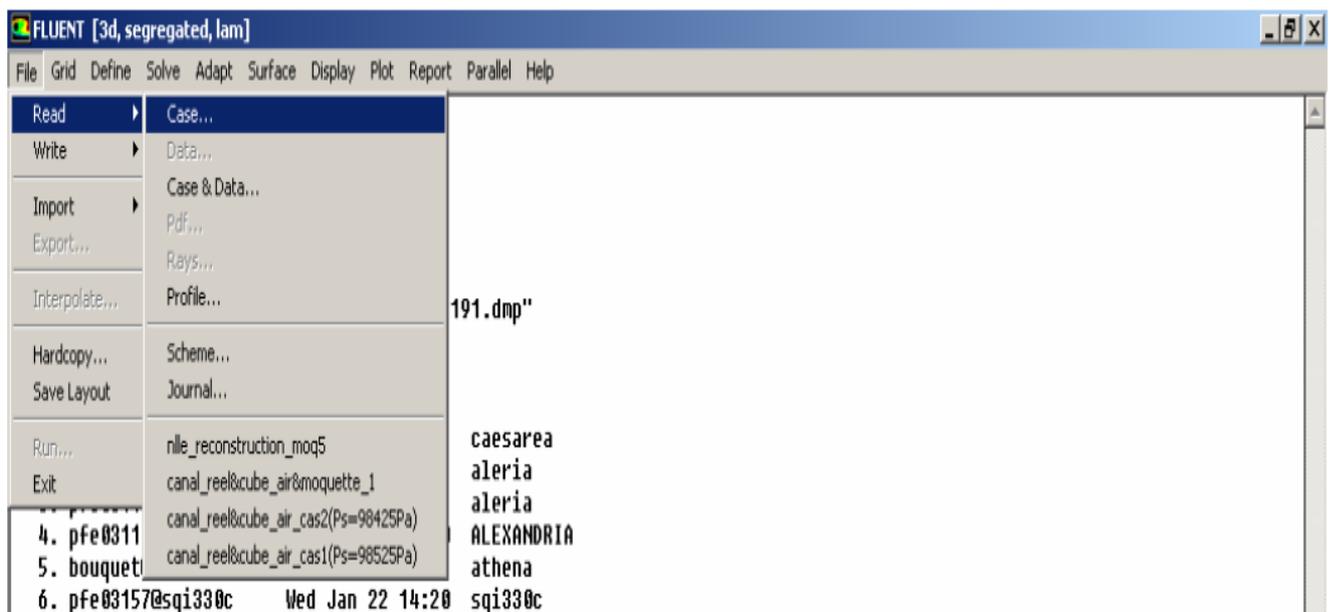


Figure 22 : Interface de Fluent [7]



Figure 23 : Les étapes de la simulation numérique

## II-3 Description géométrique du four et paramètres de fonctionnement

### II-3-1 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est un petit four (cubilot) à vent froid de fonderie de l'acier ou du métal à l'état de charge métallique. Il se présente comme un réacteur où se réalise un contre-courant de gaz-solides. Les charges métalliques s'échauffent au fur et à mesure de leur descente jusqu'à la zone de fusion où elles passent à l'état liquide. Le chargement se fait axialement et la captation des fumées latéralement (Figure 24).

Ce dispositif expérimental comporte à la partie supérieure, un fût ou colonne surmonté d'une ouverture permettant de charger successivement le combustible et les matières métalliques en couches alternées. A la partie inférieure se trouve une rangée de tuyères raccordées à une boîte à vent pour injecter l'air de combustion soufflé par un ventilateur, et un creuset garni de réfractaire pour recueillir la fonte liquide. Au niveau du creuset, on a ménagé un trou de coulée de fonte qui débouche sur un chenal et un orifice de décrassage débouchant lui aussi sur un chenal. Ces deux orifices sont obturés pendant la fusion par des bouchons de terre réfractaire. Le fond du creuset est fermé par une porte qu'on peut ouvrir pour vider le cubilot après la fin des opérations. Il se présente de la manière suivante :

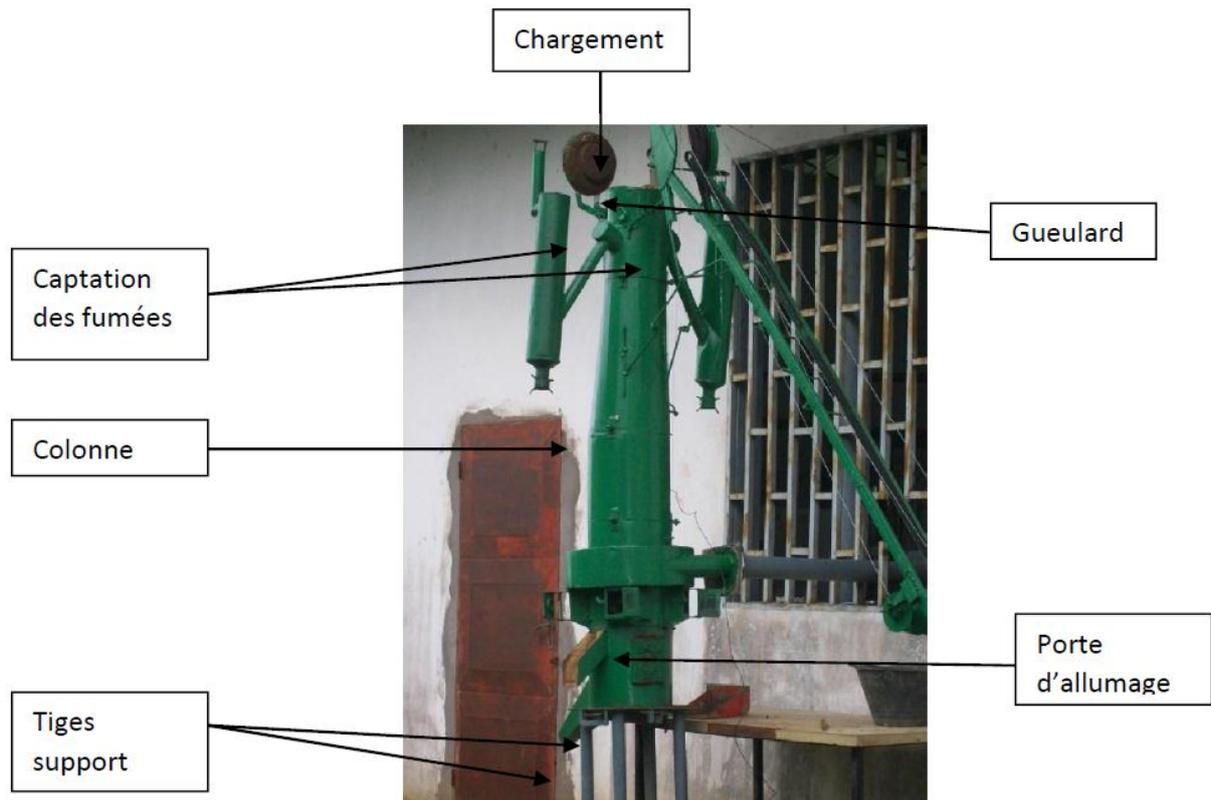


Figure 24 : Dispositif expérimental utilisé [6]

La figure suivante complète cette description

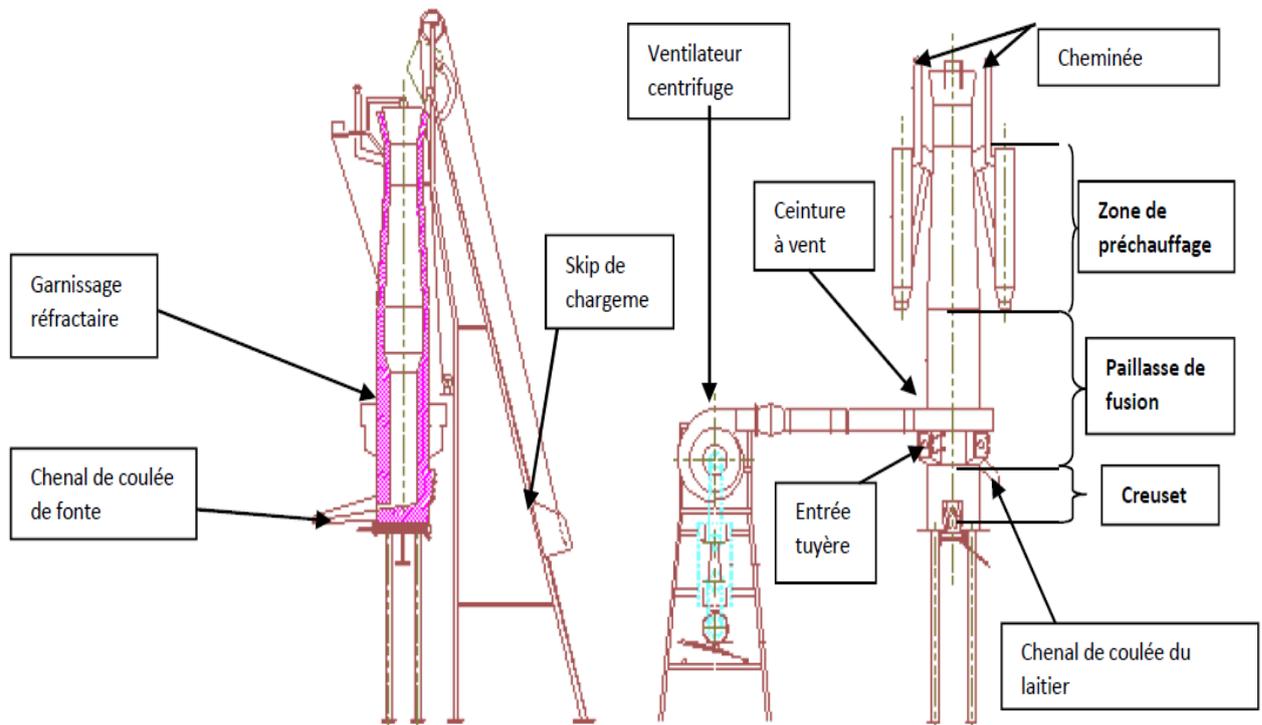


Figure 25 : Vue en coupe et vue d'ensemble de l'unité pilote (échelle 1 :20) [6]

### II-3-2 Paramètres de fonctionnement

Les caractéristiques de ce four de fusion sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Caractéristiques de fonctionnement du cubilot [6]

Paramètres	Valeur
Production horaire (P en Kg/H ou t/h)	153,6 ou 0,1536
Volume de préchauffage (V en l)	38,25
Indice de capacité de préchauffage (ICP en m <sup>3</sup> /t)	0,25
Débit de vent ( $D_{vent}$ en m <sup>3</sup> /h)	120-530
Pression de vent à la sortie des tuyères (P en Pa)	5000-6800
Durée maxi de fonctionnement journalière (en h)	3

Tableau 7 : Analyse élémentaire des coques de noix de palmistes [6]

Paramètre	Valeur	Unité	Méthodes	Normes
Préparation/broyage XP CEN/TS 14780				
Carbone total	54,2	% sec	Microanalyseur	XP CEN/TS 15104
Hydrogène total	6,22	% sec	Microanalyseur	XP CEN/TS 15104
Oxygène total	39,0	% sec	Calcul	
Azote total	0,39	% sec	Microanalyseur	XP CEN/TS 15104
Soufre total	375	mg/kg sec	Chromatographie ionique	EN 15289
Chlore total	313	mg/kg sec	Chromatographie ionique	EN 15289

Tableau 8 : Analyse immédiate des coques de noix de palmistes [6]

Paramètre	Valeur	Unité	Méthodes	Normes
Humidité totale	9,3	% brut	Séchage en étuve	EN 14774-1
Matière volatile à 900 °C pendant 7 min	69,6	% brut	Calcination gravimétrie	et XP CEN/TS15148
Matière volatile à 900 °C pendant 7 min	76,7	% sec	Calcination gravimétrie	et XP CEN/TS15148
Cendres à 815 °C	1,4	% sec	Calcination à 815 °C	ISO 1171
Cendres à 815 °C	1,3	% brut	Calcination à 815 °C	ISO 1171
Carbone fixe	19,8	% brut	Calcul	
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	19 251	J/g brut	Calorimétrie	XP CEN/TS14918
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	21223	J/g sec	Calorimétrie	XP CEN/TS14918
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	17873	J/g brut	Calcul	XP CEN/TS14918
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	19942	J/g sec	Calcul	XP CEN/TS14918

Pour une opération de fusion, on procède comme suit :

- On remplit le four à mi-hauteur avec des morceaux de bois qu'on enflamme ;
- On introduit la quantité de combustible (coques de noix de palmistes) qui correspond à la hauteur de paillasse et on donne le vent aux tuyères ;
- Au-dessus de la paillasse, on introduit une charge de base de fondant (la chaux) ;
- La ferraille, la chaux et le combustible sont par la suite enfournés en charges alternées.

Les charges métalliques s'échauffent au fur et à mesure de leur descente jusqu'à la zone de fusion ou elles passent à l'état liquide.

### II-3-3 Construction du maillage

Le maillage du four de fonderie réalisé dans le logiciel GAMBIT en dimension 3D et présenté de la manière suivante comportant 36676 mailles :

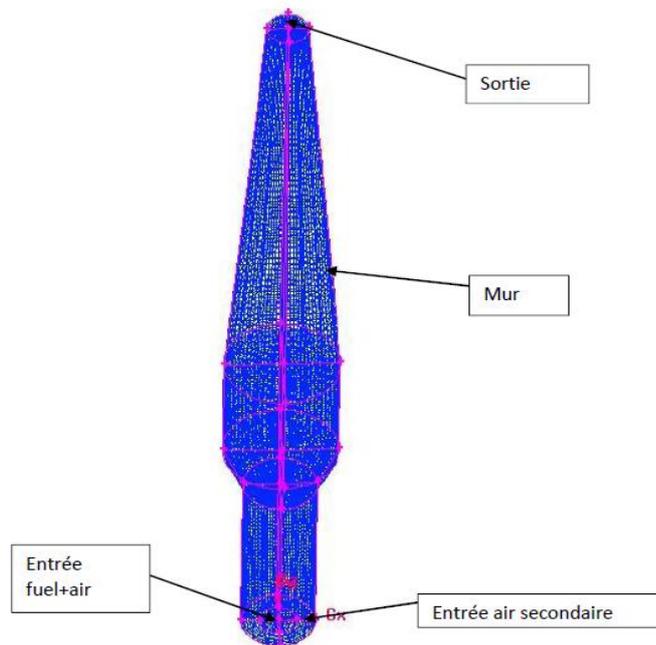
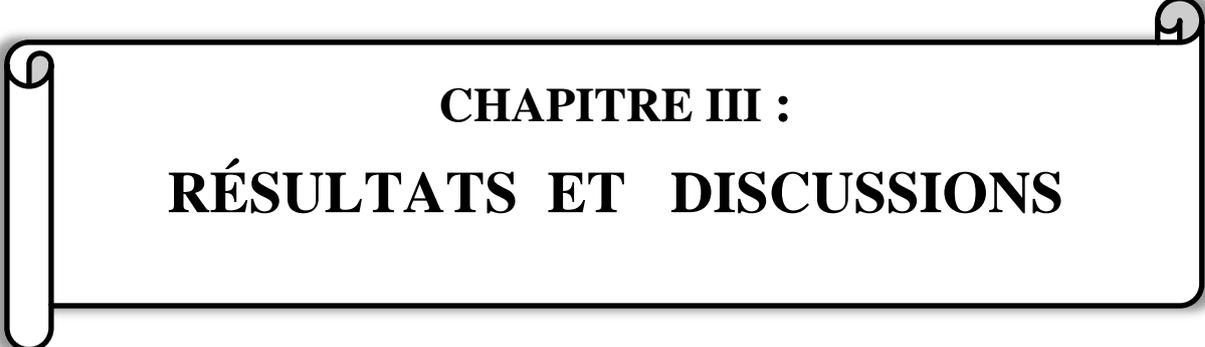


Figure 26 : Figure du maillage du four de fonderie.

### Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous avons présenté les outils théoriques de la combustion multiphasique et y compris les équations de transport, les étapes de combustion des solides dans le code FLUENT entre autres le séchage, la pyrolyse, la combustion homogène et la combustion du résidu carbonneux et en fin les outils numériques utilisés pour la simulation : GAMBIT pour le maillage, FLUENT pour la résolution et les résultats. Ce chapitre a aussi présenté la description du dispositif expérimental utilisé (four) et ses paramètres de fonctionnement. Le troisième chapitre consistera à présenter les résultats obtenus des calculs numériques à partir des logiciels GAMBIT et FLUENT.



**CHAPITRE III :**  
**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

## Introduction

Le chapitre précédent a présenté les outils théoriques et numériques de la combustion multiphasique de la biomasse. Ce dernier chapitre sera consacré à présenter les résultats à partir des calculs appliqués dans un four (cubilot) de fonderie du métal. Le combustible utilisé pour nos calculs est les coques de noix de palmistes avec ses caractéristiques connues. Le combustible est introduit dans le four à travers un système coulissant, l'air comburant alimentant la combustion est introduit à travers un ventilateur.

### III-1 Résultats de la stabilité de la flamme

Pour maintenir la stabilité de la flamme dans le four nous nous sommes inspirés des travaux effectués par EPESSE (2015) [5] [6], ainsi, les valeurs favorables des paramètres de contrôle de la stabilité de la flamme ont été fixées. Elles sont présentées sur les trois tableaux suivants :

*Tableau 9 : Valeurs des paramètres d'air à l'entrée du four.*

Paramètres	Valeurs
Vitesse	50 m/s
Température	1500 K
Intensité de turbulence	10%
Diamètre hydraulique	0,2 m
Fraction de masse d'espèce	O <sub>2</sub> = 0,23

*Tableau 10 : Valeurs des paramètres du fuel à l'entrée du four.*

Paramètres	Valeurs
Vitesse	100 m/s
Température	1500 K
Intensité de turbulence	5%
Diamètre hydraulique	0,2 m
Fraction de masse d'espèce	O <sub>2</sub> = 0,23

Tableau 11 : Valeurs des paramètres à la sortie du four.

Paramètres	Valeurs
Température totale de refoulement	2000 K
Intensité de turbulence de refoulement	5%
Diamètre hydraulique de refoulement	0,2 m
Fraction de masse de d'espèce	O <sub>2</sub> = 0,23

La température du mur est 1200 K.

Le critère de convergence est de 1000 et la solution converge alors autour de 1632 itérations présentée par la figure suivante :

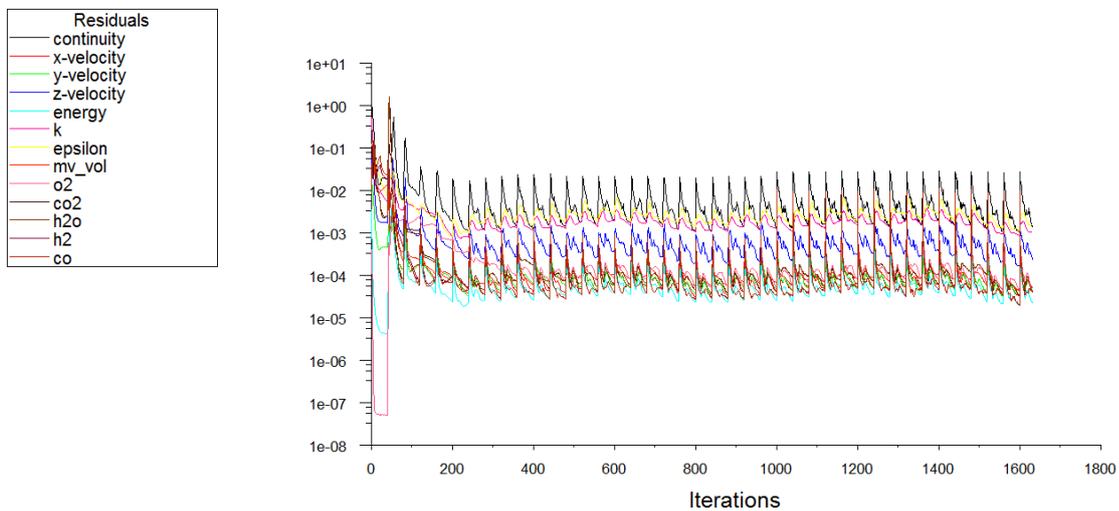


Figure 27 : Courbes de convergence

Les résultats sont les suivants :

- **Champ de température dans le four**

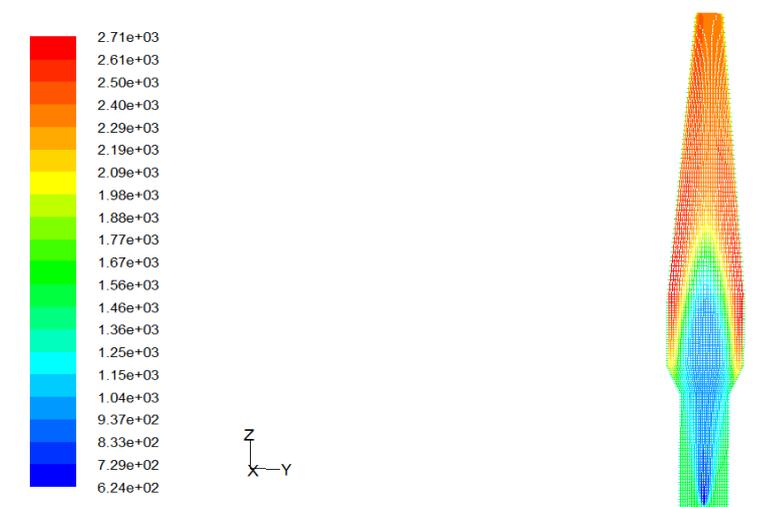


Figure 28 : Champ de température

Le champ de température a pour valeur minimale 624 K et pour valeur maximale 2712 K (les températures sont faible à l'entrée du brûleur et atteignent leurs maximums lorsqu'on s'éloigne de l'entrée dans le four). La flamme se trouve au cœur du four et présente une forme qui caractérise tout à fait sa stabilité.

- **Champ de vitesse**

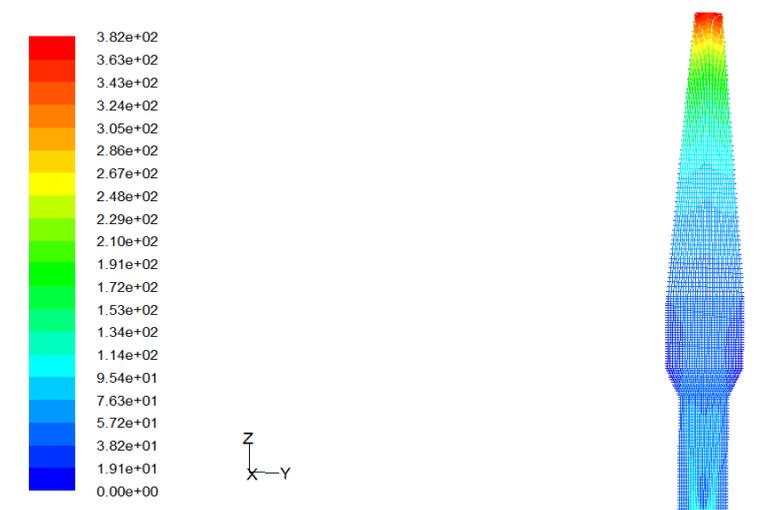


Figure 29 : Champ de vitesse

Le champ de vitesse a pour valeur minimale 0 m/s et pour valeur maximale 382 m/s.

- **Champ de la fraction massique du dioxygène**

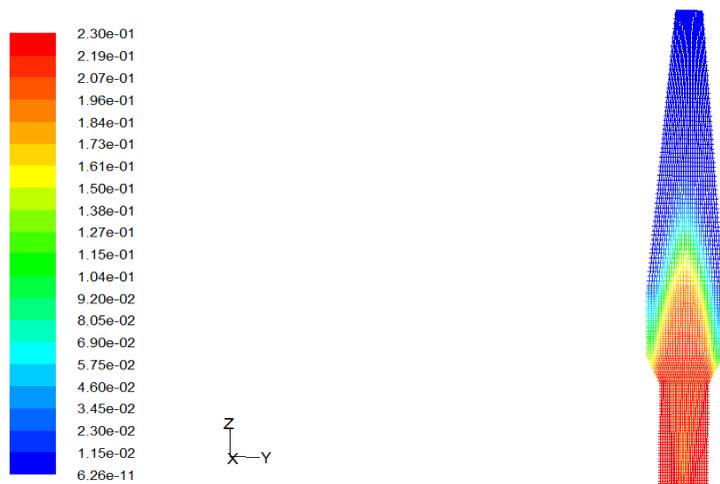


Figure 30 : Champ de la fraction massique du dioxygène

Nous observons la diminution progressive du combustible et la consommation du dioxygène dans la zone de combustion, produisant de nouveaux produits.

- **Champ de la fraction massique du CO<sub>2</sub>**

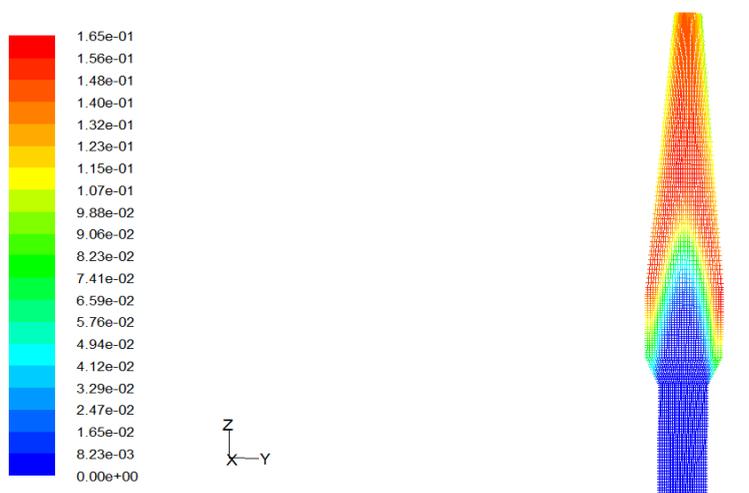


Figure 31 : Champ de la fraction massique du dioxyde de carbone

Nous remarquons une croissance du taux de dioxyde de carbone qui atteint sa valeur maximale dans la zone de combustion cela nous montre qu'il y a effectivement combustion.

- **Champ de la fraction massique du monoxyde du carbone**

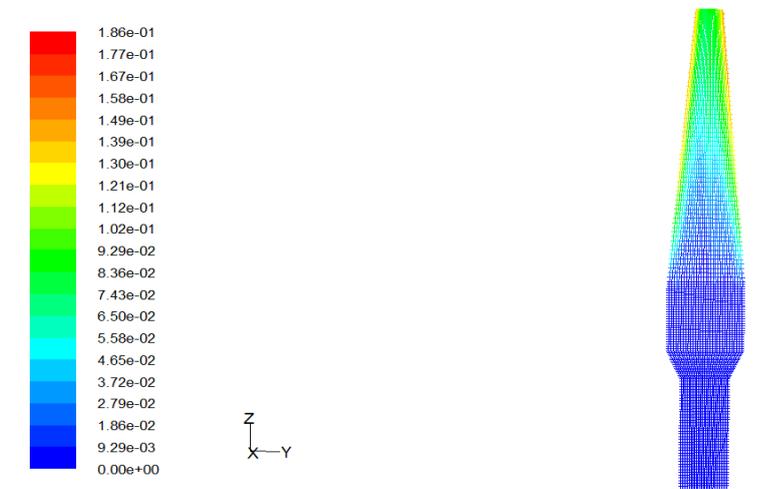


Figure 32 : Champ de la fraction massique du monoxyde du carbone

Nous remarquerons une croissance du taux de monoxyde de carbone dans la zone de combustion.

- **Champ fraction massique des matières volatiles**

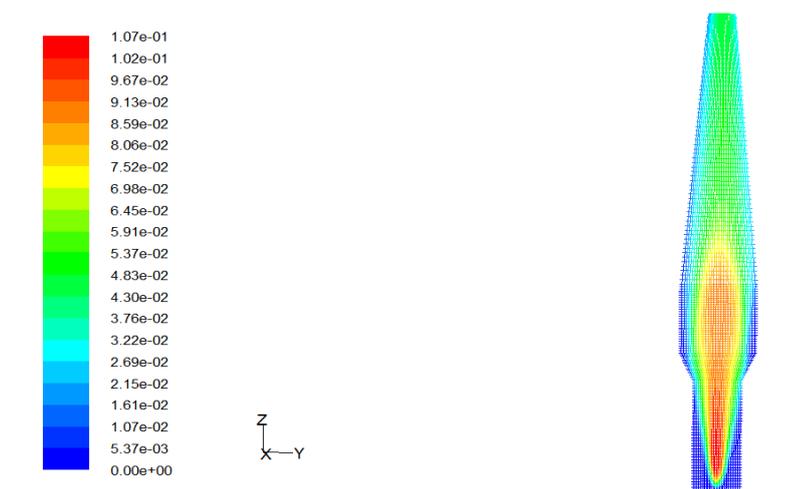


Figure 33 : Champ de la fraction massique des matières volatiles

On constate que les matières volatiles sont importantes juste après l'entrée du four et dans la zone de combustion.

### III-2 Variation des paramètres de contrôle de la stabilité de la flamme

On a choisi deux paramètres de contrôle les plus influents que les autres paramètres. Il s'agit de : la vitesse des gaz à l'entrée du four et la température des gaz à l'entrée du four

#### III-2-1 Variation des vitesses des gaz à l'entrée

##### III-2-1-1 Les vitesses d'air à l'entrée

Les valeurs des autres paramètres fixées ici étant identiques comme dans le cas précédent ( $V_{\text{fuel}} = 100 \text{ m/s}$ ,  $T_{\text{air}} = T_{\text{fuel}} = 1500 \text{ K}$ ) et les champs de température dans le four sont obtenus à des valeurs de 300 K comme minimale et 2500 K comme maximale ([300, 2500]). Les résultats des champs de température correspondant à la variation de la vitesse d'air à l'entrée du four de la stabilité de la flamme sont présentés sur la figure suivante :

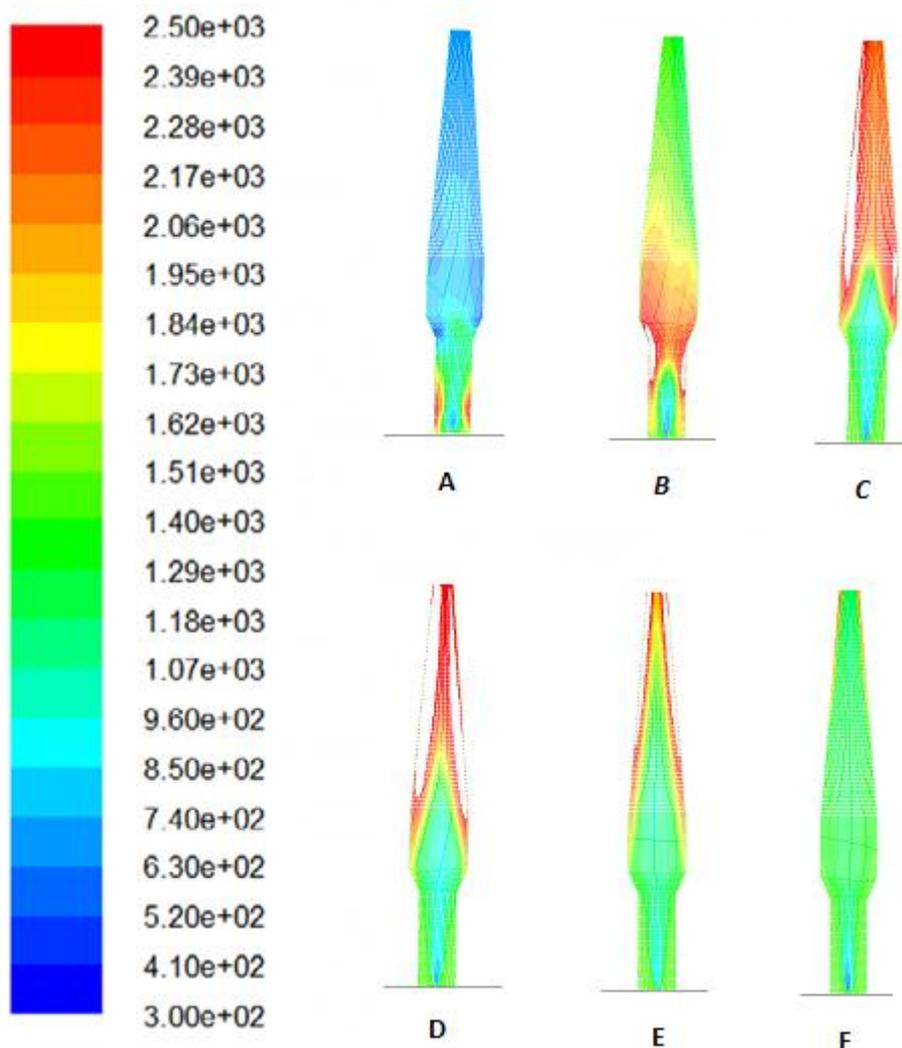


Figure 34 : Champs de la température en fonction de la variation de la vitesse de l'air à l'entrée du four : A, ( $V_{\text{air}} = 2 \text{ m/s}$ ) ; B, ( $V_{\text{air}} = 10 \text{ m/s}$ ) ; C, ( $V_{\text{air}} = 35 \text{ m/s}$ ) ; D, ( $V_{\text{air}} = 50 \text{ m/s}$ ) ; E, ( $V_{\text{air}} = 80 \text{ m/s}$ ) ; F, ( $V_{\text{air}} = 100 \text{ m/s}$ ).

Le four A ( $V_{\text{air}} = 2 \text{ m/s}$ ) présente une flamme presque éteinte. La valeur minimale de cette vitesse d'air de la stabilité de la flamme est  $V_{\text{air}} = 10 \text{ m/s}$  (B) et la valeur maximale est  $V_{\text{air}} = 80 \text{ m/s}$  (E). La moyenne de ces deux valeurs donne une valeur qui stabilise bien la flamme. Elle est proche de  $V_{\text{air}} = 50 \text{ m/s}$ .

### III-2-1-2 Les vitesses du fuel à l'entrée

Pour le cas de l'étude de la variation de la vitesse du fuel à l'entrée du four de la stabilité de la flamme, les résultats des champs de température sont présentés sur la figure 35. Les valeurs des autres paramètres étant identiques comme dans le cas des résultats de la stabilité de la flamme ( $V_{\text{air}} = 50 \text{ m/s}$ ,  $T_{\text{air}} = T_{\text{fuel}} = 1500\text{K}$ ). Les champs de température étant compris dans l'intervalle [300 K, 2500 K]

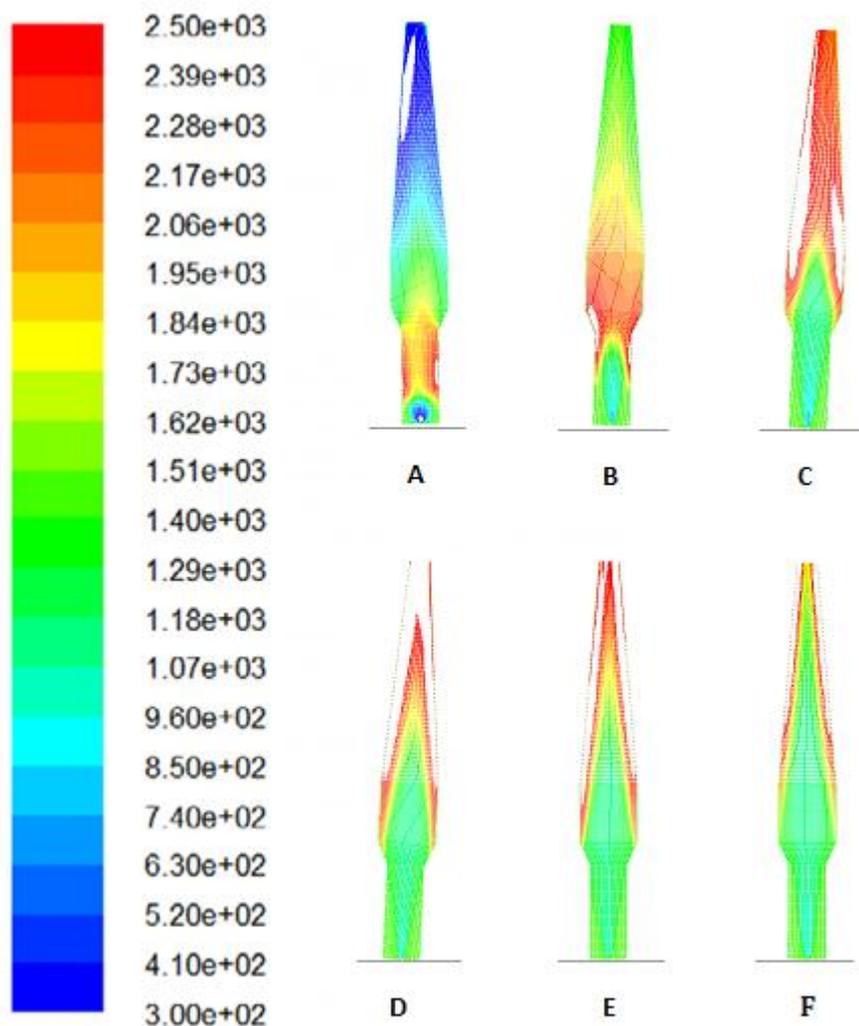


Figure 35 : Champs de la température en fonction de la variation de la vitesse du fuel à l'entrée du four : A, ( $V_{\text{fuel}} = 10 \text{ m/s}$ ) ; B, ( $V_{\text{fuel}} = 40 \text{ m/s}$ ) ; C, ( $V_{\text{fuel}} = 60 \text{ m/s}$ ) ; D, ( $V_{\text{fuel}} = 100 \text{ m/s}$ ) ; E, ( $V_{\text{fuel}} = 120 \text{ m/s}$ ) ; F, ( $V_{\text{fuel}} = 140 \text{ m/s}$ ).

La flamme est minimale à  $V_{\text{fuel}} = 40$  m/s et maximale à  $V_{\text{fuel}} = 140$  m/s. La moyenne de ces deux valeurs montre que la valeur proche pour laquelle la flamme se stabilise est  $V_{\text{fuel}} = 100$  m/s. La flamme en F ( $V_{\text{fuel}} = 140$  m/s) présente un problème limite de forme qui caractérise déjà l'instabilité de la flamme car elle ne se trouve presque pas au cœur du four.

Nous remarquons qu'au fur et à mesure que la vitesse des gaz (air et fuel) à l'entrée du four augmente :

- La zone de combustion passe d'une position inférieure à une position supérieure ;
- L'épaisseur de la flamme augmente (en hauteur) et la flamme s'élargit ;
- La pression et la vitesse augmentent ;
- La zone de croissance du champ de température augmente ou s'élargit suivant la position allant vers la sortie du four.

### **III-2-2 Variation des températures des gaz à l'entrée**

#### ***III-2-2-1 La température d'air à l'entrée***

Pour étudier la variation de la température d'air à l'entrée du four de la stabilité de la flamme, les autres valeurs paramétriques restent inchangées ( $V_{\text{air}} = 50$  m/s,  $V_{\text{fuel}} = 100$  m/s,  $T_{\text{fuel}} = 1500$  K) et les champs de température dans le four sont compris entre 300 K (minimale) et 2500 K (maximale). Les résultats sont présentés sur la figure suivante :

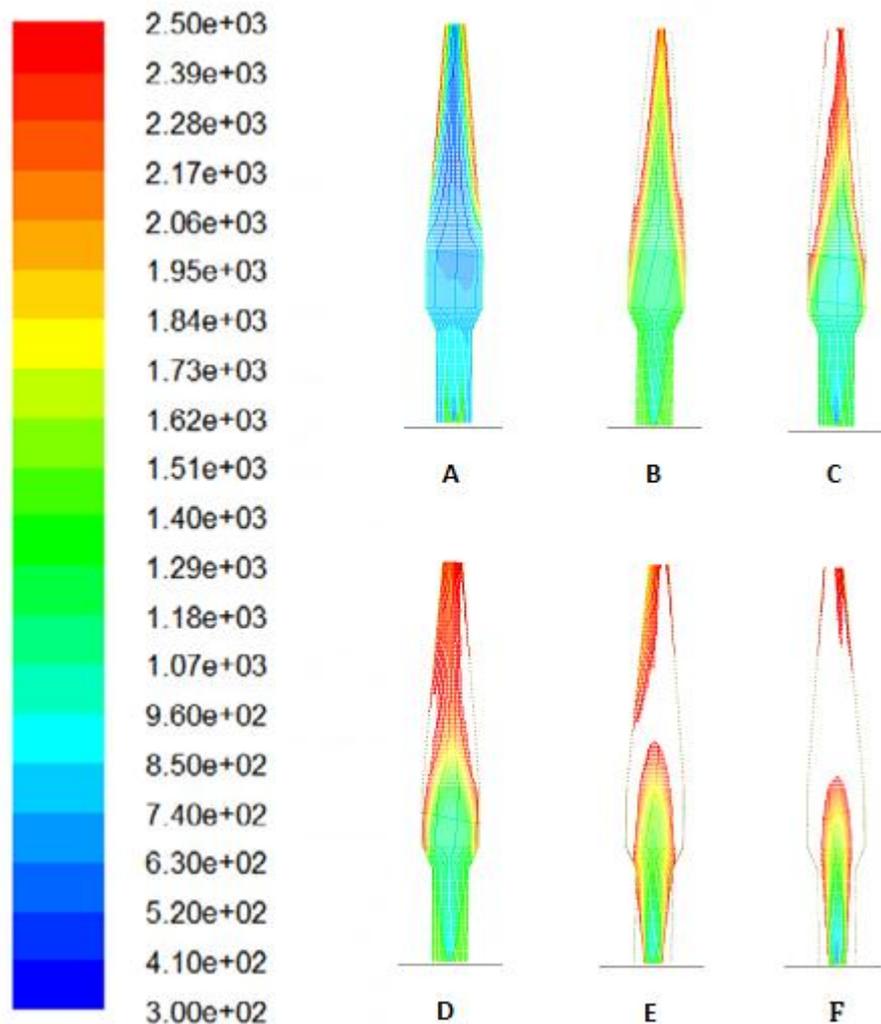


Figure 36 : Champs de température en fonction de la variation de la température d'air à l'entrée du four: A, ( $T_{air} = 800$  K) ; B, ( $T_{air} = 1000$  K) ; C, ( $T_{air} = 1200$  K) ; D, ( $T_{air} = 1500$  K) ; E, ( $T_{air} = 2000$  K) ; F, ( $T_{air} = 2300$  K).

Les valeurs des températures minimale et maximale de la stabilité de la flamme sont respectivement  $T_{air} = 1000$  K (B) et  $T_{air} = 2000$  K (E), elles correspondent respectivement à la flamme maximale et minimale dans le four. La moyenne donne  $T_{air} = 1500$  K (D) ; point qui stabilise la flamme. La flamme tend à s'éteindre en  $T_{air} = 2300$  K (F) en plus elle représente un état d'instabilité.

### III-2-2-2 La température du fuel à l'entrée

Les résultats des champs de température issus de la variation de la température du fuel de la stabilité de la flamme sont présentés sur la figure 37. Les autres valeurs paramétriques étant les mêmes ( $V_{air} = 50$  m/s,  $V_{fuel} = 100$  m/s,  $T_{air} = 1500$  K) et les champs de température étant compris dans [300 K, 2500K].

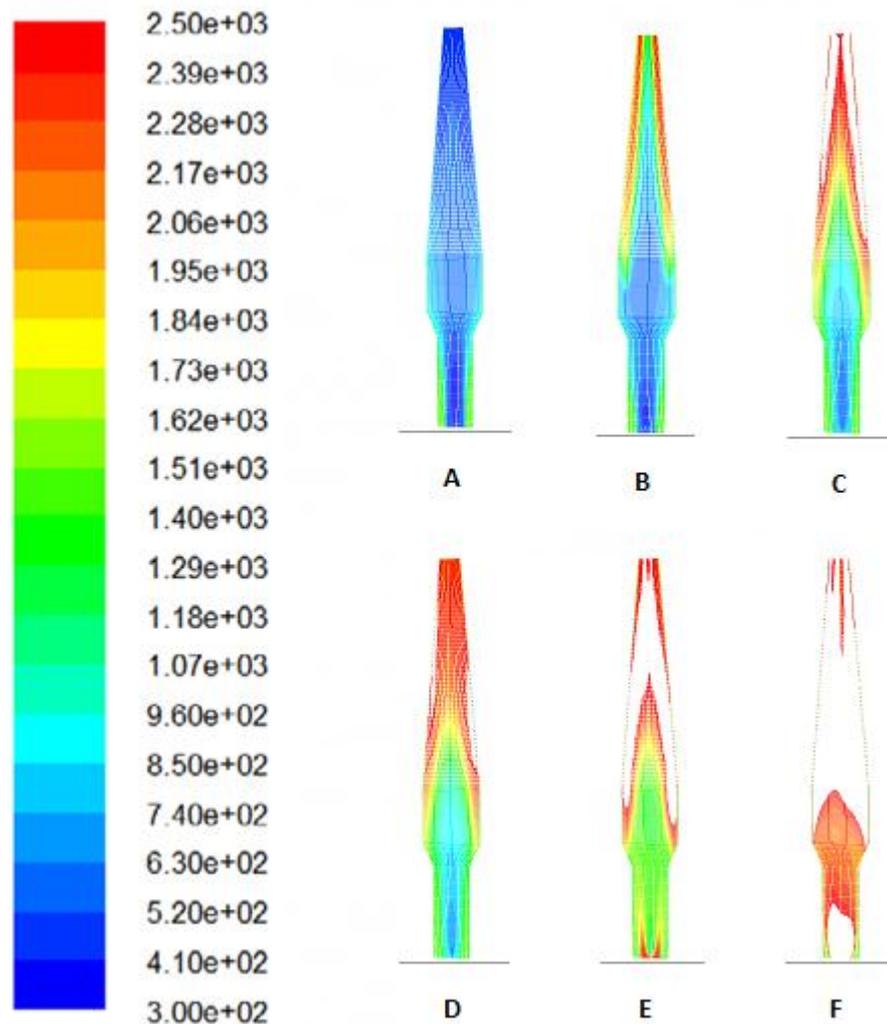


Figure 37 : Champs de température en fonction de la variation de la température du fuel à l'entrée du four: A, ( $T_{\text{fuel}} = 500 \text{ K}$ ) ; B, ( $T_{\text{fuel}} = 700 \text{ K}$ ) ; C, ( $T_{\text{fuel}} = 1000 \text{ K}$ ) ; D, ( $T_{\text{fuel}} = 1500 \text{ K}$ ) ; E, ( $T_{\text{fuel}} = 2000 \text{ K}$ ) ; F, ( $T_{\text{fuel}} = 2400 \text{ K}$ ).

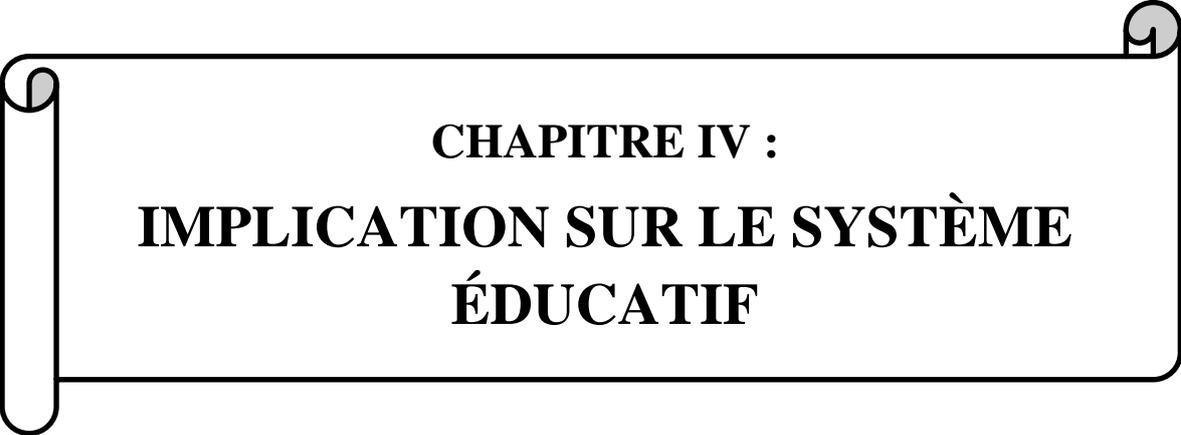
La température minimale de la stabilité de flamme est  $T_{\text{fuel}} = 1000 \text{ K}$  (C) et la température maximale de la stabilité de la flamme est  $T_{\text{fuel}} = 2000 \text{ K}$ . Dans le four en F ( $T_{\text{fuel}} = 2400 \text{ K}$ ) la flamme est instable et elle tend à s'éteindre. La flamme est beaucoup plus stable au four D ( $T_{\text{fuel}} = 1500 \text{ K}$ ).

Au regard de ces résultats on constate qu'au fur et à mesure que la température des gaz (air et fuel) à l'entrée du four augmente :

- La zone de croissance du champ de température se rétrécit ou diminue suivant la position ;
- La zone de combustion passe d'une position inférieure à une position supérieure ;
- L'épaisseur de la flamme diminue (en hauteur) et la flamme se rétrécit ;
- La pression et la vitesse diminuent.

## Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté les résultats de la stabilité de la flamme obtenus à partir des valeurs paramétriques issues des travaux d'EPESSE [5] [6]. Ces résultats présentés sont entre autres le champ de la température, de la vitesse, de la fraction massique des espèces (dioxygène, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone et matières volatiles). Ces résultats prouvent tout à fait que la combustion a eu lieu par conséquent, on a une présence d'une stabilité de la flamme dans le four. Ce chapitre a enfin présenté les résultats de la variation de deux paramètres de contrôle de la stabilité de la flamme : la vitesse et la température des gaz (air et fuel) à l'entrée du four. A l'issue de ces résultats on a constaté que d'une manière générale, l'augmentation de la vitesse des gaz à l'entrée du four entraîne une augmentation et l'élargissement de la flamme, tandis que l'augmentation de la température des gaz à l'entrée du four entraîne une diminution de l'épaisseur de flamme. A chaque fois les valeurs minimales et maximales de la stabilité de la flamme ont été trouvées et la moyenne permettait de bien stabiliser la flamme dans le four.



**CHAPITRE IV :  
IMPLICATION SUR LE SYSTÈME  
ÉDUCATIF**

## Introduction

Dans ce travail nous avons étudié le mode de production de chaleur le plus couramment rencontré dans les ménages et dans l'industrie car la combustion est aujourd'hui l'un des principaux moyens de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans des nombreux systèmes pratiques aussi bien pour produire de la chaleur (chaudières ou fours domestiques et industriels), de l'électricité (centrales thermiques), que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, moteurs fusée...) ou encore la destruction de déchets (incinérateurs). Le développement de la société industrielle moderne et la sauvegarde de l'environnement se fondent sur la maîtrise de cette réaction de combustion. Ce travail a aidé à la compréhension du phénomène de combustion et aux processus de la formation et du développement des flammes et à leur théorie. Il permet aussi d'aborder et traiter les problèmes de combustion technique les plus courants. La combustion a pour intérêt majeur de fournir de l'énergie calorifique et elle émet généralement de la lumière. Ce chapitre est consacré à présenter le lien du sujet avec le programme de l'enseignement secondaire et l'application de la combustion dans four de fonderie.

### IV-1 Le lien avec le programme du secondaire

La combustion est un phénomène étudié par plusieurs disciplines (chimie, mécanique des fluides, thermodynamique, modélisation informatique, physique des systèmes dynamiques...). Par définition, une combustion est une transformation chimique qui produit de l'énergie thermique (transformation chimique exothermique). Les réactifs consommés lors de cette réaction sont le combustible et le comburant et les produits obtenus sont le dioxyde de carbone et l'eau selon l'équation de cinétique chimique suivante :

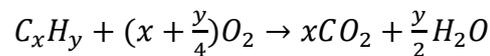
Combustible + comburant  $\rightarrow$  produit de la réaction ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) + chaleur (énergie)

On distingue dans une telle réaction, les réactifs, qui subissent la réaction, que l'on sépare en combustible, qui est l'agent réducteur, tel que ceux mentionnés à la section précédente, et comburant, qui est le corps contenant l'agent oxydant, le plus fréquemment l'air. Les produits de la combustion d'hydrocarbures comprennent du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de l'eau, qui selon les conditions de pression et de température, pourra être sous forme liquide ou vapeur.

Les réactions de combustion, comme toutes les réactions chimiques, se font sans variation de masse de chacun des éléments. Les équations chimiques qui décrivent ces réactions satisfont donc cette contrainte.

Le lien entre cette recherche menée et le métier d'enseignant du secondaire est que la combustion est une science chimique, puisque la combustion est avant tout une réaction (ou des réactions) entre combustible et comburant, elle va faire intervenir un aspect chimique (la chimie est une discipline enseignée au Lycée par les professeurs de Physique-Chimie), elle

permet de comprendre les réactions chimiques, elle permet surtout en classe de première de comprendre la notion d'oxydoréduction et d'étudier les propriétés chimiques des hydrocarbures. Pour un hydrocarbure composé uniquement de carbone et d'hydrogène, de formule  $C_x H_y$ , la réaction de combustion s'écrit :



La combustion fait également intervenir un aspect physique notamment avec la chaleur latente, le pouvoir calorifique, la thermodynamique...

## IV-2 Application dans le four de fonderie

Les applications de la combustion permettent de réveiller le scientifique et l'industriel qui se trouvent endormis chez les élèves. L'application de la combustion dans le four de fonderie consistera à apprendre aux élèves du secondaire le bilan thermique car l'intérêt majeur de la combustion est qu'elle produit l'énergie thermique. Le bilan thermique est indispensable pour traduire la façon dont l'énergie est utilisée et dégradée. La méthode utilisée sera de :

- Créer les clubs Physique pour donner à l'enfant l'envi de faire la physique au supérieur en général et plus tard d'opter pour la spécialité d'Énergie et environnement en particulier ;
- Faire les activités d'apprentissage et encourager les élèves dans ce sens ;
- Organiser les séances de travaux pratiques en créant les binômes ou les trinômes, chacun travaillant sur une tâche donnée concernant la stabilité de la flamme dans un four de fonderie ;
- Proposer une méthodologie de calcul du bilan thermique en donnant le détail des pertes observées ;
- Aider les élèves à conclure sur le meilleur réglage donnant la meilleure efficacité thermique.

## Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté le lien entre le phénomène de combustion (la combustion peut être caractérisée comme une (ou des) réaction(s) irréversible(s) fortement exothermique(s) entre un combustible (ou réducteur) et un comburant (ou oxydant)) et le programme de Physique et Chimie de l'enseignement secondaire ( 2<sup>nd</sup> à Terminale) ainsi que l'application dans le four de fonderie pour réveiller le scientifique et l'industriel endormis en chacun des élèves pour leur montrer l'importance de la combustion et les flammes en domaine industriel et même dans la vie courante.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce travail était d'optimiser le fonctionnement d'un four de fonderie, il s'agissait alors d'identifier les paramètres influents sur la stabilité de la flamme et d'étudier cette stabilité de la flamme dans le four de fonderie à travers deux paramètres de contrôle.

Notre stratégie a consisté dans un premier temps à étudier d'une manière générale les fours de combustion, les flammes de combustion, le processus de combustion multiphasique des solides, les caractéristiques des coques de palmistes et la notion de stabilité d'une flamme, dans un second temps à étudier les outils théoriques et numériques, puis, dans un troisième temps, à présenter la stabilité d'une flamme dans four à partir des valeurs paramétriques fixées et à étudier la stabilité de la flamme en fonction de la variation de deux paramètres de contrôle de la stabilité de la flamme pour tirer des conclusions utiles.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, on retient qu'un four est un outil de production, destiné à chauffer une matière à très haute température, pour opérer une transformation physique ou chimique. Nous distinguons les fours électriques (arc électrique et induction) et les fours à combustible (four rotatif et le cubilot). Une flamme est le lieu où se déroulent dans un écoulement les réactions physiques et chimiques de la combustion. Les différents processus se déroulant dans la zone de combustion sont: le chauffage et le séchage, la pyrolyse ou dévolatilisation, la combustion des résidus charbonneux, l'écoulement des gaz en milieu poreux et la combustion des matières volatiles. Il y a stabilité d'une flamme lorsqu'il y a couplage en concurrence entre la cinétique chimique du délai et le mélange turbulent issu de la vitesse. Pour la caractérisation de nos coques de noix de palmistes, des analyses élémentaires et immédiates ont été faites et nous ont permis de déduire que notre combustible présente une bonne valeur énergétique de par son pouvoir calorifique.

Dans le second chapitre on a vu que les outils théoriques reposent sur équations qui régissent un écoulement avec réaction de combustion multiphasique, il s'agit des équations de l'aérothermochimie et celles de la mécanique des fluides. La simulation numérique repose sur la résolution de ces équations en utilisant des méthodes numériques, le logiciel GAMBIT pour le maillage et le code FLUENT pour la résolution des différentes équations de transport et l'obtention des résultats. Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est un petit four à vent froid.

Le troisième chapitre a présenté les valeurs des paramètres des gaz à l'entrée fixées (issues des travaux menés par EPESSE [5] [6]) par plusieurs critères ont permis d'obtenir les résultats de la stabilité de la flamme dans le four. Ces résultats montrent que la combustion a eu lieu dans les bonnes conditions à partir de l'analyse et l'interprétation des résultats des

champs de température et des fractions massiques des espèces. Les paramètres de contrôle de la stabilité de la flamme choisis sont la vitesse et la température des gaz (air et fuel) à l'entrée du four du fait de leur influence considérable.

Après plusieurs essais de calculs les valeurs minimales et maximales de la vitesse et de la température des gaz (air et fuel) de la stabilité de la flamme ont été déterminées. La moyenne de ces valeurs pour chaque cas nous donne une valeur optimale pour la stabilité de la flamme dans le four de fonderie.

On a remarqué que quand les vitesses des gaz augmentent, la zone de combustion passe d'une position inférieure à une position supérieure, l'épaisseur de la flamme augmente et la flamme s'élargit, la pression et la vitesse augmentent. Mais quand les températures des gaz augmentent, l'épaisseur de la flamme diminue et se rétrécit et la pression et la vitesse diminuent.

La combustion présente un aspect chimique et elle est un processus de type d'oxydoréduction, preuve du lien entre ce travail mené et le programme de l'enseignement secondaire de Physique et Chimie.

## **PERSPECTIVES**

Les points qui seront en projet pour la poursuite de ce travail sont :

- L'étude de la stabilité de la flamme à travers d'autres paramètres de contrôle,
- l'adaptation d'un modèle pour la modélisation et l'optimisation de la stabilité de la flamme avec plusieurs paramètres de contrôle,
- l'application de nos calculs de cette étude numérique de la stabilité de la flamme dans un cadre industriel.

**BIBLIOGRAPHIES ET RÉFÉRENCES**

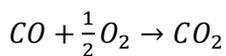
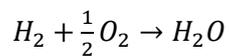
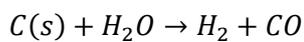
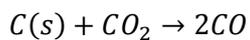
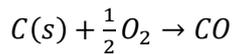
- [1] **Association adilca** [www.adilca.com](http://www.adilca.com) « La combustion des carburants ».
- [2] **BISSAI NKAAS S. J.** (2015). Etude numérique de la combustion multiphasique des coques de palmiste. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master en Sciences Physique, Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Yaoundé (Cameroun).
- [3] **CHAHINE M., GILLON P. et al.** (2011). Etude d'une flamme de diffusion laminaire méthane/air enrichie en oxygène. Avenue de la Recherche Scientifique, 20ème Congrès Français de Mécanique, Université d'Orléans, IUT, 16 Rue d'Issoudun, 1- 6, BP 16729, 45067 Orléans cedex 2 (France), Besançon, 29 août au 2 septembre 2011.
- [4] **CHELEM MAYIGUE Charles** (2009). Simulation numérique des flammes de diffusion turbulentes à l'aide d'un code Fortran. Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Etude Approfondies (D.E.A) en physique, option : mécanique appliquée, Université de Yaoundé I, Facultés des Sciences, Yaoundé (Cameroun).
- [5] **EPESSE MISSE S. E., OBOUNOU M. et al.** (2013). Utilisation des coques de noix de palmiste comme combustible dans un four de fusion de la ferraille. Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°1, 75 – 89, (reçu le 09 Janvier 2013 – accepté le 29 Mars 2013).
- [6] **EPESSE MISSE Samuel Eugène.** (2015). Modélisation et simulation de la combustion des coques de noix de palmiste dans un four de fusion de la ferraille. Thèse de doctorat/PhD, Laboratoire d'énergétique, Option : énergie, Université de Douala, Douala (Cameroun), Soutenue le 15 Septembre 2015.
- [7] **FEDALA D.** (2007). Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent-applications. Simulation numérique des écoulements internes dans les turbomachines, Cao-Dao des turbomachines, Initiation à la CFD, Laboratoire d'Energétique et de Mécaniques des fluides Interne, ENSAM, CER de Paris, arts et métiers Paris Tech, Paris (France), PFE- Octobre 2007.
- [8] **FICHET Vincent** (2008). Modélisation de la combustion du gaz naturel par réseaux de réacteurs avec cinétique chimique détaillée. Thèse présenté pour l'obtention du grade de docteur, Formation doctorale : Energétique, École Centrale Paris, Paris (France), soutenue le 18 décembre 2008.
- [9] **FLUENT 6.3** Tutorial Guide. Tutorial : Multiple Char Réactions.

- [10] **GNENTEDDEM NGAFACK C.** (2010). Ecriture d'une bibliothèque de délais d'ignition et application au calcul d'une flamme de diffusion turbulente méthane-air. Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) de Physique, Option : Energétique, Université de Yaoundé I, Facultés des Sciences, Yaoundé (Cameroun).
- [11] <http://nicole.cortial.net> (Web-combustions-cours) (2010) « Application du premier Principe aux combustions "qu'est-ce que la combustion ?" ». Sciences Physiques en BTS.
- [12] [http://securite-erp.org/incendie/1\\_feu/la\\_combustion.htm](http://securite-erp.org/incendie/1_feu/la_combustion.htm) (2011) « Danger incendie ».
- [13] **LARTIGUE Ghislain** (2004). Simulation des grandes échelles et instabilités de combustion. Mémoire de thèse présentée pour obtenir le titre de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, Spécialité: Dynamique des Fluides, Toulouse (France), Soutenue le 16 Novembre 2004.
- [14] **MAMERI A. \*, FEDIOUN I. et BOUMAZA M.** (2006). Simulation numérique d'une flamme d'hydrogène dans l'air Confrontation avec l'expérience. Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3 (reçu le 25 Juillet 2006 - accepté le 30 Octobre 2006).
- [15] **MANCINI Florent** (2006). Traitement des déchets issus de la biomasse pour la génération de l'énergie. Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur, Université de Bordeaux I, Ecole doctorale des sciences chimiques, Spécialité : génie des procédés, Bordeaux (France), Soutenue le 01 Février 2006.
- [16] **MBOGNING TINWA O.** (2013). Etude numérique de la combustion multiphasique dans un incinérateur. Mémoire présenté en vue de l'obtention du DIPES II, Université de Yaoundé I (ENS), Yaoundé (Cameroun).
- [17] **Microsoft ® Encarta ®** 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.
- [18] **MIN Jiesheng** (2011). Comportement transitionnel et stabilisation de flammes-jets non-prémélangés de méthane dans un coflow d'air dilué en CO<sub>2</sub>. Pour l'obtention du grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, Thèse de doctorat/PhD, Physique INSA de Rouen (France).
- [19] **MOUANGUE Ruben Martin** (2011). Contribution à la modélisation de la combustion turbulente non-prémélangée avec prise en compte de l'auto-allumage. Thèse présentée et soutenue publiquement en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat/PhD en Physique Option : Energétique, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, Yaoundé (Cameroun).
- [20] **NIAL M.** (2008). Caractérisation des paramètres de stabilisation d'une flamme d'un brûleur industriel : Application aux fours de cimenterie. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magistère, Université Hassiba ben bouali Chlef, Algérie.
- [21] **PIERROT Marie** (2008). Présentation – combustion. Lycée du Rempart.

- [22] **ROINARD H.\***, **MICHELI F. et al.** (2010). Étude expérimentale d'une flamme de prémélange propane air en impact sur une plaque plane. ONERA-DMAE, 2 ave Edouard Belin, BP4025, 31055 Toulouse cedex. \*(auteur correspondant : [helene.roinard@oncert.fr](mailto:helene.roinard@oncert.fr)).
- [23] **ROY Josiane** (2006). Les types de combustion. Chimiste M. Sc., en collaboration avec SPIQ ([www.spiq.ca](http://www.spiq.ca)), Octobre 2006.
- [24] **SCHEID J.-F.** (2000). Analyse numérique des équations de Navier-Stokes. Université de Lorraine, Lorraine (France).
- [25] **TAKOU R. A.** (2014). Etude numérique et validation de la combustion de la biomasse à l'aide du code Saturne. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Physique, Option : Energie et environnement, Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Yaoundé (Cameroun).
- [26] **TEUNEKEU TAPONDJOU R. C.** (2014). Optimisation d'un procédé de pyrolyse d'un combustible fortement énergétique. Mémoire présenté en vue de l'obtention du Master of Science en Physique, Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Yaoundé (Cameroun).
- [27] **Wikipédia** « Combustion »

## ANNEXES

### Annexe 1 : Les réactions tirées de mchar (tutorial mchar Fluent) [9]



### Annexe 2 : quelques paramètres et leurs valeurs

Paramètres	Valeurs
Densité	1300 kg/ m <sup>3</sup>
Cp	1000 j/ kg-K
Température de vaporisation	400 K
Fraction composante volatile	28 %
Diffusivité binaire	5.10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>
Coefficient de gonflement	2
Fraction du combustible	64 %
Modèle de combustion	multiple-surface-réaction