

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

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

*Réalisation d'une chaudière biomasse:
Grignon d'olive*

Imad SIHALI

Et

Smail LEBBAL

Sous la direction de : M. Mohamed BENBRAIKA MA A ENP

M. Djamel KARI Enseignant UMBB

Présenté et soutenu publiquement le 19-06-2017

Composition du jury :

Président : M. Arezki SMAILI PR ENP

Examineur : M. Houcine BENNOUR MA A ENP

Promoteur : M. Mohamed BENBRAIKA MA A ENP

Encadreur : M. Djamel KARI Enseignant UMBB

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

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

*Réalisation d'une chaudière biomasse:
Grignon d'olive*

Imad SIHALI

Et

Smail LEBBAL

Sous la direction de : M. Mohamed BENBRAIKA MA A ENP

M. Djamel KARI Enseignant UMBB

Présenté et soutenu publiquement le 19-06-2017

Composition du jury :

Président : M. Arezki SMAILI PR ENP

Examineur : M. Houcine BENNOUR MA A ENP

Promoteur : M. Mohamed BENBRAIKA MA A ENP

Encadreur : M. Djamel KARI Enseignant UMBB

Remerciement

Tout d'abord, on remercie le bon Dieu de nous avoir donné l'opportunité d'achever nos études supérieures.

*Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur M. **D.KARI** pour nous avoir guidé avec patience tout au long de ce travail, pour sa disponibilité et son aide, pour ses compétences et ses conseils qui nous ont été précieux.*

*Nous tenons à remercier notre enseignant et encadreur **M.M.BENBRAIKA** pour ses conseils.*

Nous tenons à remercier les membres de jury, les enseignants du département Génie Mécanique et tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont participé à notre formation.

Nous remercions aussi tous nos amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail

A nos très chères Mères et nos très chers Pères

A nos chers frères Et nos chères sœurs.

*A ceux qui nous ont toujours encouragés pour qu'on réussisse dans
nos études*

A ceux qui ont veillé pour notre bien être

*A ceux qui nous ont soutenus dans les moments les plus difficiles de
nos vies*

Le jour est venu pour leur dire Merci...

*A tous nos amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé
aucun effort pour nous faire bénéficier avec leur aide et leurs
suggestions.*

A tous nos camarades du département de Génie Mécanique.

Smail et Imad

ملخص :

بالنظر إلى المعطيات الحالية سواء على المستوى المحلي أو العالمي, عن الطاقة و البيئة, هناك دافع إلى تنويع مصادرنا من الطاقة, و التي من بينها الكتل الحيوية و خصيصا بقايا الزيتون بعد عصره, المتوفرة في بلادنا والغير مستعملة, بل هي تضر بيئتنا. من هذا المنطلق, استعمال هذه المادة بالطريقة المثلى كان موضوع تخرجنا, باستعماله كوقود للتسخين باستعمال ماكينة من صناعتنا.

الكلمات الدالة: الكتل الحيوية, سخانة, بقايا الزيتون.

Abstract :

Given the current situation at the local or global level, concerning energy and ecology, we are forced to vary our sources of energy, including biomass and precisely the olive-pomace, which is abundant in our country, and that is not used, but still damaging our environment. From this point, an optimal use of this source of energy was the object of our graduate project, using it as a fuel in a biomass boiler that we have built.

Key Words: Biomass, CFD, Boiler, olive-pomace.

Résumé:

Vu la situation actuelle que se soit au niveau local ou mondial, concernant les énergies et l'écologie, ça nous pousse à varier nos sources d'énergie, parmi lesquelles la biomasse et précisément le grignon d'olive, qui est abondant dans notre pays, et qui n'est pas utilisé, mais encore qui nuit à notre environnement. A partir de ce point, une utilisation optimale de cette source d'énergie fut objet de notre projet fin d'étude, en l'utilisant comme carburant dans une chaudière à biomasse que nous avons réalisé.

Mots clés : Biomasse, CFD, Chaudière, grignon d'olive.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Liste des abréviations

Introduction générale.....18

Chapitre 1: Introduction à la bioénergie

1. Introduction:..... 20

2. La biomasse: 20

2.1. Avantages et inconvénients:.....20

2.2. Situation actuelle de la bioénergie:.....21

2.3. Grignon d'olive:23

2.3.1. Composition physique des olives:.....23

2.3.2. Procédé d'extraction d'huile d'olive:24

2.3.2.1. Procédés discontinus ou systèmes à presses:.....24

2.3.2.2. Procédé continu à trois phases:25

2.3.2.3. Procédé continu à deux phases:.....26

2.3.3. Concentrations et pertinence de C, H, O,N et S dans le grignon d'olive:
.....26

2.3.4. Concentrations et pertinence du contenu en cendres du grignon d'olive:
.....27

Chapitre 2: Technologie des chaudières à biomasse

1. Introduction:	29
2. Combustion:	29
2.1 Description du processus de combustion des biomasses:	29
2.2 Variables affectant le processus de combustion:	32
3. Technologies de combustion de biomasse pour les systèmes de chauffage:	38
3.1 Combustion à lit fixe:	38
3.1.1 Four à grille:	38
3.1.1.1 Fours à grille de déplacement:	38
3.1.1.2 Fours à grilles mobiles inclinées et horizontales:	43
3.1.1.3 Fours à grilles vibrantes:	45
3.1.2 Brûleurs à cigares:	46
3.1.3 Grille rotative alimentée par le bas:	47
3.1.4 Four alimenté par le bas (Underfeed stokers) :	48
3.2 Combustion à lit fluidisé:	50
3.2.1 Lit fluidisé à bulles (LFB):	51
3.2.2 Lit fluidisé circulant (LFC):	52
3.3 Combustion de carburant pulvérisé:	53
3.4 Réduction des émissions:	55
3.4.1 Combustion étagée :	56
3.4.2 Polluants non brûlés:	56
3.4.3 Émissions des NO_x:	57
3.4.4 Émissions de particules:	58
3.4.5 Émissions de SO₂:	60

Table des matières

3.5 Systèmes de contrôle de processus pour installations de combustion à biomasse:	60
3.5.1 Dynamique des processus:	61
3.5.2 Etat de l'art des contrôles de processus:	63
3.5.2.1 Contrôle de processus avancé:	65
3.5.2.2 Modèle de contrôle prédictif:	65
3.5.2.3 Capteur de détection avancé:	67

Chapitre 3:Modélisation mathématique

1 Introduction:	69
2 Théorie de transport:	69
2.1 Diffusion :	69
2.2 Advection:	70
2.3 Equation de transport:	71
3 Equations fondamentales de la dynamique des fluides:	72
3.1 Equation de continuité:	72
3.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement:	73
3.3 Conservation de l'énergie	73
3.4 Equation de conservation des espèces	74
3.4.1 Méthode de fraction de mélange:	74
3.4.2 Relation de la fraction de mélange avec la fraction massique des espèces, la densité et la température:	75
4 La turbulence:	76
4.1 Introduction:	76
4.2 La théorie de Kolmogorov:	76
4.3 Modèles de turbulence:	78

Table des matières

4.3.1	Equations de Navier Stokes moyennées au sens de Reynolds:	80
4.4	Modèle de turbulence $k-\varepsilon$:	81
4.4.1	Modélisation de la génération de l'énergie cinétique de turbulence:	82
4.4.2	Fermeture des équations du premier ordre:	82
4.4.3	Le transfert de chaleur dans le modèle de turbulence $k-\varepsilon$:	83
5	Le Rayonnement:.....	83
5.1	Modèle P-1:	84
6	Modélisation de l'interaction Turbulence-Chimie:	85
6.1	Fonction de densité de probabilité (PDF):.....	85
6.1.1	Description de la fonction de densité de probabilité :	85
6.1.2	Dérivation des valeurs scalaires moyennes de la fraction de mélange instantanée:.....	86
7	Ecoulement multiphasique:	88
7.1	L'approche Euler-Lagrange:	88
7.1.1	Limitations:.....	88
7.1.2	Théorie des mouvements de particules:	89
7.1.3	Lois du Coefficient de glissement:	90
7.1.4	Lois d'échange de chaleur et de masse:.....	90

Chapitre 4: Résolution des équations avec Fluent et interprétation des résultats

1	Introduction:	97
2	Architecture générale:	97
3	Eléments constituant la chaudière:.....	97
3.1	Système d'alimentation en biomasse:.....	97

Table des matières

3.2	Système d'alimentation en air:	98
3.3	Echangeur de chaleur:	99
3.4	Grille et cendrier:	100
3.5	Système d'isolation du corps de combustion :	101
4	Dimensionnement thermique de la chaudière:	102
4.1	Evaluation des caractéristiques de la chaudière	102
4.1.1	Puissance thermique de chauffage	102
4.1.2	Débits du combustible et d'air:	103
5	Modélisation d'une chaudière à biomasse avec ANSYS FLUENT 15:	105
5.1	Procédure:	105
5.2	Résultats et interprétations:	111
6	Conclusion générale:	114
	Bibliographie	115
	Annexes	117

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux:

<i>Tab 1.1: Concentrations C, H, O,N et S dans le grignon d'olive en poids secs.[6]</i>	<i>27</i>
<i>Tab 3.1: Valeurs des constantes du modèle k ε.....</i>	<i>82</i>
<i>Tab 4.1: Tableau récapitulatif des caractéristiques de la chaudière.....</i>	<i>104</i>
<i>Tab 4.2: Conditions aux limites.....</i>	<i>110</i>
<i>Tab 4.3: Résultats de la simulation.....</i>	<i>112</i>

Liste des Figures

Liste des figures:

Figure 1.1: Production d'énergie dans le monde [3].....	21
Figure 1.2: Production d'énergie au Brésil.[3]	22
Figure 1.3: Production d'énergie en Algérie. [3].....	22
Figure 1.4:Section transversale et composition de l'olive.[4]	24
Figure 1.5:Procédés d'extraction d'huile par pression.[5]	25
Figure 1.6: Procédés d'extraction d'huile d'olive par centrifugation, a) trois phases; b) deux phases.[5].....	26
Figure 2.1:Processus de combustion d'une particule de biomasse [7].	29
Figure 2.2: Analyse thermogravimétrique de quatre échantillons de bois[7].	30
Figure 2.3: Réduction des émissions et optimisation du rendement . Adapté de [9].....	32
Figure 2.4: Température de flamme adiabatique en fonction de l'excès d'air pour différentes températures d'entrée d'air[7].	34
Figure 2.5: Taux de conversion de CH_4 en fonction de la température pour des temps de résidence différents et pour un excès d'air de 1.1 [7].	35
Figure 2.6: Four à grille[11].	38
Figure 2.7 : Contre courant, Co-courant, Courant transversal [11]	39
Figure 2.8: Principe technologique d'une grille de déplacement[11].	40
Figure 2.9: Four à grille de déplacement alimenté par des épandeurs [11].	41
Figure 2.10: Grilles mobiles inclinées [11].	42
Figure 2.11: Four à grille moderne avec système de contrôle infrarouge, grille séparée par section et contrôle d'air primaire [11].	43
Figure 2.12: Diagramme d'un four à grille mobile horizontale [11].	44
Figure 2.13: Grille vibrante alimentée par des épandeurs[11].	45
Figure 2.14: Bruleurs à cigares [11].	46
Figures 2.15: Grille rotative alimentée par le bas [11].	47

Liste des Figures

Figure 2.16: Four alimenté par le dessous(Underfeed Stoker)[11].....	48
Figure 2.17:Chambre postcombustion avec un écoulement vortex imposé[11]......	48
Figure 2.18: Four LFB[11].....	51
Figure 2.19: Four LFC [11].....	52
Figure 2.20 :a)Brûleur cyclone à deux étages, b) Four à combustible pulvérisé en combinaison avec une chaudière à tube d'eau [11]......	53
Figure 2.21: Points d'impact environnemental (EIP) pour différentes évaluations de l'effet de serre. Adapté de [12].	54
Figure 2.22: Combustion Conventiennelle, Combustion par étage [12].....	56
Figure 2.23: Les émissions de particules en fonction de l'excès d'air, adapté de [12]......	58
Figure 2.24: Réponses dynamiques d'une grande installation d'incinérateur au dosage du carburant, à la vitesse de grille, à l'air primaire et aux changements d'air secondaires adapté de [11].	61
Figure 2.25: Schéma de principe du contrôle (CO / λ) et contrôle de charge adapté de [11]. .	63
Figure 2.26: Schéma de principe du modèle de contrôle prédictif adapté de [11]	65
Figure 3.1: Modèle de diffusion unidimensionnelle [13].....	67
Figure 3.2: Ecoulement le long de l'axe des x[13].	68
Figure 3.3:Volume de contrôle.....	69
Figure 3.4:Représentation schématique de la théorie de Kolmogorov[18].....	75
Figure 3.5: Différentes échelles de la turbulence.	76
Figure 3.6: Comparaison entre simulation numérique directe (DNS), résolution des équations moyennées (RANS) et simulation aux grandes échelles (LES)[15].	77
Figure 3.7: Représentation graphique de la fonction de densité de probabilité [17].	84
Figure 4.1: Silo d'alimentation	95
Figure 4.2: Système d'alimentation en air.	95
Figure 4.3: Echangeur de chaleur.....	96
Figure 4.4: a) Cendrier. b) Grille.....	97
Figure 4.5: Chambre de combustion.	98

Liste des Figures

Figure 4.6: Fenêtre Principale de projet (ANSYS WORKBENCH).	102
Figure 4.7: Fenêtre principale de ANSYS FLUENT.	103
Figure 4.8: Menu Models Dans ANSYS FLUENT	104
Figure 4.9: Fenêtres du modèle Non-Premixed Combustion	105
Figure 4.10: Fenêtres du modèle Discrete Phase	107
Figure 4.11: Fenêtre Properties du menu Materials	107
Figure 4.12: Distribution de température sur un plan médian.....	110
Figure 4.13: Distribution de température dans la chambre de combustion	112

Nomenclature

Nomenclature:

A_c : Taux cinétique	(--)
$C_{p,i}$: Chaleur spécifique à pression constante	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
C_{μ} , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k et σ_ε : Constantes du modèle k- ε	(--)
C_D : Coefficient de glissement	(--)
D : Coefficient de diffusion	(m ² .s ⁻¹)
E : Energie d'activation	(Kj.kg ⁻¹)
F : Densité de flux advectif	(Quantité physique.m/s)
f : Fraction de mélange	(--)
$f_{v,0}$: Fraction volatile	(--)
G_k : Génération de l'énergie cinétique de la turbulence(Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	
g : Constante gravitationnelle	(m/s ²)
H : Enthalpie totale	(Kj.Kg)
H_{Reac} : Chaleur dégagée par la réaction de surface	(Kj/Kg)
γ : Coefficient de transfert de chaleur convectif	(W/m ² .K)
J : La densité de flux diffusif	(Quantité physique scalaire/m ² .s)
k : Conductivité thermique	(W.m.K ⁻¹)
k_t : conductivité thermique turbulente	(W.m.K ⁻¹)
l_e : Longueur de dissipation	(m)
l : Echelle intégrale de longueur	(g.mol)
M : Masse molaire moyenne d'une espèce	(g/mol)
$m_{p,0}$: Masse initiale de la particule	(kg)
m_p : Masse actuelle de la particule	(kg)
N : Nombre d'espèces	(--)
$N(x)$: La densité de particules (particules par volume)	
P : Pression	(N/m ²)
P_i : Taux de production de l'espèce i	(Kg/s)
$p(f)$: Fonction de densité de probabilité	(--)
q : Flux de chaleur	(W)
q_{rv} : Flux de chaleur radiatif	(W)
R : Constante universelle des gaz parfaits	(J/(kg K))
Re : Nombre de Reynolds	(--)
T : Température	(K)
T_p : Température des particules	(K)
$T_{vap/dev}$: Température de vaporisation/dévolatilisation	(K)
t : Temps	(s)
t_e : Durée de vie du tourbillon turbulent	(s)
\bar{u} : vitesse de l'écoulement	(m.s ⁻¹)
\bar{u}_p : vitesse de la particule	(m.s ⁻¹)

Nomenclature

\bar{u} : vitesse moyenne de l'écoulement	(m.s ⁻¹)
u_i : Vitesse de l'espèce i	(m.s ⁻¹)
u_η : Vitesse de retournement d'un tourbillon de Kolmogorov	(m.s ⁻¹)
ω_i : Scalaire thermochimique	(--)
X_i : Fraction molaire	(--)
Y_i : Fraction massique	(--)
Lettres grecques	
σ : Constante de Stefan-Boltzmann	(W/m ² K ⁴)
σ_k : Nombre de Prandtl turbulent pour k	(--)
σ_ε : Nombre de Prandtl turbulent pour ε	(--)
α : Diffusivité thermique	(m ² .s ⁻¹)
ρ : Masse volumique	(kg/m ³)
μ : Viscosité dynamique	(kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
μ_t : Viscosité turbulente	(kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
ν : Viscosité cinématique	(m ² .s ⁻¹)
k : Energie cinétique de la turbulence	(m ² .s ⁻²)
ε : Taux de dissipation de l'énergie	(m ² .s ⁻¹)
ε_p : Emissivité des particules	(--)
λ : Excès d'air	(--)
τ_η : Temps de retournement d'un tourbillon	(s)
τ : Temps de relaxation des particules	(s)
η : Echelle de Kolmogorov	(m)
τ_{eff} : Tenseur de contraintes effectives	(Pa)
Ω : Angle solide	(rd)
Φ : Fonction de phase de diffusion linéaire anisotrope	(--)

Abréviations

Abréviations:

DNS :Direct Numerical simulation

RaNS:Reynolds averaged Navier-Stokes equations

LES : Large Eddy Simulation

RSM :Reynolds Stress Model

CFD : ComputationalFluidDynamic

TGA:Analyse thermogravimétrique

PFR: Réacteur à écoulement idéal

CLF: Combustion à lit fluidisé

LFB:Lit fluidisé à bulles

LFC:Lits fluidisés circulants

PM: Particule de matière

LCA:Evaluation du cycle de vie

TTT: La température, le temps et la turbulence.

SNCR: Réduction sélective non catalytique

SCR: Réduction sélective catalytique

MPC: Modèle de contrôle prédictif

TNO:Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée

PDF: Fonction de densité de probabilité.

Introduction générale

Introduction générale:

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques valorisables en énergie. Les matières organiques peuvent être aussi bien des matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles...), que des matières d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

La part actuelle de la bioénergie dans diverses régions du monde est encore très limitée. La contribution de la biomasse dans le monde est estimée à seulement 10%. Parmi les énergies renouvelables, la biomasse occupe la 3ème place derrière l'énergie hydraulique et l'éolien. Elle progresse régulièrement chaque année depuis 10 ans.

La biomasse joue un rôle important dans le traitement et la destruction des déchets organiques. Elle ne contribue pas au réchauffement climatique et contrairement aux autres énergies renouvelables, la bioénergie se caractérise par une large panoplie de matières premières valorisables en énergie. Ce qui implique des coûts de production tout aussi diversifiés.

En Algérie, la production d'énergie à base de biomasse est inexistante malgré un potentiel de 10,3 millions de tonnes de déchets ménagers (Agence Nationale des déchets AND). On estime le potentiel de biogaz que pourrait générer cette quantité à environ 716,8 millions de m³ de biogaz.

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude intitulé "Réalisation d'une chaudière à biomasse: "grignon d'olive", nous allons réaliser un prototype d'une chaudière domestique de petite puissance. Ce prototype contient plusieurs pièces récupérées à partir d'autres objets, ce projet n'est pas seulement une réalisation mais aussi un projet de recyclage.

Ce projet vise à revaloriser une source d'énergie délaissée qui est la biomasse et plus précisément le grignon d'olive. Le grignon d'olive est un déchet nocif pour l'environnement et à travers ce projet on participe activement dans la protection de l'environnement.

Ce projet consiste en un prototype de chaudière d'une puissance de 25 kW. La chaudière est de type chaudière à lit fixe, ce type a été choisi selon la rentabilité du projet. En effet, une chaudière à lit fluidisée ou à carburant pulvérisé n'est rentable que pour des puissances de 8 MW et plus.

A travers ce projet on espère susciter un intérêt qui permettra d'allouer plus de moyens financiers dans la production d'énergie renouvelable de type biomasse.

Introduction générale

Le mémoire est présenté sous plusieurs chapitres.

Dans le chapitre 1 intitulé "Introduction à la bioénergie", on introduit des concepts de base sur l'énergie de la biomasse, puis on présente la situation mondiale et locale de cette énergie. Enfin, on va brièvement parler du grignon d'olive, de sa composition et de son extraction.

Dans le chapitre 2 intitulé "Technologie des chaudières à biomasse", on va commencer par décrire le processus de combustion, puis les types de chaudières à biomasse avec plusieurs mesures de réduction des émissions, pour enfin conclure avec les systèmes de contrôle et de régulations de processus.

Le chapitre 3 intitulé "Modélisation mathématique" présente les modèles mathématiques pour simuler le fonctionnement d'une chaudière à biomasse. Dans la première partie on s'attèlera à déduire les équations fondamentales de la dynamique des fluides à partir de l'équation de transport. Dans la seconde partie on présentera les modèles de turbulences, de rayonnements, d'interaction turbulence-combustion et d'écoulements multiphasiques.

Le chapitre 4 intitulé "Résolution des équations avec Fluent et interprétation des résultats" présente brièvement le prototype puis la procédure à suivre sur le logiciel Fluent pour en fin conclure avec l'interprétation des résultats.

Chapitre 1

Introduction à la bioénergie

1. Introduction:

La consommation d'énergie fossile qui a explosé au cours de ce siècle nous suggère qu'on est plus très loin d'épuiser les réserves de pétrole et de gaz naturel. On s'attend à ce que cela entraîne une utilisation accrue de l'énergie de la biomasse dite bioénergie.

Les technologies de combustion sont commercialement disponibles dans le monde entier. Elles jouent un rôle majeur dans la production d'énergie à partir de la biomasse. Pour la mise en œuvre de la combustion des biomasses, la technologie de la combustion doit être optimisée pour répondre à des coûts plus bas, des émissions réduites et une efficacité accrue.

2. La biomasse:

La biomasse est l'ensemble des matières organiques de différentes origines (végétaux, animaux ou encore champignons), pouvant devenir des sources d'énergies par combustion.

Utiliser la biomasse pour produire de l'énergie est en fait une manière indirecte d'utiliser l'énergie solaire. En effet, les végétaux, lors de leur croissance, accumulent de l'énergie grâce au processus de la photosynthèse. La photosynthèse est le processus par lequel l'énergie solaire est transformée en énergie chimique par les plantes à l'aide d'un pigment appelé chlorophylle selon la réaction [1]:



Ce procédé utilise du dioxyde de carbone et de l'eau en présence de lumière solaire pour produire du glucose.

2.1. Avantages et inconvénients:

- La biomasse participe au traitement et à la destruction des déchets organiques.
- Une bonne alternative au pétrole.
- Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle.
- Lorsque nous brûlons la biomasse, l'oxygène de l'atmosphère se combine avec le carbone dans les plantes pour produire du CO₂ et de l'eau. Ce CO₂ et cette eau sont à nouveau disponibles pour la croissance des plantes et, par conséquent, le processus cyclique continue de faire de la biomasse, une source d'énergie renouvelable.

Chapitre 1

- La biomasse ne contribue pas au réchauffement climatique. De faibles niveaux de soufre dans la biomasse réduisent la pluie acide [2].

L'inconvénient majeur de la mise en pratique de la biomasse est que le bois (la biomasse la plus utilisée), est souvent surexploité par les industriels. Il y a déforestation. Cela peut avoir des effets nocifs sur la biodiversité.

2.2. Situation actuelle de la bioénergie:

De nombreux pays à travers le monde ont développé un intérêt croissant pour l'utilisation de la biomasse en tant que source d'énergie, et donc divers développements technologiques dans ce domaine sont en cours. Bien que des avancées technologiques importantes aient déjà été atteintes, les technologies de la bioénergie ne sont pas encore commercialement réalisables sans soutien politique. Les pays fixent des objectifs variables et mettent en œuvre des politiques promotionnelles. Grâce à un soutien accru pour les technologies de la bioénergie, des progrès importants ont été réalisés.

La figure ci-dessous montre que la part actuelle de la bioénergie dans diverses régions du monde est encore très limitée. La contribution de la biomasse dans le monde est estimée à seulement 10% [3].

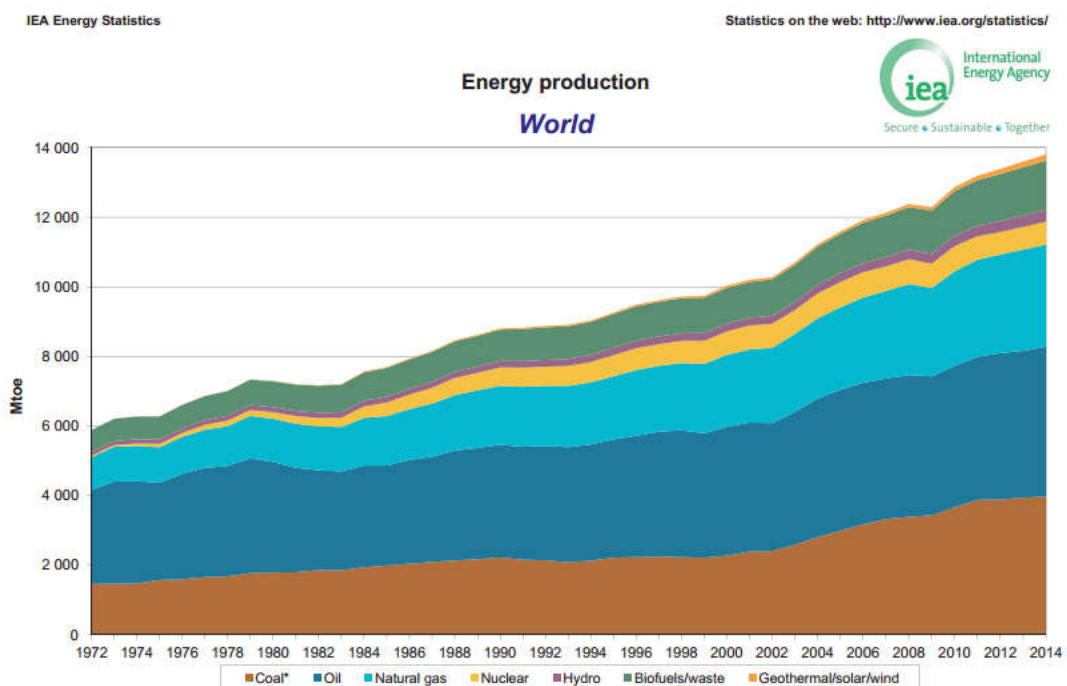


Figure 1.1: Production d'énergie dans le monde [3].

Chapitre 1

Le pays le plus avancé en terme de bioénergie est le Brésil avec pas moins de 20% de sa production énergétique .

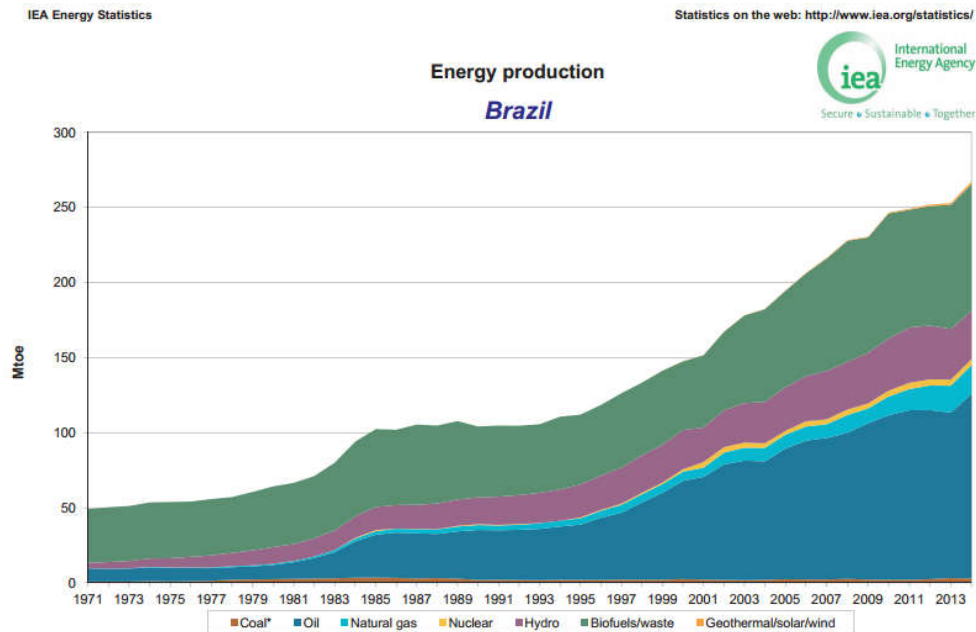


Figure 1.2: Production d'énergie au Brésil.[3]

Et parmi les pays qui n'utilisent pas la bioénergie on retrouve l'Algérie avec une production basée sur le pétrole et le gaz naturel.

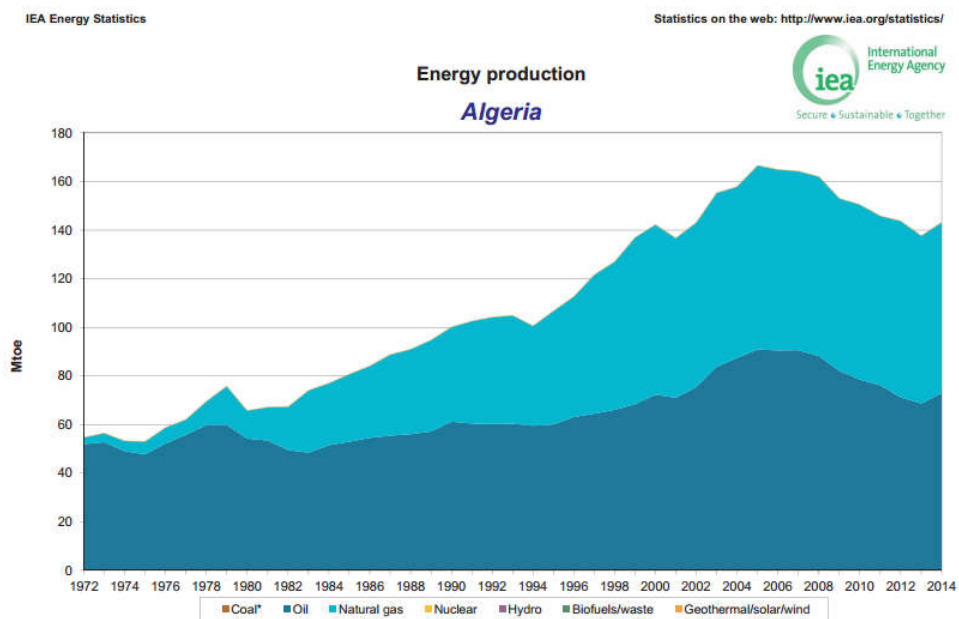


Figure 1.3: Production d'énergie en Algérie. [3]

2.3. Grignon d'olive:

L'olivier est un arbre originaire du bassin méditerranéen, symbole de paix et de pérennité grâce à une longévité hors du commun. L'industrie oléicole dont l'activité principale est la production d'huile d'olive génère deux sous produits: l'un liquide (les margines), l'autre solide (le grignon d'olive). Ces deux rejets sont nocifs en raison des grandes quantités de matière organique qu'ils contiennent .

Il est originaire du proche orient et l'on dit que ce sont les Phéniciens qui l'ont introduit chez nous quelques 800 ans avant J.C. Sa domestication remonterait à 4000 ans avant J.C. en Mésopotamie (Syrie et Iran). Son aire de répartition est aujourd'hui située entre le 25ème et le 45ème parallèle de notre planète, dans l'hémisphère nord aussi bien que sud. C'est pourquoi on le trouve en Californie, au Japon, en Chine, au Mexique, en Argentine, au Chili ou en Australie. Dans tous ces pays, des centaines d'hectares sont plantés chaque année et le bassin méditerranéen dont la production représente 90% de la production mondiale, risque de perdre sa place un jour.

2.3.1. Composition physique des olives:

Le fruit d'olive est une drupe ovoïde ou ellipsoïde. Elle est constituée d'un épicarpe, d'un mésocarpe et d'un endocarpe [4]:

- L'épicarpe qui est en fait la peau de l'olive. Elle est recouverte d'une matière cireuse, la cuticule, qui est imperméable à l'eau (2-2.5 % poids sec).
- Le mésocarpe est la pulpe du fruit. Elle est constituée de cellules dans lesquelles vont être stockées les gouttes de grasses qui formeront l'huile d'olive (71-80.5 % poids sec).
- L'endocarpe est le noyau du fruit. Il comprend:
 - La paroi du noyau (17.3-23 % poids sec).
 - L'amande à l'intérieur du noyau qui contient deux ovaires l'un stérile et l'autre produit un embryon qui donnera en condition favorable d'humidité et de chaleur un nouvel olivier (2-5.5 % poids sec).

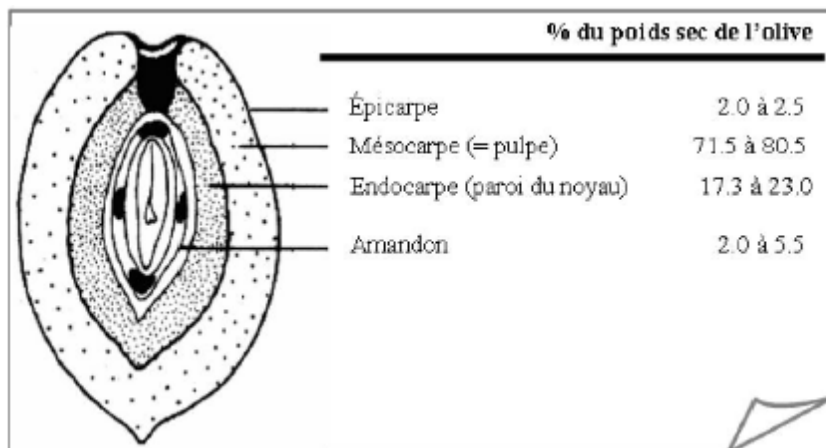


Figure 1.4: Section transversale et composition de l'olive.[4]

2.3.2. Procédé d'extraction d'huile d'olive:

2.3.2.1. Procédés discontinus ou systèmes à presses:

Ce système, dont le processus d'extraction est illustré dans la figure, utilise des presses hydrauliques. Les systèmes à presses sont des systèmes classiques. Ils commencent par un broyage des olives suivi du malaxage et du pressage. Le sous-produit de cette opération est le grignon brut et un moût fait d'effluents d'huileries d'olive et d'huile. La séparation des deux phases se fait par décantation. Les effluents d'huileries d'olive (margines) sont généralement rejetés dans le milieu naturel sans aucun traitement. Par contre les grignons sont utilisés par certaines huileries industrielles pour produire l'huile de grignon par une extraction au solvant ou comme combustible dans des chaudières.

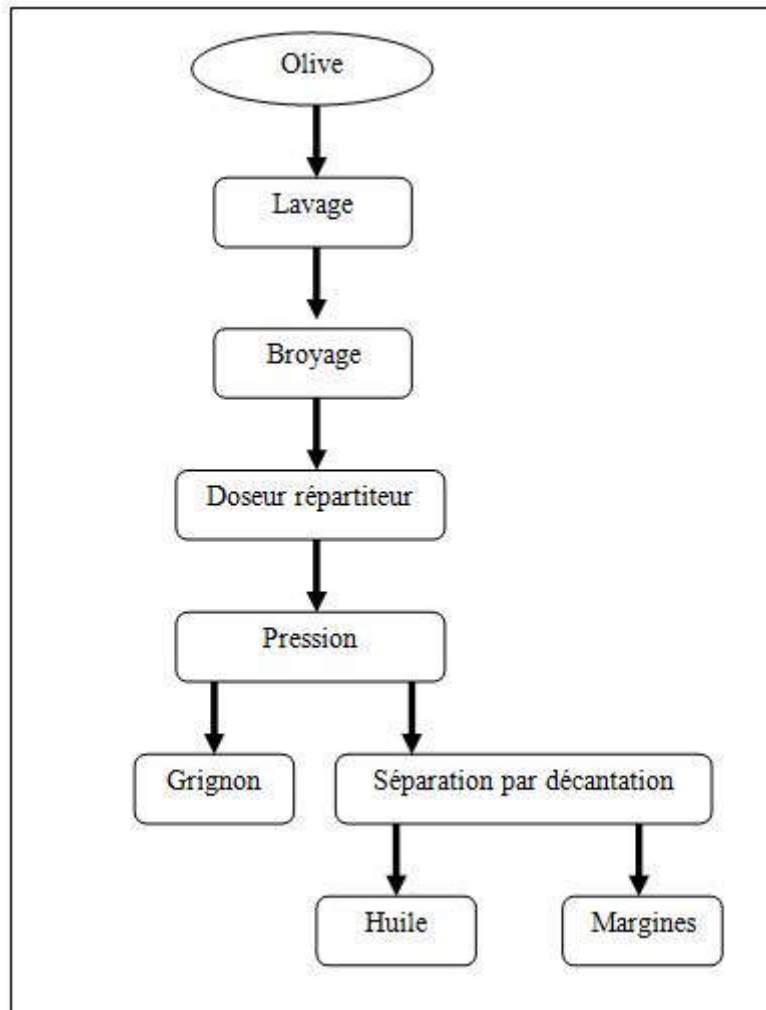


Figure 1.5: Procédés d'extraction d'huile par pression.[5]

2.3.2.2. Procédé continu à trois phases:

L'extraction de l'huile d'olive se fait à travers des phases successives contrairement au procédé discontinu. Les olives sont lavées, broyées, mélangées avec de l'eau chaude et malaxées pour former la pâte d'olive qui est ensuite diluée. Les phases liquides et solides sont séparées par centrifugation donnant les grignons et le moût. Le moût subit à son tour une centrifugation pour séparer l'huile des margines (figure 1.6 a).

2.3.2.3. Procédé continu à deux phases:

Variante du système précédant, ici le décanteur sépare l'huile et mélange le grignon et les eaux de végétation en une unique phase de consistance pâteuse appelée grignon humide ou grignon à deux phases (figure 1.6 b).

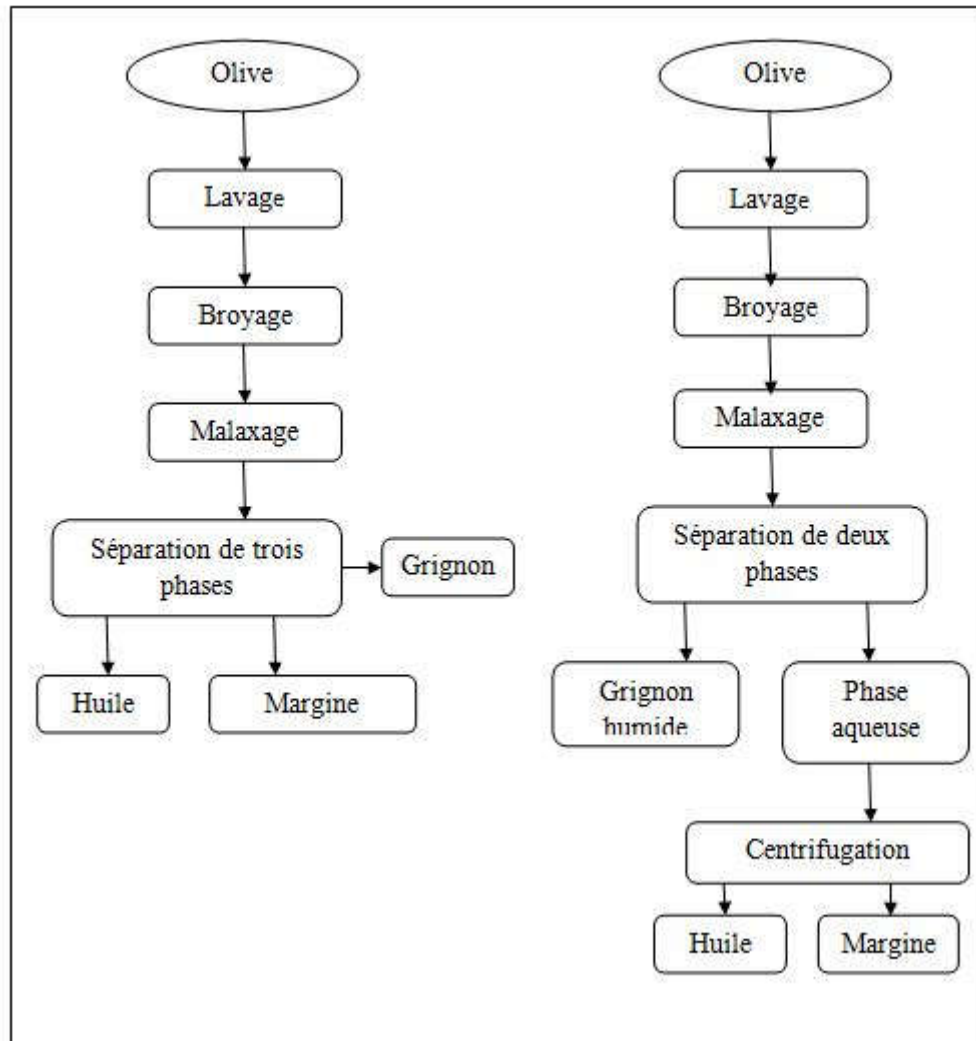


Figure 1.6: Procédés d'extraction d'huile d'olive par centrifugation, a) trois phases; b) deux phases.[5]

2.3.3. Concentrations et pertinence de C, H, O,N et S dans le grignon d'olive:

Le tableau contient des valeurs indicatives pour les quantités moyennes de C, H, O dans les combustibles à base de biomasse. C, H et O sont les principaux composants des combustibles de la biomasse. C et H sont oxydés lors de la combustion par des réactions

Chapitre 1

exothermiques (formation de CO_2 et H_2O). L'Oxygène lié organiquement par la décomposition thermique des combustibles à biomasse couvre une partie de l'Oxygène global nécessaire pour que les réactions de combustion se produisent. Le reste est fourni par injection d'air. Le carbone dans les combustibles à base de biomasse est présent dans des formes partiellement oxydées, ce qui explique le faible pouvoir calorifique de biocarburants, par rapport au charbon.

La recherche a montré que la formation de NO_x lors des processus de combustion de la biomasse à des températures comprises entre 800 et 1100 ° C résulte principalement du N lié au carburant. Les mesures effectuées dans les fours autrichiens et suisses montrent une dépendance logarithmique entre la concentration d'oxydes d'azote émis et la concentration de N dans le combustible de biomasse utilisé.

Le soufre forme les composés gazeux SO_2 , SO_3 et les sulfates alcalins pendant le processus de combustion. En conséquence, la plus grande partie du soufre se transforme en phase vapeur. Dans la chaudière où les gaz de combustion sont rapidement refroidis, les sulfates se condensent sur les particules de cendres volantes ou sur les surfaces des tubes. En outre, le SO_2 peut être lié aux cendres volantes par des réactions de sulfatation. Les tests et les évaluations ont montré que 40 à 90% de l'apport total du soufre est lié dans les cendres. Le reste est émis avec les gaz de combustion comme SO_2 et, dans une moindre mesure, SO_3 .

Type de biomasse	%C	%O	%H	%N	%S
Grignon	54.4	35.9	7.2	1.98	0.12

Concentrations C, H, O, N et S dans le grignon d'olive en poids secs.[6]

2.3.4. Concentrations et pertinence du contenu en cendres du grignon d'olive:

La teneur en cendres des résidus d'olive varie entre 2 à 4 % en poids sec du grignon d'olive [6]. Elle influence le système de décantation des cendres et la technologie de combustion appliquée. Le transport et le stockage des cendres produites dépendent également de la teneur en cendres du carburant. Les combustibles à faible teneur en cendres sont mieux adaptés à l'utilisation thermique que les combustibles à forte teneur en cendres, car des quantités inférieures de cendres simplifient le déshumidification, le transport et le stockage des cendres ainsi que l'utilisation et l'élimination des cendres. Une teneur plus élevée en cendres dans le carburant conduit habituellement à des émissions de poussières plus élevées et influence l'aménagement de l'échangeur de chaleur, le système de nettoyage de l'échangeur de chaleur et la technologie de précipitation des poussières.

Chapitre 2

Technologie des chaudières à biomasse

1. Introduction:

La biomasse peut être transformée en énergie utile (chaleur ou électricité) ou en énergie (charbon de bois, biofuels ou biogaz) par des technologies de conversion thermochimique et biochimique. Les technologies de conversion biochimique comprennent la fermentation pour la production d'alcool et la production de gaz enrichi en méthane. Cependant, dans ce travail, nous nous concentrerons sur les technologies de conversion thermochimique. Ces technologies sont à des stades variables de développement, où la combustion est la plus développée et la plus fréquemment appliquée même si la gazéification et la pyrolyse deviennent de plus en plus importantes.

Quatre technologies thermochimiques de conversion de la biomasse à des fins énergétiques existent: La pyrolyse, la gazéification, la combustion et la liquéfaction. Les produits primaires de ces technologies de conversion peuvent se présenter sous la forme de supports énergétiques tels que le charbon de bois, gaz ou sous forme de chaleur.

2. Combustion:

2.1 Description du processus de combustion des biomasses:

Le processus de combustion de la biomasse comporte un certain nombre d'aspects physico-chimiques complexes. La nature du processus de combustion dépend des propriétés de l'application de combustion. Le processus de combustion peut être divisé en plusieurs processus: séchage, dévolatilisation, combustion des volatiles et combustion du charbon. Le processus global de combustion peut être un processus de combustion en continu ou un processus de combustion par lots, et l'injection d'air peut être soit forcée soit naturelle.

Le séchage, la dévolatilisation et la combustion des volatiles seront toujours les premières étapes dans un processus de combustion de combustible solide. L'importance relative de ces étapes varie en fonction de la technologie mise en œuvre, les propriétés du combustible et les conditions du processus de combustion. Dans les applications de combustion à grande échelle l'alimentation en combustible est continue, comme les grilles mobiles, ces processus se produisent dans toutes les sections de la grille. Toutefois, dans les applications de combustion par lots, il y aura une séparation entre une phase volatile et une phase charbonneuse, en position et en temps.

La figure 2.1 montre qualitativement le processus de combustion d'une petite particule de biomasse. Pour les particules plus grandes, il y aura un certain degré de chevauchement entre les phases.

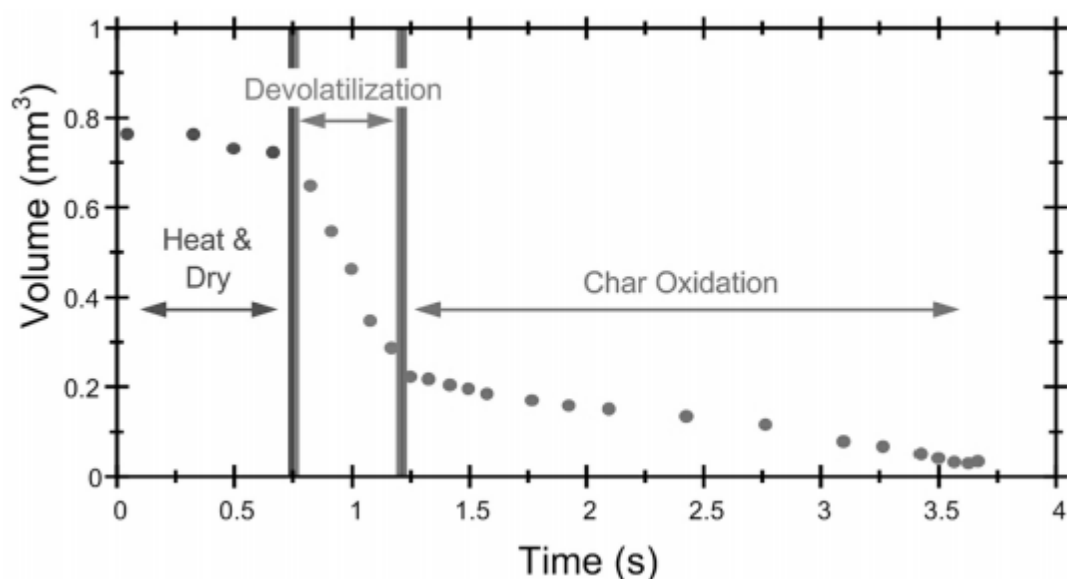


Figure 2.1: Processus de combustion d'une particule de biomasse [7].

- **Séchage:**

L'humidité s'évapore à basse température ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Comme la vaporisation utilise l'énergie libérée du processus de combustion, elle abaisse la température dans la chambre de combustion. Ce phénomène de refroidissement empêche l'allumage de la combustion avant une extraction suffisante de l'eau, ce qui ralentit le processus de combustion.

Le contenu de l'humidité est un facteur limitant et s'il dépasse 65%, la chaleur libérée par la combustion n'est pas suffisante pour satisfaire l'évaporation et pour amorcer la combustion. Par conséquent, la teneur en humidité est une variable de carburant très importante.

- **Dévolatilisation:**

Elle peut être définie comme une dégradation thermique (pyrolyse) en l'absence d'un agent oxydant fourni par l'extérieur. Les produits de pyrolyse sont principalement du goudron et du charbon, et des gaz de faible poids moléculaire. En outre, le CO et le CO₂ peuvent être formés en quantités considérables, en particulier à partir de combustibles riches en oxygène tels que la biomasse comme suit:

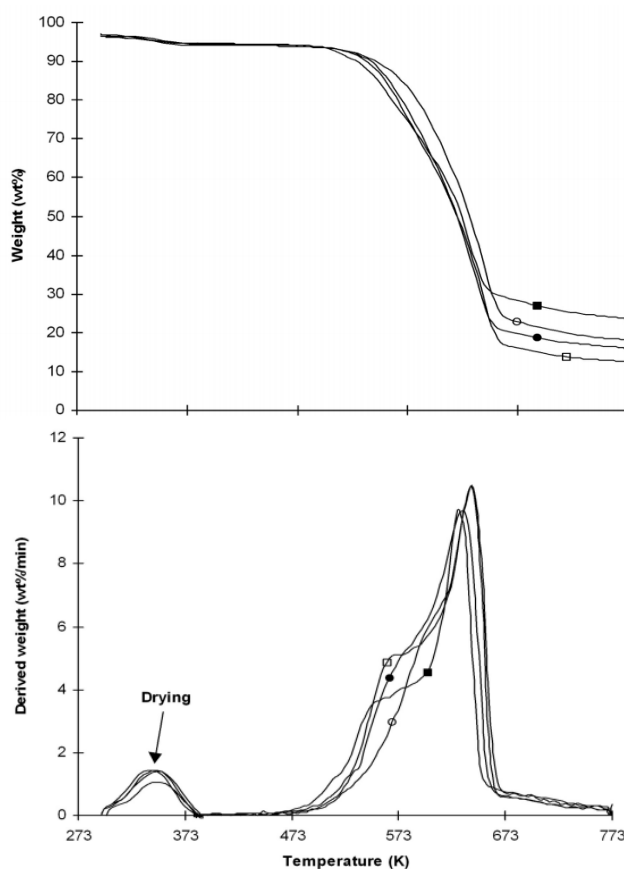


Chapitre 2

Le type de carburant, la température, la pression, le taux de chauffage et le temps de réaction sont toutes des variables qui affectent les quantités et les propriétés des produits formés.

Dans la figure 2.2, des expériences TGA (analyse thermogravimétrique) avec quatre espèces de bois sont présentées. Les 4 espèces de bois montrent des tendances similaires pour le poids et la dérivée du poids en fonction de la température. Cependant, les courbes diffèrent selon certains détails. Lorsque la température augmente, le séchage de l'échantillon se produit. À 473K, la dévolatilisation commence et le taux de dévolatilisation augmente à mesure que la température augmente.

À 673K, la plupart des substances volatiles ont disparu et le taux de dévolatilisation diminue rapidement.



Note: ○ = spruce, □ = birch, ● = beech white, ■ = acacia. 5mg samples heated at a rate of 10°C/min.

Figure 2.2: Analyse thermogravimétrique de quatre échantillons de bois[7].

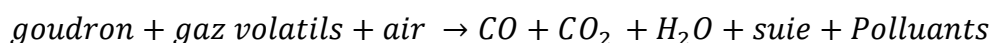
Chapitre 2

Les produits de pyrolyse peuvent être utilisés de différentes façons. Le charbon peut être transformé en charbon actif, utilisé dans l'industrie métallurgique, comme combustible de cuisine domestique ou pour le barbecue. Le gaz de pyrolyse peut être utilisé pour la production de chaleur ou la production d'énergie, ou synthétisé pour produire du méthanol ou de l'ammoniac. Le liquide goudronné, l'huile de pyrolyse ou la bio-huile peut être transformé en carburant liquide hydrocarboné de haute qualité pour les moteurs à combustion (par exemple, le transport) ou utilisé directement pour le chauffage ou la production de l'électricité.

La dévolatilisation est un processus vital qui détermine la position de la flamme et la température de la flamme. La température de la flamme détermine alors la vitesse de combustion du charbon ainsi que la formation de polluants NO_x [8].

- **Combustion des volatiles:**

Les produits volatils émis, y compris les goudrons et les gaz volatils, sont allumés et brûlés, produisant des flammes et libérant de la chaleur et de la lumière. Il peut s'agir soit d'une flamme de pré-mélange laminaire, soit d'une flamme de diffusion, soit d'un mélange des deux [8]. Cette oxydation violente génère une énergie considérable, ce qui contribue aux phases initiales de séchage et de dévolatilisation, puis la durabilité du processus de combustion. Divers produits sont formés pendant la combustion:



Lorsque les substances volatiles sont allumées, la température des particules augmentera à une valeur beaucoup plus élevée, ce qui augmente les taux de dévolatilisation et de combustion du charbon. Les composés volatils émis, principalement des oxydo-composés, réagissent rapidement avec l'air. La réaction d'oxydation est hautement exothermique et sa vitesse peut être exprimée en fonction de plusieurs paramètres tels que la température, la pression et les concentrations de substances volatiles et d'oxygène [8].

- **Combustion du charbon:**

Lors de la dévolatilisation, on forme du charbon qui réagit ensuite avec de l'oxygène dans l'air avec la réaction de combustion suivante:

Chapitre 2



La combustion du charbon a lieu en même temps que la combustion des matières volatiles, apparaissant sous la forme d'une combustion incandescente derrière le front de flammes.

Pendant le processus d'oxydation du charbon, les molécules d'oxygène traversent le front de flammes et sont ensuite rapidement absorbées sur les sites réactifs sur la surface du charbon pour procéder à l'oxydation du charbon. Par rapport à la combustion des matières volatiles, la combustion du charbon est plus exothermique, avec une énergie d'activation inférieure mais avec une vitesse de réaction beaucoup plus lente.

La séparation distincte entre les stades thermiques du séchage, de la dévolatilisation et des zones de combustion volatiles et charbon a été séparée avec succès par des études thermogravimétriques de combustion de petites particules de biomasse (figure 2.1). Néanmoins, lors de la combustion de grandes particules dans des applications pratiques, celles-ci se chevauchent dans une certaine mesure, car les réactions consécutives se déroulent simultanément à différents points de la chambre de combustion.

2.2 Variables affectant le processus de combustion:

Pour illustrer la complexité des processus de combustion impliquant la biomasse, on dénote plusieurs variables influençant les niveaux d'émission et l'efficacité énergétique des chaudières à biomasse:

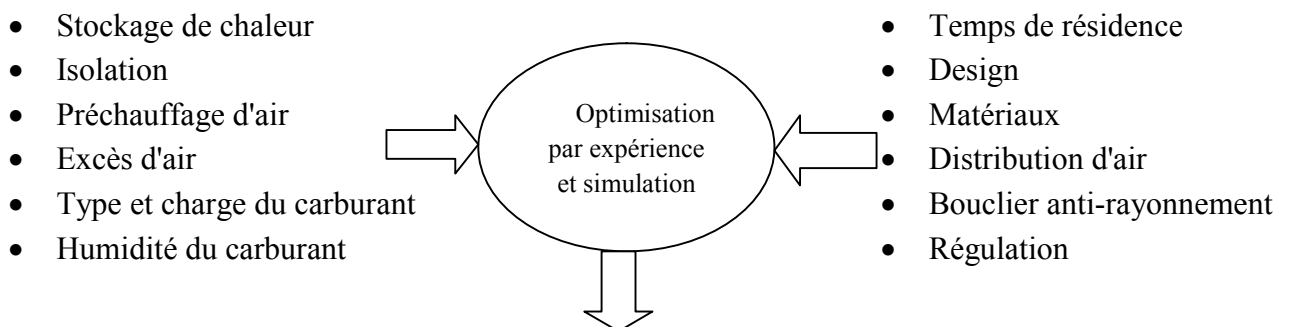


Figure 2.3: Réduction des émissions et optimisation du rendement . Adapté de [9]

- **Stockage de chaleur:**

Une quantité importante de chaleur s'accumule dans les parois de la chambre de combustion, subtilisant de la chaleur en phase de démarrage. Ce qui en résulte sont des niveaux élevés d'émissions provenant de la combustion incomplète.

- **Isolation:**

Concrètement, en améliorant l'isolation de la chambre de combustion, une température plus élevée peut être obtenue. L'isolation peut être améliorée en augmentant l'épaisseur de la paroi ou en utilisant un matériau qui isole mieux.

- **Préchauffage d'air:**

La température de la chambre de combustion peut être considérablement augmentée par un préchauffage de l'air. L'air d'entrée est normalement préchauffé par échange de chaleur avec les gaz de combustion, après que les fumées aient quitté l'échangeur de chaleur. Un exemple est le préchauffage de l'air secondaire qui s'oxyde avec les volatiles.

- **Excès d'air:**

Dans les applications à petite échelle de combustion de la biomasse, il faut avoir un rapport d'excès d'air bien supérieur à l'unité, généralement supérieur à 1,5, pour assurer un mélange suffisant de l'air d'entrée et de la biomasse. Cela signifie qu'il y aura un excès global d'oxygène. La température de combustion sera considérablement réduite par rapport à la température de combustion stœchiométrique, comme on peut le voir à la figure 2.4, principalement en raison du chauffage d'azote inerte dans l'air. Par conséquent, un mélange optimal d'air et de carburant est de la plus haute importance, ce qui permet d'opérer à des rapports d'air excédentaires inférieurs, avec des températures de combustion accrues. Une conception optimale des entrées d'air et une optimisation avancée du contrôle de processus sont nécessaires pour assurer un mélange suffisant à des rapports d'excès d'air très faibles dans les applications de combustion de biomasse.

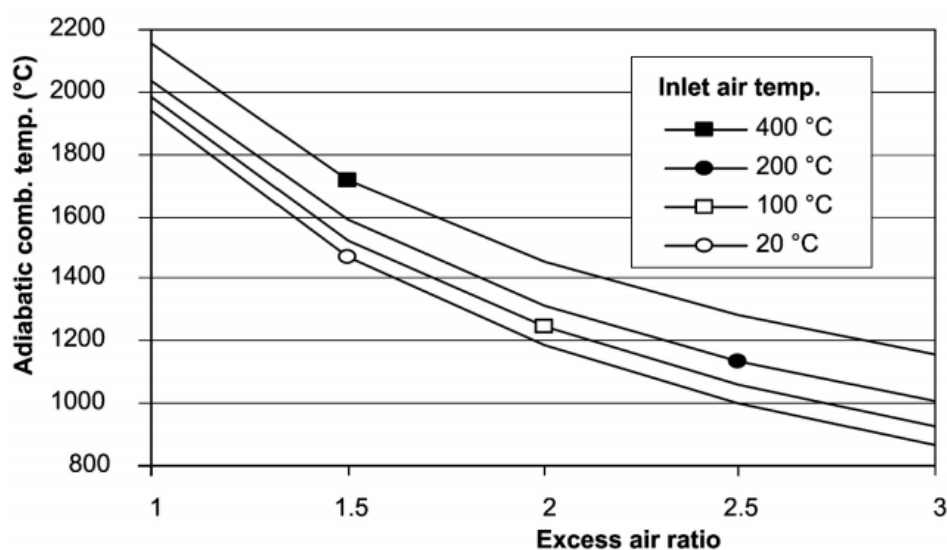


Figure 2.4: Température de flamme adiabatique en fonction de l'excès d'air pour différentes températures d'entrée d'air[7].

- **Type et charge du carburant:**

Le type de carburant influence le processus de combustion à travers diverses caractéristiques des différents types de carburant, principalement en ce qui concerne la composition du carburant, le contenu volatil / charbon, le comportement thermique, la densité, la porosité et la taille. La biomasse contient généralement une teneur élevée en matières volatiles et une faible teneur en charbon par rapport au charbon actif, ce qui rend la biomasse un combustible hautement réactif. Cependant, le contenu volatil varie selon les combustibles et influence le comportement thermique du carburant. La densité et la charge de la biomasse influencent le volume de la chambre de combustion. La porosité du carburant influence la réactivité (perte de masse par unité de temps) du carburant, et par conséquent son comportement de dévolatilisation. La taille du carburant est une variable importante. En effet les particules de carburant plus petites nécessiteront un temps de séjour plus court dans la chambre de combustion.

- **Humidité du combustible:**

L'humidité sera libérée dans la phase de séchage. Par conséquent, la teneur en humidité et ses effets négatifs sur le processus de combustion peuvent être importantes dans les premiers stades de la phase de dévolatilisation, ce qui entraîne des niveaux élevés d'émissions provenant d'une combustion incomplète.

- **Temps de résidence:**

Le temps de résidence influence fortement les émissions dues à la combustion incomplète mais aussi au phénomène de dissociation. La figure 2.5 montre les résultats de la modélisation de la cinétique chimique de la combustion du méthane dans un réacteur à écoulement idéal(PFR).

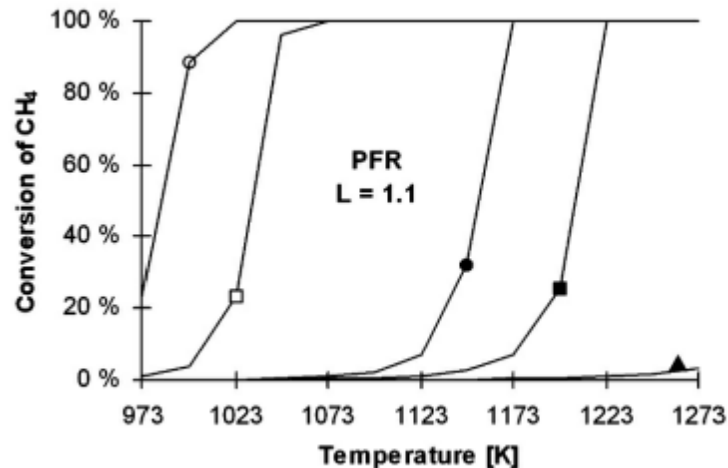


Figure 2.5: Taux de conversion de CH₄ en fonction de la température pour des temps de résidence différents et pour un excès d'air de 1.1 [7].

note: 1000ms, □ = 500ms, ● = 100ms, ■ = 50ms, ▲ = 10ms

On remarque que plus le temps de résidence est grand plus la conversion se fait à des températures plus faibles ce qui réduit les dissociations. Par contre un temps de résidence trop faible (10ms) donne lieu à des combustions incomplètes.

- **Design et matériaux:**

À partir des variables décrites ci-dessus, il est clair que la conception de la chambre de combustion influence de manière significative le processus de combustion, par le choix des matériaux et par des possibilités de contrôle de processus. Les matériaux utilisés, principalement leur capacité calorifique, leur densité, leur épaisseur et leur effet isolant, influencent la température de la chambre de combustion.

- **Distribution d'air:**

Une distribution efficace de l'air est de la plus haute importance pour réduire efficacement les émissions provenant de la combustion incomplète et des émissions de NO_x . La distribution de l'air primaire et secondaire, dans la chambre de combustion influence la qualité de mélange de l'air et du carburant, et donc le temps de séjour, puis la température de combustion nécessaire pour une combustion complète. En appliquant une combustion par étages, une réduction simultanée des émissions provenant de la combustion incomplète et des émissions de NO_x est possible grâce à une séparation de la dévolatilisation et de la combustion des gaz volatils. Il en résulte un mélange amélioré du gaz combustible et de l'air secondaire.

- **Bouclier anti-rayonnement:**

Une méthode pour réduire les températures de surface est d'utiliser des boucliers anti-rayonnement. En optimisant les propriétés thermiques et le placement des boucliers de rayonnement, une température de surface extérieure très faible peut être obtenue avec une perte de chaleur par rayonnement minimisée.

- **Régulation:**

En appliquant un contrôle efficace du processus de combustion, les niveaux d'émission peuvent être minimisés et l'efficacité thermique peut être optimisée. La régulation peut être basée sur des mesures de composés ou de températures de gaz de combustion, qui fourniront ensuite à un contrôleur les informations nécessaires pour changer le processus de combustion, par exemple en modifiant la quantité et la distribution d'air ou de combustible dans la chambre de combustion.

3. Technologies de combustion de biomasse pour les systèmes de chauffage:

Ce paragraphe décrit les systèmes de combustion. Ces systèmes sont généralement équipés de systèmes d'alimentation en carburant mécaniques ou pneumatiques.

En principe, on peut distinguer les technologies de combustion suivantes:

- Combustion à lit fixe.
- Combustion de lit fluidisé.
- Combustion de carburant pulvérisé.

3.1 Combustion à lit fixe:

Les systèmes de combustion à lit fixe comprennent des fours à grilles, des fours alimentés par le dessous (Underfeed Stockers). L'air primaire traverse un lit fixe, dans lequel se produisent le séchage, la gazéification et la combustion du charbon. Les gaz combustibles produits sont brûlés après l'injection d'air secondaire, généralement dans une zone de combustion séparée du lit de combustible.

3.1.1 Four à grille:

Une grille bien conçue et bien contrôlée garantit une répartition homogène du carburant et du lit de braises sur toute la surface de grille. Ceci est très important pour garantir une alimentation en air primaire égale sur les différentes zones de la grille. L'apport d'air inhomogène peut mener à des quantités plus élevées de cendres volantes et peut augmenter l'excès d'oxygène nécessaire à une combustion complète, ce qui entraîne des pertes de chaleur dans la chaudière. En outre, le transport du carburant sur la grille doit être aussi homogène que possible afin de maintenir le lit de braises calme et homogène afin d'éviter la formation de «trous» et d'éviter la libération de cendres volantes et de particules non brûlées autant que possible.

La technologie nécessaire pour atteindre ces objectifs comprend des grilles en mouvement continu, un système de contrôle de hauteur du lit de braises (par exemple par faisceaux infrarouges) et des ventilateurs d'air primaire à fréquence contrôlée pour les différentes sections de grille. L'alimentation en air primaire doit être divisée en sections afin d'être en mesure d'ajuster les quantités spécifiques d'air aux exigences des zones où le séchage, la gazéification et la combustion du charbon coïncident.

Un autre aspect important des fours à grille est qu'une combustion par étapes peut être obtenue en séparant les chambres de combustion primaires et secondaires afin d'éviter le re-mélange de l'air secondaire et les zones séparées de dévolatilisation et d'oxydation. Compte tenu du fait que le mélange air et gaz de combustion dans la chambre de combustion primaire n'est pas optimal en raison de la faible turbulence nécessaire pour un lit de braises sur la grille, la géométrie de la chambre de combustion secondaire et l'injection d'air secondaire doivent garantir un mélange de gaz de combustion et d'air aussi complet que possible.

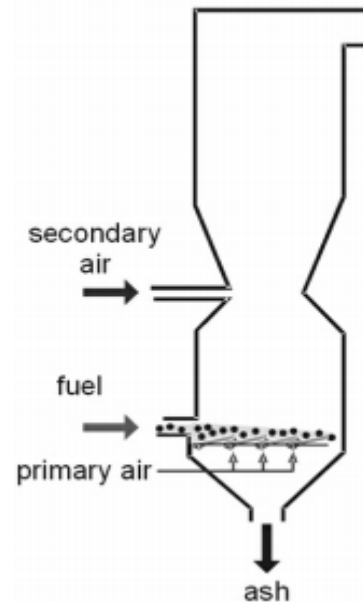


Figure 2.6: Four à grille[11]

Plus la qualité de mélange entre les gaz de combustion et l'air secondaire est grande, plus la quantité d'excès d'oxygène sera moindre et plus l'efficacité sera élevée. L'effet de mélange peut être amélioré avec des canaux relativement petits où les gaz de combustion atteignent des vitesses élevées et où l'air secondaire est injecté à grande vitesse par des trous bien répartis sur la section transversale de ce canal.

Sur la base des directions d'écoulement du carburant et des gaz de combustion, il existe trois systèmes d'exploitation pour les installations de combustion à grille:

- Contre courant (la flamme dans le sens opposé au carburant).
- Co-courant (la flamme dans le même sens que le carburant).
- Écoulement transversal (échappement des gaz de combustion au milieu du four).

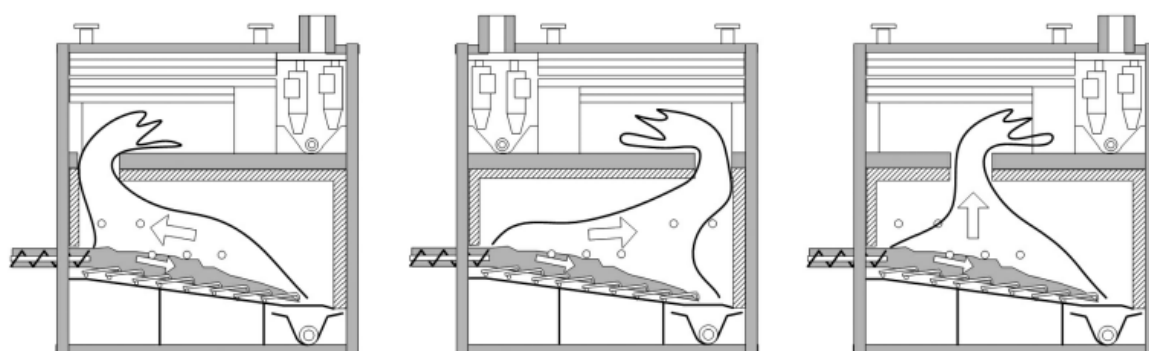


Figure 2.7 : Contre courant, Co-courant, Courant transversal [11] .

La combustion à contre-courant est la plus appropriée pour les carburants à faible valeur calorifique. En raison du fait que les gaz de fumée chauds passent par le carburant de biomasse frais et humide entrant dans le four, le séchage et le transport de vapeur d'eau du carburant augmente par convection (en plus du transfert de chaleur rayonnante à la surface du carburant).

La combustion à Co-courant est appliquée pour les combustibles secs ou dans les systèmes où l'air primaire est préchauffé . Ce système augmente le temps de séjour des gaz non brûlés libérés du carburant et peut améliorer la réduction des NO_x .

Les systèmes à courant transversal sont une combinaison d'unités à Co-courant et contre courant et sont également particulièrement utilisés dans les installations de combustion avec des chambres de combustion secondaires verticales.

3.1.1.1 Fours à grille de déplacement:

Les fours à grille de déplacement sont constitués de barres de grille formant une bande sans fin (comme un escalier en mouvement) se déplaçant à travers la chambre de combustion (figure 2.8). Le carburant est fourni à une extrémité de la chambre de combustion sur la grille.

Le lit de carburant lui-même ne bouge pas, mais il est transporté par la grille.

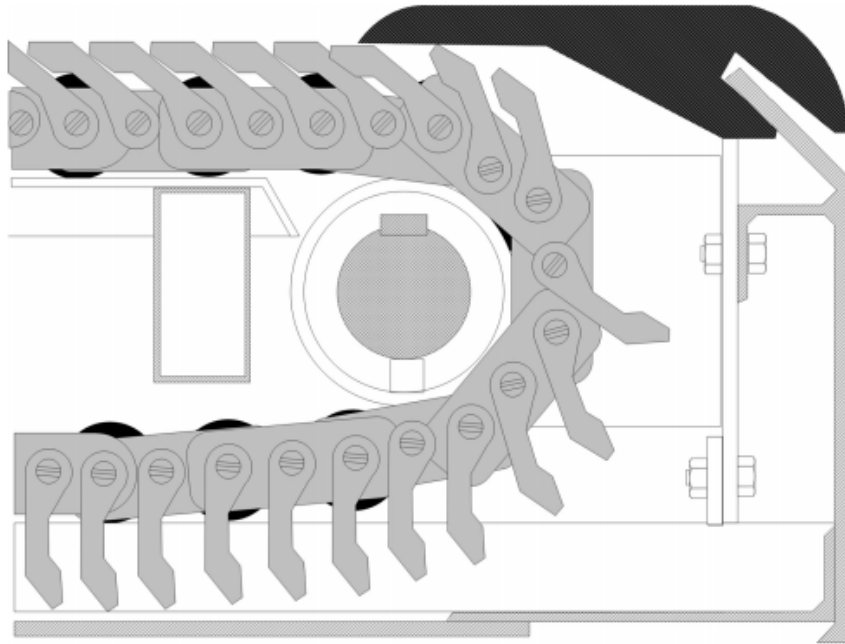


Figure 2.8: Principe technologique d'une grille de déplacement[11].

À la fin de la chambre de combustion, la grille est nettoyée des cendres et des saletés pendant que la bande tourne (enlèvement automatique des cendres). Sur le chemin du retour, les barres de grille sont refroidies par l'air primaire afin d'éviter une surchauffe et de minimiser l'usure. La vitesse de la grille de déplacement est réglable en continu afin d'obtenir une combustion complète de la biomasse.

Les avantages des systèmes de grille de déplacement sont des conditions de combustion uniformes, en raison du lit de braises stable et presque immobile. En outre, la maintenance ou le remplacement des barres de grille est facile à manipuler. Cependant, les combustibles de biomasse non homogènes impliquent le risque de répartition inégale sur la surface de la grille. Cet inconvénient peut être évité en utilisant des épandeurs qui répartissent de façon homogène la biomasse.

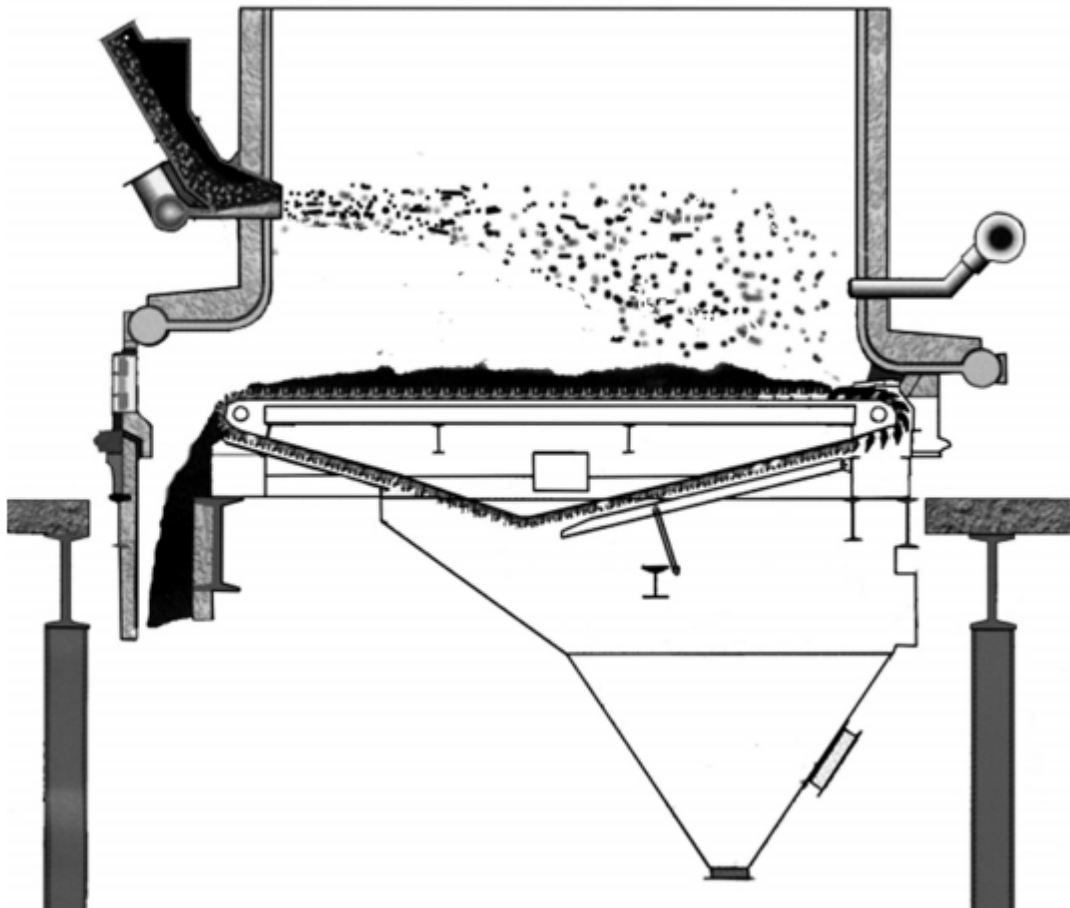


Figure 2.9: Four à grille de déplacement alimenté par des épandeurs [11].

3.1.1.2 Fours à grilles mobiles inclinées et horizontales:

Les fours à grille mobiles ont habituellement une grille inclinée composée de rangées de grilles fixes et mobiles (figure 2.10). En alternant les mouvements horizontaux vers l'avant et vers l'arrière des sections mobiles, le carburant est transporté le long de la grille. Ainsi, les particules de carburant non brûlées et brûlées sont mélangées, les surfaces du lit de combustible sont renouvelées et une répartition plus uniforme du carburant sur la surface de grille peut être obtenue (ce qui est important pour une distribution d'air primaire égale à travers le lit de carburant). Généralement, la grille entière est divisée en plusieurs sections de grille, qui peuvent être déplacées à différentes vitesses selon les différentes étapes de combustion (figure 2.11). Le mouvement des barres de grille est réalisé par des vérins hydrauliques. Les barres de grille elles-mêmes sont en alliages d'acier résistant à la chaleur. Elles sont équipées de petits canaux dans leurs parois latérales pour l'alimentation en air primaire et devraient être aussi étroites que possible afin de distribuer l'air primaire sur le lit de carburant aussi bien que possible .

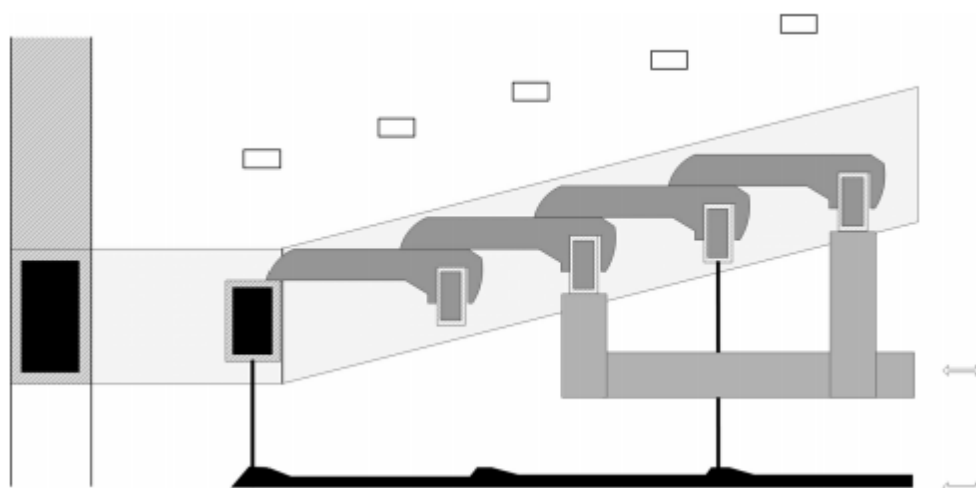


Figure 2.10: Grilles mobiles inclinées [11].

Dans les fours à grilles mobiles, une grande variété de carburants à biomasse peut être brûlée. Les fours à grilles mobiles à refroidissement par air utilisent l'air primaire pour refroidir la grille et conviennent pour l'écorce humide et les copeaux de bois. Pour les carburants à biomasse sèche ou les combustibles à biomasse à basse température de frittage des cendres, des systèmes de grilles mobiles à refroidissement par eau sont recommandés. Contrairement aux systèmes de grille de déplacement, le réglage correct de la fréquence de déplacement des barres de grille est plus complexe. Si les fréquences en mouvement sont trop élevées cela entraînera des concentrations élevées de carbone non brûlé dans la cendre . Les

Chapitre 2

faisceaux infrarouges situés sur les différentes sections de grille permettent un contrôle adéquat des fréquences en mouvement en vérifiant la hauteur du lit.

L'enlèvement des cendres se fait sous la grille sous forme sèche ou humide.

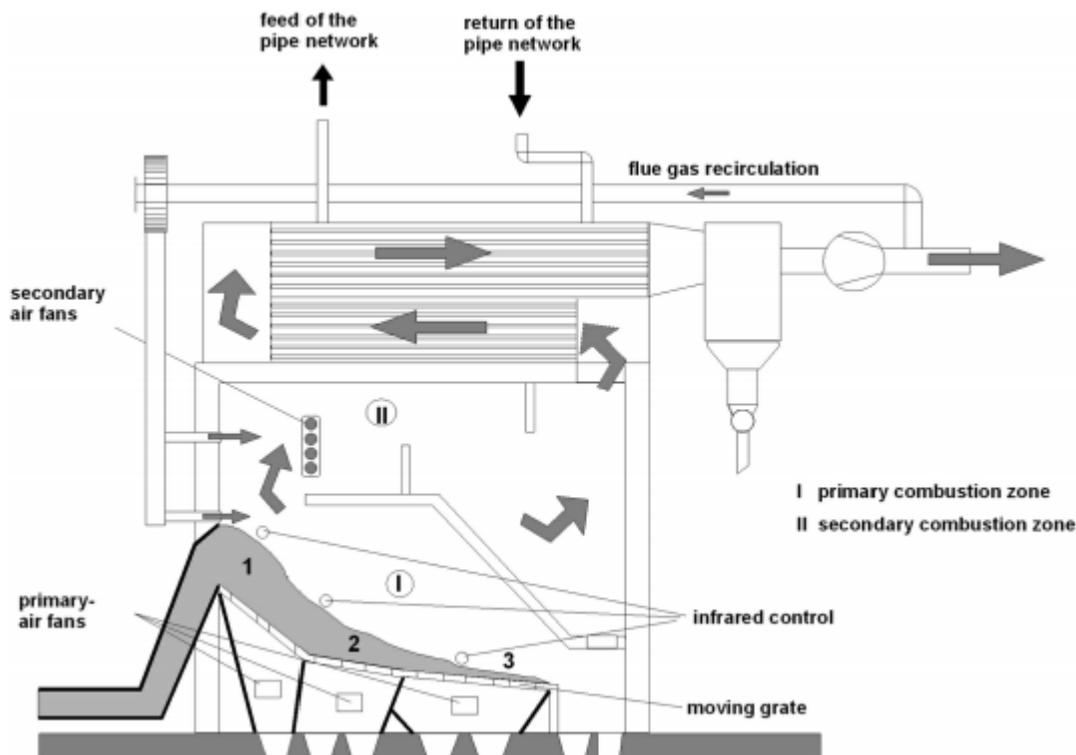


Figure 2.11: Four à grille moderne avec système de contrôle infrarouge, grille séparée par section et contrôle d'air primaire [11].

1: Séchage, 2: Dévolatilisation, 3: Combustion du charbon.

Les grilles mobiles horizontales ont un lit de carburant complètement horizontal. Ceci est obtenu par la position diagonale des barres de grille (figure 2.12). Les avantages de cette technologie sont le fait que les mouvements de carburant incontrôlés sur la grille par gravité sont entravés et que l'effet d'assèchement par les mouvements de grille augmente, conduisant ainsi à une répartition plus homogène de la biomasse sur la surface de la grille. Un avantage supplémentaire de la grille mobile horizontale est que la hauteur peut être réduite.

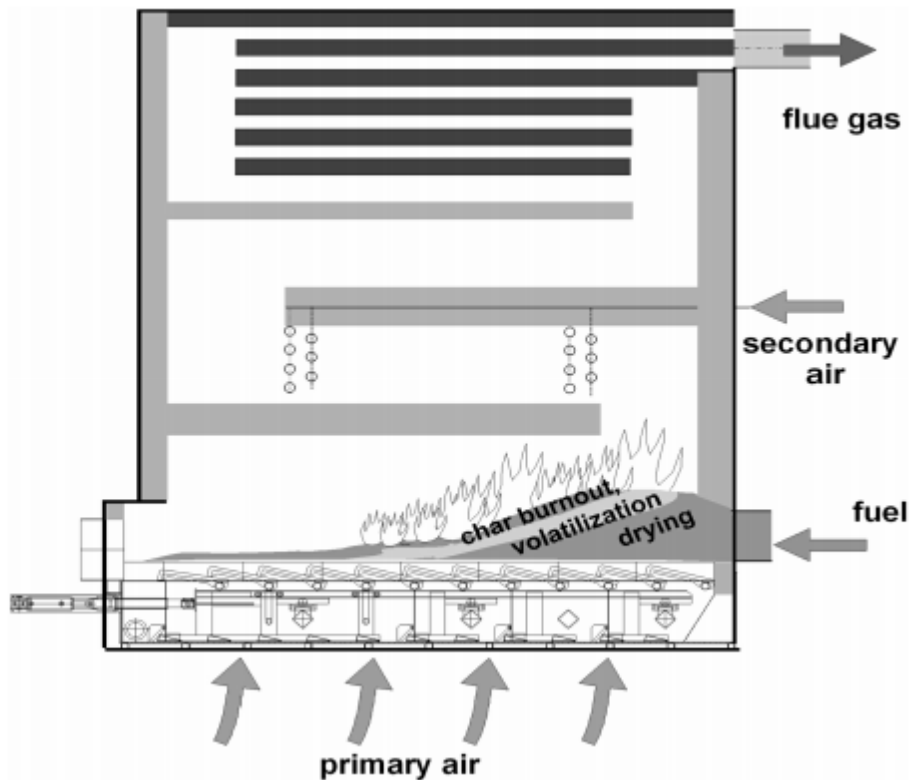


Figure 2.12: Diagramme d'un four à grille mobile horizontale [11].

3.1.1.3 Fours à grilles vibrantes:

Les fours à grilles vibrantes se composent d'un mur à tube à ailettes inclinées placées sur des ressorts (figure 2.13). Le carburant est alimenté dans la chambre de combustion par des épandeurs ou des convoyeurs à vis. Selon le processus de combustion, deux ou plusieurs vibreurs transportent du carburant et des cendres vers la zone de précipitations des cendres. L'air primaire est injecté à travers le lit de carburant par le bas à travers des trous situés dans les parois des tubes à ailettes. Les inconvénients des grilles vibrantes sont les émissions élevées de cendres causées par les vibrations, les émissions de CO plus élevées en raison des perturbations périodiques du lit de carburant et une formation incomplète des cendres de fond, car le transport de carburant et de cendres est plus difficile à contrôler.

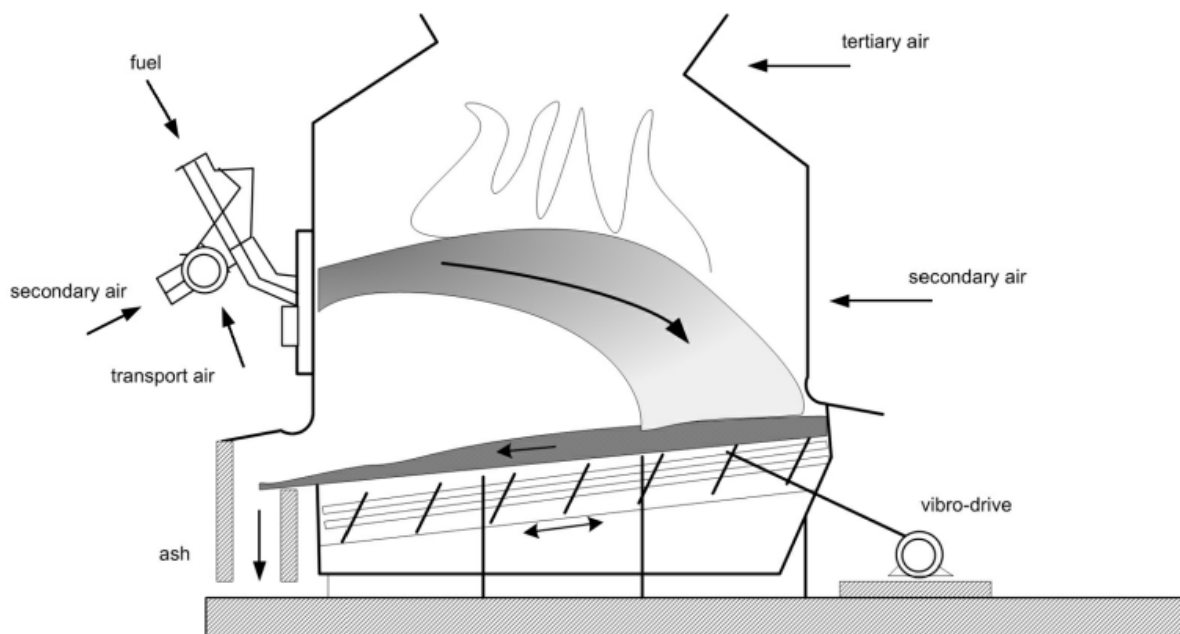


Figure 2.13: Grille vibrante alimentée par des épandeurs[11].

3.1.2 Brûleurs à cigares:

Au Danemark, des brûleurs à cigares ont été développés pour la combustion de paille et de céréales.

Les pailles et céréales (dans leur ensemble ou en tranches) sont livrées en continu par un piston hydraulique à travers un tunnel d'alimentation sur une grille mobile refroidie à l'eau. En entrant dans la chambre de combustion, le carburant commence à se gazéifier et la combustion du charbon continue alors que la biomasse non brûlée est déplacée sur la grille. Le contrôle de la température des grilles et du four est très important pour la combustion de la paille et des céréales, en raison de la température adiabatique élevée de combustion provoquée par leur faible teneur en humidité. Par conséquent, les chambres de combustion doivent être refroidies soit par des parois en contact avec l'eau, soit par la recirculation des gaz de combustion (les combinaisons de ces deux techniques sont également possibles). Les températures du four ne doivent pas dépasser 900 ° C pour un fonctionnement normal.

En outre, dans la combustion de la paille et des céréales, des particules de cendres volantes très fines et légères sont formées. Un système de nettoyage automatique de l'échangeur de chaleur est nécessaire pour empêcher la corrosion et la formation des gisements de cendres.

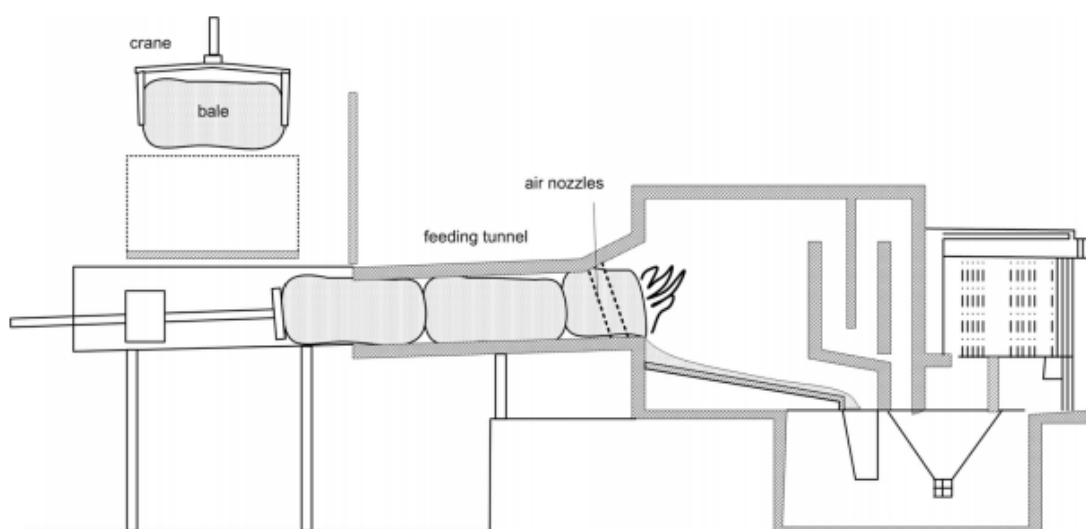


Figure 2.14: Brûleurs à cigares [11].

3.1.3 Grille rotative alimentée par le bas:

La combustion en grille tournante est une nouvelle technologie finlandaise de combustion de biomasse qui utilise des sections de grille coniques qui tournent dans des directions opposées et sont alimentées en air primaire par le bas (figure 2.15). En conséquence, les carburants humides et brûlants sont bien mélangés, ce qui rend ce système approprié pour brûler des carburants très humides tels que l'écorce, la sciure de bois et les copeaux de bois (avec une teneur en humidité allant jusqu'à 65% en poids). Les gaz combustibles formés sont brûlés avec de l'air secondaire dans une chambre de combustion horizontale ou verticale séparée.

Le carburant est alimenté par le bas par des convoyeurs à vis, ce qui oblige à maintenir la taille moyenne des particules inférieure à 50 mm. Le carburant se déplace vers la périphérie de la grille circulaire. Au bord de la grille, les cendres tombent dans un bassin de cendres rempli d'eau sous la grille.

Les installations de combustion à grille tournante sont également capables de brûler des mélanges de combustibles en bois massif et de boues biologiques. Le système est contrôlé par ordinateur et permet un fonctionnement entièrement automatique.



Figures 2.15: Grille rotative alimentée par le bas [11].

3.1.4 Four alimenté par le bas (Underfeed stokers) :

Les fours alimentés par le bas (figure 2.16) représentent une technologie peu coûteuse et opérationnellement sûre pour les systèmes de petite et moyenne taille jusqu'à une capacité nominale de chaudière de 6MW. Le carburant est introduit dans la chambre de combustion par des convoyeurs à vis et est transporté vers le haut sur une grille intérieure ou extérieure. Les grilles extérieures sont plus fréquentes dans les installations de combustion modernes car elles permettent un fonctionnement plus flexible et un système automatique de cendres peut être appliqué plus facilement. L'air primaire est fourni à travers la grille, l'air secondaire généralement à l'entrée de la chambre de combustion secondaire.

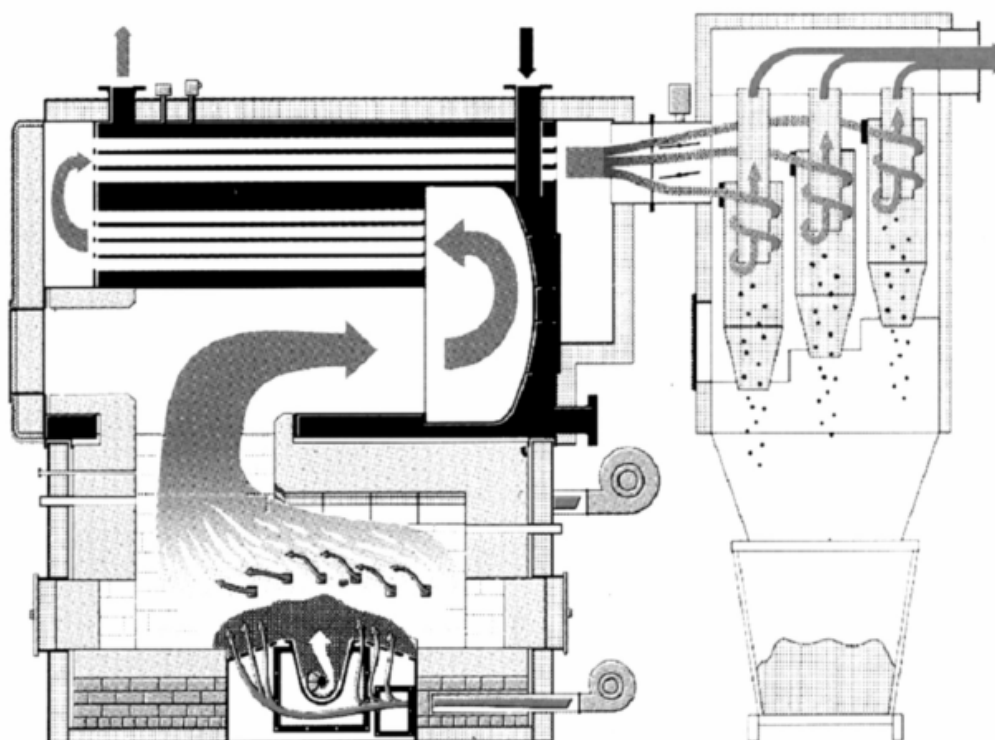


Figure 2.16: Four alimenté par le dessous(Underfeed Stoker)[11]

Un nouveau développement autrichien consiste en un brûleur avec une postcombustion en rotation, dans lequel un écoulement vortex fort est réalisé par un ventilateur d'air secondaire spécialement conçu (figure 2.17).

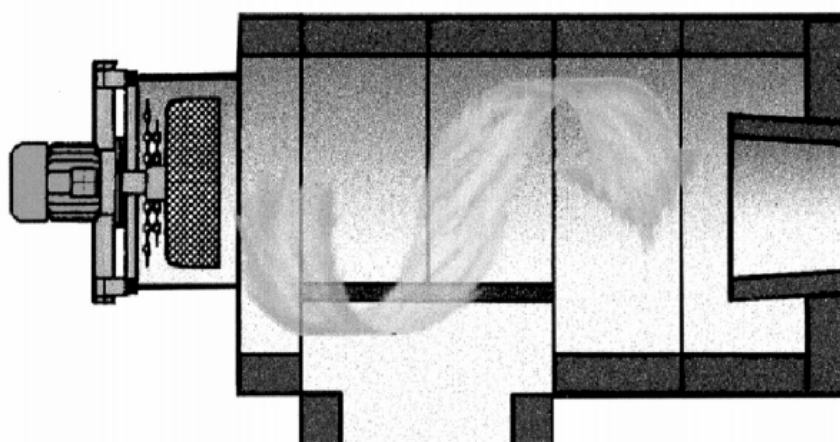


Figure 2.17:Chambre postcombustion avec un écoulement vortex imposé[11].

Ces fours sont adaptés aux combustibles à biomasse de faible teneur en cendres (copeaux de bois, sciure de bois, granulés, grignon d'olive) et petites tailles de particules (jusqu'à 50 mm). Les combustibles à base de biomasse riches en céréales telles que l'écorce, la paille et les céréales ont besoin de systèmes d'élimination des cendres plus efficaces. Les changements de charge peuvent être obtenus plus facilement et plus rapidement que dans les installations de combustion à grille, car l'alimentation en carburant peut être contrôlée plus facilement et la masse de carburant dans le four est relativement faible.

3.2 Combustion à lit fluidisé:

Les systèmes de combustion à lit fluidisé (CLF) ont été appliqués depuis 1960 pour la combustion de déchets municipaux et industriels. Depuis lors, plus de 300 installations commerciales ont été construites dans le monde entier. En ce qui concerne les applications technologiques, il faut distinguer les lits fluidisés à bulles (LFB) et les lits fluidisés circulants (LFC).

La technologies de combustion à lit fluidisé a été développée pour la réduction des émissions du dioxyde de soufre SO_2 et des oxydes d'azote NO_x qui sont des composés gazeux à effet nocif sur l'environnement.

Un lit fluidisé se compose d'un récipient cylindrique avec une plaque de fond perforée remplie d'un lit de suspension de matière chaude, inerte et granulaire. Les matériaux de lit commun sont le sable de silice et la dolomie. Le matériau du lit représente 90 à 98 pour cent du mélange de carburant et de matériaux de lit. L'air de combustion primaire entre dans le four par le dessous de la plaque de distribution d'air et fluidise le lit afin qu'il devienne une masse bouillante de particules et de bulles. Le transfert et le mélange intenses de chaleur fournissent de bonnes conditions pour une combustion complète avec une faible demande d'air excédentaire (entre 1,1 et 1,2 pour les LFC et entre 1,2 et 1,3 pour les LFB).

La température de combustion doit être faible (habituellement 650-900 ° C) afin d'éviter le frittage des cendres dans le lit.

En raison du bon mélange obtenu, les chaudières CLF peuvent traiter de manière flexible avec divers mélanges de carburant (par exemple, des mélanges de différents types de combustibles de biomasse peuvent être brûlés) mais sont limités en ce qui concerne la granulométrie et les impuretés contenues dans le carburant. Par conséquent, un système approprié de prétraitement du carburant pour la réduction de la taille des particules et la séparation des métaux est nécessaire pour un fonctionnement sans risque. Généralement, une taille de particule inférieure à 40 mm est recommandée pour les unités LFC et inférieure à 80 mm pour les unités LFB. Cependant, les fours LFB modernes à basse température de lit de

Chapitre 2

650 à 850 ° C peuvent brûler des combustibles à faible température de fusion des cendres sans aucun problème de frittage dans le lit.

Les systèmes de combustion à lit fluidisé nécessitent un temps de démarrage relativement long (environ 8 à 15 heures) pour lesquels des brûleurs à pétrole ou à gaz sont utilisés.

Un autre inconvénient des unités CLF est posé par les poussières élevées entraînées avec les gaz de combustion, ce qui rend nécessaires des précipitateurs de poussière efficaces et des systèmes de nettoyage de chaudières. Le matériau du lit est également perdu avec la cendre, ce qui oblige à ajouter périodiquement de nouveaux matériaux à la chaudière. À partir du mélange de cendres, les pièces grossières peuvent être séparées des fines particules et du sable dans un classificateur d'air, et le matériau fin peut être renvoyé dans le lit. Ainsi, la consommation de matériaux de lit de la chaudière peut être abaissée.

3.2.1 Lit fluidisé à bulles (LFB):

Pour les usines ayant une capacité nominale de chaudière de plus de 20MW, les fours LFB commencent à être intéressants. Dans les fours LFB (figure 2.18), le matériau du lit se trouve dans la partie inférieure du four. L'air primaire est fourni sur une plaque de distribution par le bas et fluidise le lit. Le matériau du lit est généralement du sable de silice d'environ 0,5-1,0 mm de diamètre; La vitesse de fluidisation de l'air varie entre 1,0 et 2,0 m / s. L'air secondaire est introduit à travers plusieurs entrées sous la forme de groupes de buses disposées horizontalement au début de la partie supérieure du four (appelé franc-bord) pour assurer une alimentation en air par étapes pour réduire les émissions de NO_x . Contrairement aux fours LFB au charbon, le carburant à biomasse ne doit pas être injecté horizontalement, mais par des canalisations inclinées en raison de la plus grande réactivité de la biomasse par rapport au charbon.

L'avantage des fours LFB est leur flexibilité concernant la taille des particules et la teneur en humidité des combustibles de la biomasse. En outre, il est également possible d'utiliser des mélanges de différents types de biomasse ou de les co-incendier avec d'autres carburants.

Dans les fours LFB modernes, une combustion sous-stœchiométrique (environ 0,35) est possible, ce qui permet de contrôler la température du lit dans la gamme de 650-850 ° C. Par conséquent, les carburants à faible température de fusion des cendres peuvent également être brûlés. Les problèmes de corrosion peuvent être minimisés en utilisant des surchauffeurs réfractaires dans la première et la deuxième passe. Dans les fours LFB modernes, une charge partielle dans la gamme de 60 à 100% de la charge nominale est possible.

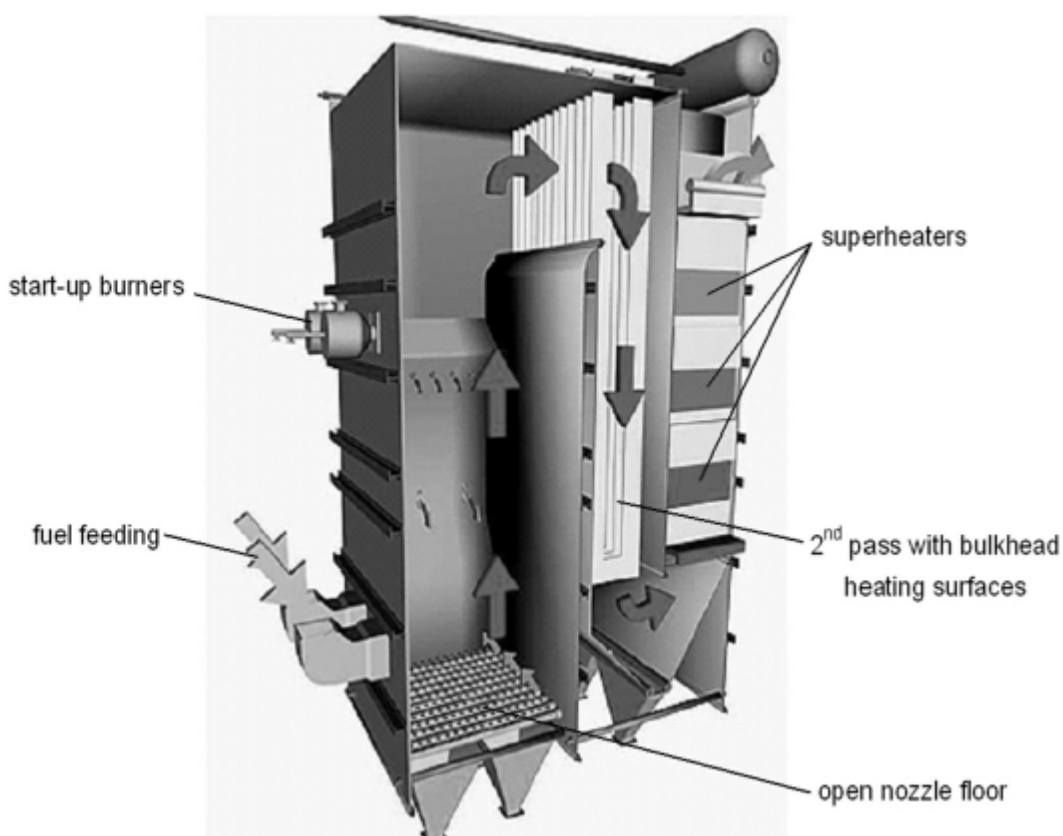


Figure 2.18: Four LFB[11].

3.2.2 Lit fluidisé circulant (LFC):

En augmentant la vitesse de fluidisation à 5-10 m/s et en utilisant des particules de sable plus petites (0.2-0.4mm de diamètre), un système LFC est atteint. Les particules de sable seront transportées avec les gaz de fumée, séparées dans un cyclone chaud ou un séparateur à faisceau en U et renvoyées dans la chambre de combustion (figure 2.19). La température du lit (750-900 ° C) est contrôlée par des échangeurs de chaleur externes refroidissant le sable recyclé ou par des parois refroidies à l'eau. La turbulence plus élevée dans les fours LFC conduit à un meilleur transfert de chaleur et à une répartition de la température très homogène dans le lit. Les inconvénients des fours LFC sont leur grande taille et donc un prix plus élevé, la charge de poussière encore grande dans les gaz de fumée quittant le séparateur de particules de sable et la petite taille de particules de carburant requise (0,1 à 40 mm de diamètre), ce qui entraîne souvent des investissements plus élevés dans le prétraitement du carburant.

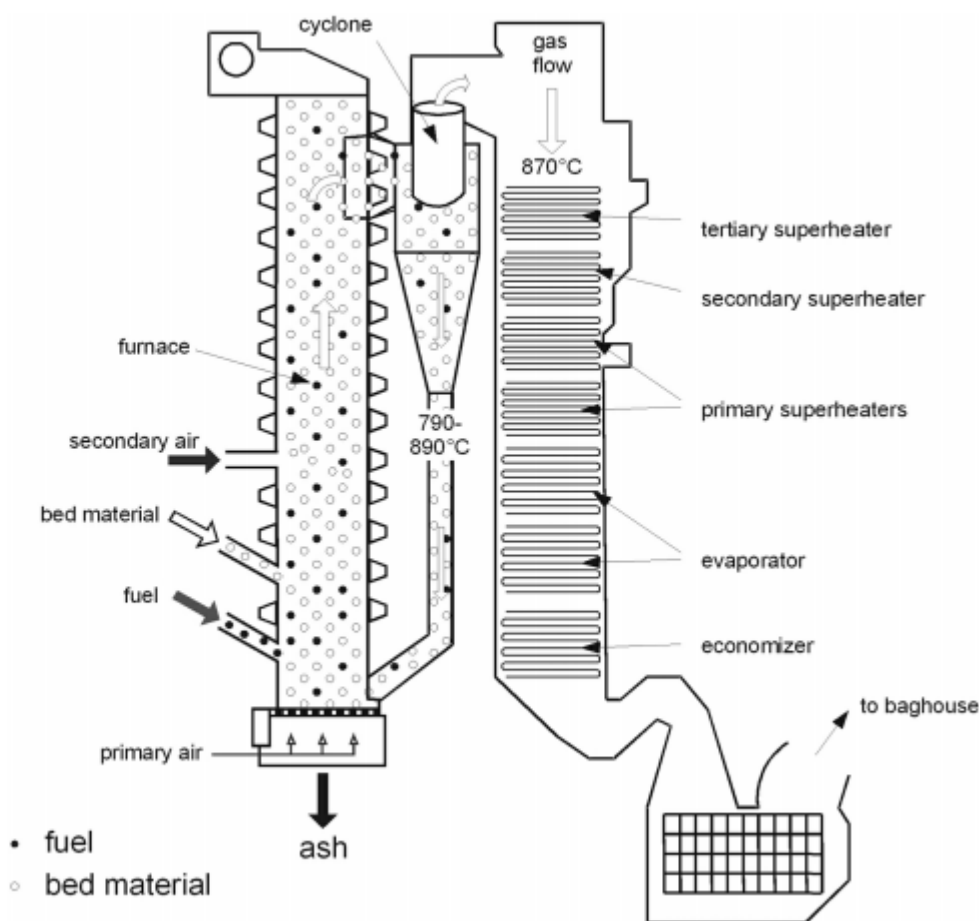


Figure 2.19: Four LFC [11].

3.3 Combustion de carburant pulvérisé:

Dans les systèmes de combustion à combustible pulvérisé, les carburants sont injectés pneumatiquement dans le four. L'air d'injection est utilisé comme air primaire. Le démarrage du four est réalisé par un brûleur auxiliaire.

Lorsque la température de combustion atteint une certaine valeur, l'injection de biomasse commence et le brûleur auxiliaire est arrêté. La qualité du carburant dans les systèmes de combustion à combustible pulvérisé doit être assez constante. Une taille maximale de particules de carburant de 10 à 20 mm doit être maintenue et la teneur en eau du combustible ne devrait normalement pas dépasser 20% en poids. En raison de la gazéification explosive des particules fines de biomasse, l'alimentation en carburant doit être contrôlée très attentivement et constitue une unité technologique clé dans le système global. Les mélanges carburant / air sont généralement injectés tangentiellement dans l'injecteur du four cylindrique pour établir un écoulement rotatif (habituellement un écoulement vortex).

Chapitre 2

Le mouvement de rotation peut être supporté par la recirculation des gaz de combustion dans la chambre de combustion. En raison de la forte densité d'énergie dans les parois du four et de la température de combustion élevée, l'ensemble doit être refroidi à l'eau. La gazéification de carburant et la combustion du charbon ont lieu en même temps en raison de la petite taille des particules. Par conséquent, des changements de charge rapides et un contrôle de charge efficace peuvent être réalisés.

Les fours de carburant pulvérisé sont de plus en plus utilisés. La figure 2.20 b montre un four en combinaison avec une chaudière à vapeur à tube d'eau. Cette technologie est disponible pour les capacités thermiques de 2-8MW [11]. La sortie du four forme un col, où de l'air secondaire est ajouté afin d'obtenir un bon mélange avec les gaz combustibles. En raison des vitesses élevées des gaz de combustion, la cendre est transportée avec les gaz de combustion et est partiellement précipitée dans la chambre de postcombustion. Les faibles quantités d'excès d'air ($\lambda = 1,3-1,5$) et les faibles émissions de NO_x peuvent être obtenues grâce à une mise en place adéquate d'addition d'air par étape. Outre les fours à combustion de carburant pulvérisé horizontaux, des brûleurs à cyclone sont également utilisés (Figure 2.20 a).

Un inconvénient des fours à combustion de carburant pulvérisé est que les briques isolantes s'usent rapidement en raison du stress thermique et de l'érosion.

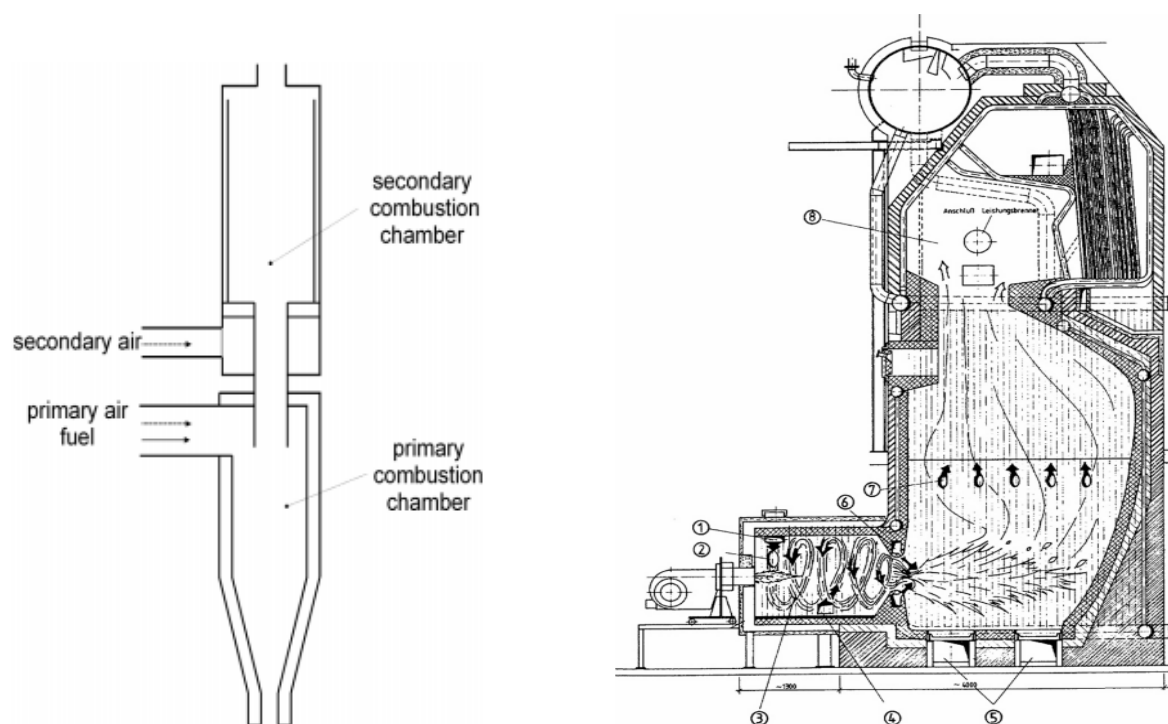


Figure 2.20 : a) Brûleur cyclone à deux étages, b) Four à combustible pulvérisé en combinaison avec une chaudière à tube d'eau [11].

3.4 Réduction des émissions:

Les fours à biomasse présentent des émissions relativement élevées de NO_x et de particules par rapport aux fours à gaz naturel ou au fuel léger. Par conséquent, ils contribuent de manière significative aux particules de matière (PM), à l'ozone (O_3) et au NO_2 dans l'air ambiant. Pour la combustion du bois, une évaluation du cycle de vie (LCA) indique que 38,6% de l'impact environnemental d'un four à bois automatique moderne est attribué aux NO_x , 36,5% à PM 10, seulement 2% à CO_2 et 22,9% à tous les autres polluants (SO_x , NH_3 , CH_4 et autres). LCA pour le bois, le mazout léger et le gaz naturel montre également que l'impact environnemental du bois est supérieur à celui du gaz naturel pour une évaluation standard de l'effet de serre (figure 2.21). Par conséquent, des améliorations dans la chaîne du bois sont nécessaires. Cependant, il est également évident que les conclusions de la LCA dépendent fortement de l'évaluation de l'effet de serre puisque le classement change de manière significative en raison des différents impacts de CO_2 des trois combustibles.

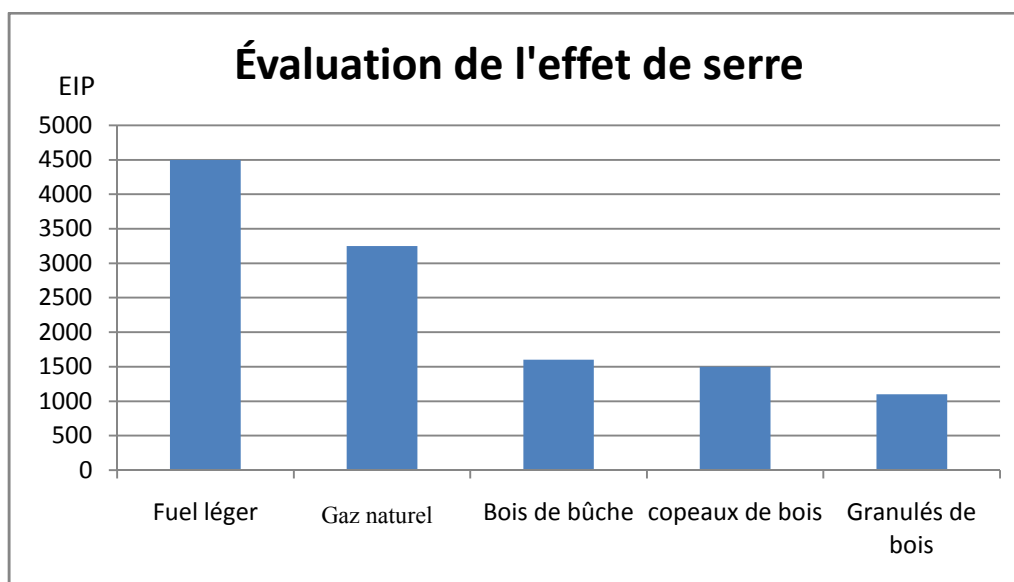


Figure 2.21: Points d'impact environnemental (EIP) pour différentes évaluations de l'effet de serre. Adapté de [12].

3.4.1 Combustion étagée :

Si la combustion par étages est appliquée, l'excès d'air peut varier dans différentes sections. La combustion à deux étages est appliquée avec une injection d'air primaire dans le lit de carburant et une injection d'air secondaire consécutive dans la chambre de combustion. Ceci permet un bon mélange de l'air de combustion avec les gaz combustibles formés par dévolatilisation et gazéification dans le lit de carburant. Si un bon mélange est atteint, une opération à faible excès d'air est possible (c'est-à-dire l'excès d'air $\lambda < 1,5$), ce qui permet une efficacité élevée d'une part et une grande température avec une combustion complète d'autre part (figure 2.22). Si un bon mélange est atteint, les concentrations de polluants non brûlés peuvent être réduites à des niveaux proches de zéro (par exemple, $\text{CO} < 50 \text{ mg / m}^3$ et $\text{C}_x\text{H}_y < 5 \text{ mg / m}^3$).

Cependant, un contrôle précis du processus est nécessaire pour assurer une alimentation optimale en excès d'air. A cet effet, des systèmes de commande auto-réglables avec utilisation de capteurs pour CO et λ (contrôleur CO / λ) ou de CO et de la température ont été développés. En plus des deux étapes conventionnelles de la combustion, l'air primaire doit être inférieur à l'unité (λ primaire < 1). En outre, un temps de séjour approprié (et donc une zone de dégagement dans le four conduisant ainsi à un volume de four différent) est nécessaire entre le lit de carburant et l'entrée d'air secondaire.

3.4.2 Polluants non brûlés:

Les principaux besoins d'une combustion complète sont la température, le temps et la turbulence (TTT). Le mélange entre les gaz combustibles et l'air peut être identifié comme le facteur qui limite principalement la qualité de la combustion, alors que les exigences de température et le temps de séjour peuvent être atteints.

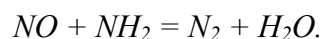
Une qualité de mélange suffisante peut être atteinte dans la combustion à lit fixe par la combustion à deux étages décrite ci-dessus. En lit fluidisé, un bon mélange est obtenu dans le lit. Pour les améliorations futures de la conception du four, les modèles mathématiques des CFD peuvent être appliqués comme outil standard pour calculer les distributions d'écoulement dans les fours.

En outre, la chimie de réaction en phase gazeuse peut être mise en œuvre dans les codes CFD. Cependant, les réactions hétérogènes lors du séchage, du transport, de la dévolatilisation et de la gazéification de la biomasse solide avant d'entrer dans la combustion en phase gazeuse doivent également être considérées et nécessitent une amélioration supplémentaire pour permettre l'application de la modélisation du four complet.

3.4.3 Émissions des NO_x:

Dans les procédés de combustion, NO et NO₂ (résumés comme NO_x) peuvent être formés dans trois réactions différentes. Le NO_x thermique et le NO_x Prompt sont formés à partir d'azote dans l'air à haute température et dans le cas d'un NO_x Prompt en présence d'hydrocarbures. En outre, le NO_x de carburant peut être formé à partir de carburants contenant de l'azote. Pour la combustion de la biomasse, l'azote lié au carburant est la principale source d'émissions de NO_x, alors que les NO_x thermiques et Prompt ne sont pas pertinents en raison de températures relativement basses, comme l'ont montré les études théoriques et expérimentales.

L'azote du combustible est converti en composants intermédiaires tels que HCN et NH_i avec $i = 0, 1, 2, 3$. Ils peuvent être oxydés en NO_x si l'oxygène est disponible, ce qui est le cas dans la combustion conventionnelle. Si aucun oxygène n'est présent, les intermédiaires peuvent interagir dans la zone de réduction et forment N₂ dans des réactions telles que:



Au cours des 10 dernières années, les technologies de combustion mises en scène ont été développées comme une mesure primaire pour la réduction des NO_x internes des procédés basés sur ce concept, conduisant ainsi aux techniques décrites ci-dessus de mise en scène et de mise en marche du carburant (figure 2.22).

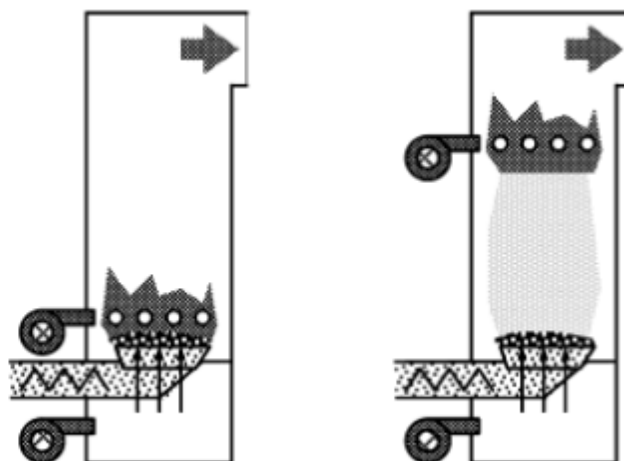
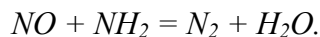


Figure 2.22: Combustion Conventionnelle, Combustion par étage [12].

Chapitre 2

Outre les mesures primaires, des mesures secondaires sont disponibles pour la réduction des NO_x. Les techniques les plus pertinentes sont la réduction sélective non catalytique (SNCR) et la réduction sélective catalytique (SCR) en utilisant la même réaction que celle mentionnée pour la combustion par étages, c'est-à-dire:



Cependant, l'urée ou l'ammoniac est injecté comme agent réducteur et comme source de NH₂. Le SNCR doit être appliqué dans une fenêtre de température étroite autour de 820 ° C à 940 ° C, ce qui permet une réduction de NO_x jusqu'à 90%.

SCR est généralement appliqué dans les gaz de combustion dans une plage de température d'environ 250 ° à 450 ° C et permet une réduction de NO_x supérieure à 95%.

Cependant, des concentrations pertinentes de produits secondaires indésirables tels que HNCO, N₂O, NH₃, HCN et autres peuvent être formées dans les deux types de mesures secondaires dans des conditions défavorables. Par conséquent, les mesures primaires sont préférables si elles peuvent obtenir une réduction des émissions suffisante.

3.4.4 Émissions de particules:

La combustion de la biomasse conduit à des émissions relativement élevées de particules, c'est-à-dire bien supérieures à 50 mg /m³. La majorité des particules sont inférieures à 10µm (PM 10) avec une forte proportion de particules submicroniques (inférieur à 1µm PM 1).

Les constituants principaux de carburant en ce qui concerne la formation d'aérosols sont typiquement K, Cl, S, Ca, Na, Si, P, Fe et Al. Les mesures primaires qui peuvent répondre en toute sécurité à un potentiel de réduction élevé, c'est-à-dire au moins un facteur de 10, de cette catégorie d'aérosols ne sont pas connues jusqu'ici.

Cependant, une nouvelle approche pour la réduction des particules primaires a été présentée récemment.

Il a été démontré que les particules provenant de la combustion du bois sont principalement formées par la nucléation, la coagulation et la condensation pendant la diminution de la température dans la chaudière. En outre, ces particules sont principalement des sels et consistent principalement en K. Le potassium dans le carburant est présent sous forme d'un sel à un point haut de fusion et de température de dévolatilisation. Si l'oxygène est disponible, la proportion élevée du potassium peut être oxydée. Comme les oxydes de potassium ont des températures de dévolatilisation significativement plus faibles que les sels de potassium, ils sont presque complètement vaporisés dans la phase gazeuse et conduisent ensuite à la formation de particules à partir de la phase gazeuse. Si aucun oxygène n'est présent dans le lit de carburant, la conversion de K en substances volatiles peut être réduite puisque la majorité des sels K peuvent être transformés en cendres de grille. Étant donné qu'un comportement similaire pour d'autres composants de cendres dans le carburant est supposé, la teneur en

Chapitre 2

oxygène pendant la conversion du combustible solide est considérée comme un paramètre clé pour la formation d'aérosols.

Selon cette hypothèse, une configuration expérimentale a été réalisée en fonction d'un four alimenté par le dessous qui permet une combustion du bois avec un air primaire extrêmement faible dans le lit de carburant. Dans de telles conditions de fonctionnement, la hauteur du lustre augmente considérablement et, par conséquent, la conception du four doit être adaptée. En outre, la combustion devient instable au-dessous d'un certain excès d'air primaire et, par conséquent, un contrôle de processus précis est nécessaire. Comme le montre les résultats du four du laboratoire, une réduction des émissions de particules de l'ordre d'un facteur 5 est réalisable, c'est-à-dire de 160-195 mg /m³ à 20-45 mg /m³ (13% de volume O₂) (figure 2.23). Avec la plupart des combustibles étudiés, des émissions de particules inférieures à 50 mg /m³ (qui est la limite définie par la réglementation pour les émissions de particules) ont été obtenues.

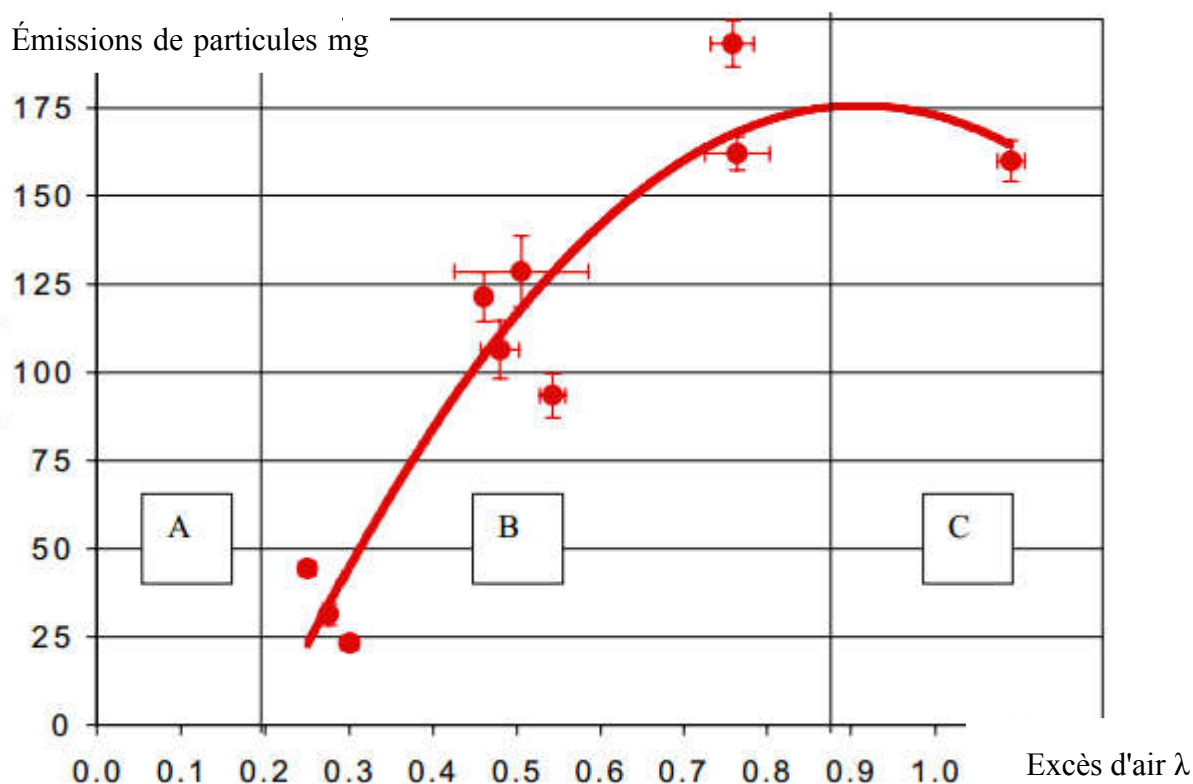


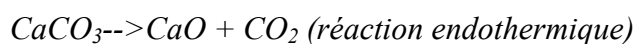
Figure 2.23: Les émissions de particules en fonction de l'excès d'air, adapté de [12].

Néanmoins, comme la composition du carburant est le paramètre principal pour la formation d'aérosols, des mesures secondaires sont également nécessaires pour une réduction plus poussée. Parmi celles-ci, les filtres en tissu sont considérés comme les plus prometteurs.

Cependant, d'autres développements et adaptations sont nécessaires pour les technologies d'élimination des particules appropriées aux besoins et à la taille de la combustion typique de la biomasse à un coût raisonnable.

3.4.5 Émissions de SO₂:

La capture de soufre est réalisée en ajoutant du calcaire. Le calcaire est normalement dans la forme de carbonate de calcium (CaCO₃) avec des impuretés de carbonate de magnésium (MgCO₃). Lorsque le calcaire est ajouté dans le lit du carburant circulant à haute température (843 à 899 ° C), le CaCO₃ subit des réactions endothermiques pour devenir CaO et CO₂. Le soufre du carburant s'oxyde pour devenir SO₂. En présence d'oxygène, le CaO réagit de manière exothermique avec SO₂ pour former CaSO₄ (sulfate de calcium), capturant ainsi le soufre. Le sulfate de calcium se présente sous la forme d'un matériau solide qui peut être évacué du lit. Les réactions sont:



La capture du soufre est influencée par divers facteurs tels que les propriétés du carburant, la teneur en soufre, le rapport molaire calcium / sulfure, la réactivité calcaire, la température du four, le temps de séjour des gaz et des solides et la taille des particules de calcaire.

3.5 Systèmes de contrôle de processus pour installations de combustion à biomasse:

Les principaux objectifs de contrôle pour une installation de combustion de biomasse sont les suivants:

- Contrôle des perturbations causées par les variations du carburant.
- Forcer le processus vers son point d'opération optimale et le maintenir là.

Les délais de ces objectifs sont différents. Le contrôle de perturbation nécessite un système de contrôle à réaction rapide pour faire face efficacement aux fluctuations rapides de la composition du carburant. Cette stratégie de contrôle fonctionne dans un domaine de fréquence relativement élevée et essaie de minimiser la réaction du processus aux perturbations et maintient les points de fonctionnement proches de leurs points de consigne.

Cet objectif réduit également la déviation des variables de processus les plus pertinentes à partir de leurs points de consigne. Lorsque ces points de consigne correspondent aux points de fonctionnement conçus d'une installation, une telle installation est souvent supposée avoir des émissions optimales (minimales).

Chapitre 2

Le deuxième objectif mentionné implique un délai plus lent. Les stratégies traditionnelles de contrôle des processus fonctionnent avec des consignes fixes, mais des stratégies de contrôle de processus plus avancées comme le modèle de contrôle prédictif peuvent utiliser une optimisation en ligne qui minimise une certaine fonction de coût. Une telle fonction de coût peut contenir un mélange pondéré de plusieurs objectifs de contrôle, tels que:

- Limites supérieures ou inférieures sur certaines variables en raison de restrictions environnementales ou de sécurité (par exemple, la pression maximale de vapeur dans le tambour à vapeur ou la concentration / température minimale d'oxygène dans les gaz de combustion pour éviter l'émission de CO ou de dioxines).
- Maximiser la production de chaleur.
- Minimiser le débit des gaz de combustion (pourrait être exigé par la législation).

3.5.1 Dynamique des processus:

Une meilleure compréhension de la dynamique des processus peut conduire à une meilleure compréhension des comportements des processus. Cette connaissance peut aider à améliorer les stratégies de contrôle ou les configurations de processus.

Dans cette section, la dynamique typique des processus d'installation de grille mobile est expliquée. La dynamique varie d'un cas à l'autre, en fonction de la taille, de la configuration et des propriétés du carburant de l'installation, mais les principes s'appliquent en général pour tous les cas.

La figure 2.24 montre les réponses dynamiques d'une grande installation d'incinérateur aux changements de la dose de carburant, de la vitesse de grille, de l'air primaire et de l'air secondaire. Dans ces expériences, les autres paramètres de contrôle ont été maintenus constants, les expériences peuvent donc représenter la réponse en boucle ouverte.

Chapitre 2

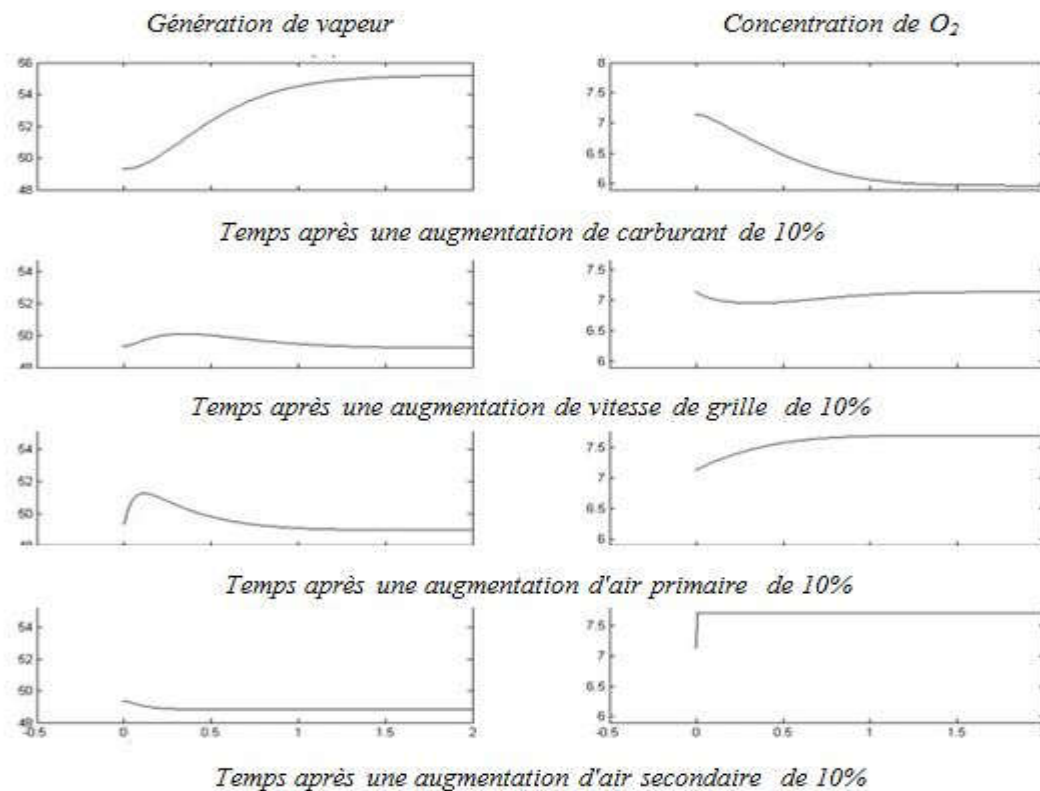


Figure 2.24: Réponses dynamiques d'une grande installation d'incinérateur au dosage du carburant, à la vitesse de grille, à l'air primaire et aux changements d'air secondaires adaptés de [11].

La première rangée de la figure 2.24 représente les réponses dynamiques caractéristiques à un dosage de carburant 10 pour cent augmenté par étapes. La production de vapeur augmentera graduellement suite à une réponse principalement de premier ordre. Comme il faut un certain temps pour que le flux de carburant nouvellement ajouté s'amorce, seulement après environ 45 minutes correspond à 66% du gain en régime permanent atteint. Les installations plus petites peuvent réagir plus rapidement, mais la forme générale de la réponse présentera de grandes similitudes. La concentration en oxygène montre un comportement opposé. Étant donné que plus de carburant sera brûlé avec la même quantité d'air, la concentration d'oxygène résultante dans les gaz de fumée diminuera.

La deuxième rangée de la figure 2.24 représente les réponses de la production de vapeur et de la concentration d'oxygène à une vitesse de grille accrue progressivement de 10 pour cent. Contrairement aux réponses à l'augmentation du flux de carburant, les deux paramètres ne montrent aucun gain statique car une vitesse de grille accrue n'entraînera pas plus de combustion du combustible (le flux de carburant vers la grille demeurera constant). Dans la réponse de la production de vapeur à la vitesse de grillage, l'effet de brassage est illustré. Une

Chapitre 2

fois que la grille commence à se déplacer plus rapidement, la quantité de combustible augmente dans une courte période d'où le regain de production de vapeur. Après un certain temps, comme c'est le flux d'alimentation qui détermine la production de vapeur, elle se stabilise avec un gain statique nul. Encore une fois, l'oxygène montre une tendance inverse.

Par rapport à l'influence du dosage du carburant, la dynamique de la vitesse de grille est significativement plus rapide et pourrait donc être plus efficace pour réagir aux perturbations rapides.

La troisième rangée montre l'effet sur la production de vapeur et la concentration en oxygène d'une augmentation par étapes de l'air primaire. Étant donné que la quantité de combustion de carburant reste constante, il n'y a pas d'effet net sur la production de chaleur. Lorsque des quantités successives d'air sont utilisées, il existe une possibilité de souffler à froid (diminue drastiquement la température), ce qui diminue la production de vapeur et doit supporter le carburant non brûlé à la fin de la grille. L'air primaire a un gain statique positif sur l'oxygène, car plus d'oxygène est fourni pour que la même quantité de carburant soit brûlée.

La quatrième et dernière rangée montre l'effet de l'augmentation de l'entrée d'air secondaire. L'air secondaire dilue les gaz de combustion, entraînant une augmentation immédiate de la concentration d'oxygène et du refroidissement des gaz de combustion. Au fur et à mesure que le système de vapeur refroidira par la suite, la production de vapeur pourrait également diminuer légèrement lorsque l'air secondaire augmente.

3.5.2 Etat de l'art des contrôles de processus:

Un système de contrôle de processus d'une usine moderne de combustion de biomasse se compose habituellement des boucles de contrôle suivantes:

- Contrôle de charge.
- Contrôle de combustion.
- Contrôle de température et de pression du four.

Le contrôle de la charge dans les fours à biomasse est généralement guidé par la température de l'eau d'alimentation (ou vapeur ou l'huile thermique) et détermine le carburant et l'alimentation en air primaire.

Pour chaque teneur en eau du carburant existe un rapport spécifique d'excès d'air (λ), où les émissions de CO sont minimales. Au-dessous et au-dessus de ce rapport spécifique d'excès d'air, les émissions de CO augmentent.

Un taux d'humidité plus élevé du carburant augmente généralement le rapport d'excès d'air optimal et vice versa.

Chapitre 2

La teneur en humidité du carburant ainsi que la production thermique nécessaire peuvent varier d'une large gamme dans les fours à biomasse. Par conséquent, un point de consigne fixe pour le rapport d'excès d'air (tel qu'appliqué dans des applications très simples) peut entraîner des augmentations spectaculaires des émissions de CO, si la teneur en humidité du carburant et / ou des conditions de charge du four change.

En conséquence, le contrôle de la combustion uniquement sur la base du CO ou d'un contrôle excessif de l'air ne conduirait pas à un résultat souhaité.

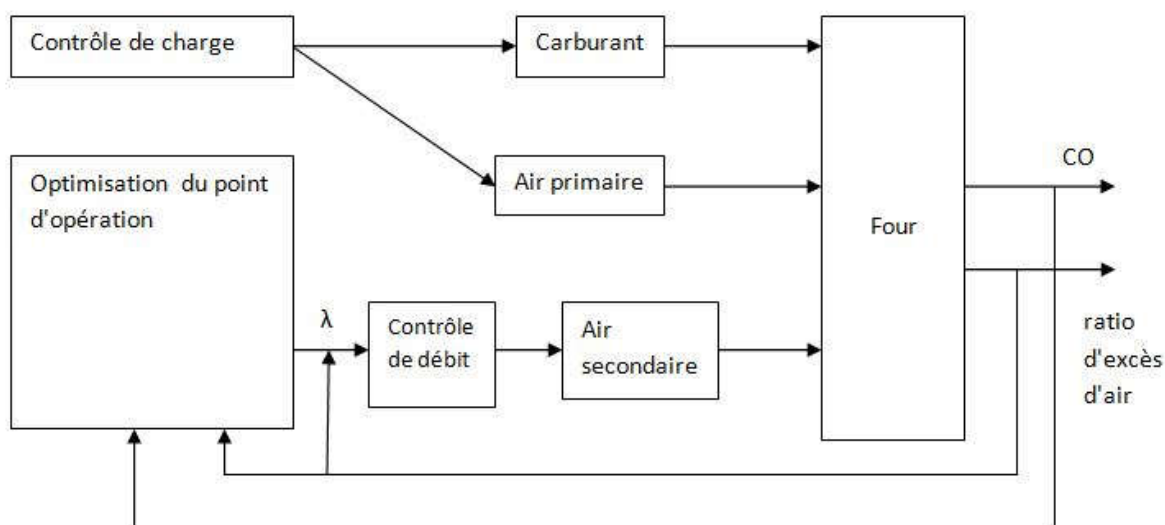


Figure 2.25: Schéma de principe du contrôle (CO / λ) et contrôle de charge adapté de [11].

Par conséquent, un contrôle combiné CO/ λ offre les meilleurs résultats en matière de contrôle de la combustion et de réduction des émissions de CO. Un schéma fonctionnel d'une combustion combinée (CO / λ) et d'un contrôle de charge est illustré à la figure 2.25. Par cette approche, le taux d'excès d'air peut varier jusqu'à ce que le minimum des émissions de CO soit détecté. Si les émissions de CO changent (en raison d'une modification du taux d'humidité du carburant ou des conditions de charge), cette procédure est répétée.

Par conséquent, le four peut être ajusté à toute teneur en humidité et condition de charge du carburant, ce qui garantit une combustion quasi complète et des émissions de CO très faibles, ainsi qu'une efficacité optimisée de l'installation.

3.5.2.1 Contrôle de processus avancé:

Jusqu'à présent, la manière la plus courante d'améliorer le contrôle du processus de combustion a été en réalisant des améliorations en fonction des expériences pratiques (essai et erreur).

Comme les procédés de combustion sont des processus multi variables (entrée multiple, sortie multiple), qui sont souvent soumis à de grandes perturbations dans la composition du carburant, il est difficile de comprendre les différentes relations entrées-sorties. En raison de cette complexité, il est donc difficile de concevoir ou d'améliorer les systèmes de contrôle par des expériences pratiques. Cette méthode d'essai et d'erreur conduira par conséquent à des solutions sous-optimales.

Les technologies de contrôle de processus basées sur des systèmes tels que les modèles de contrôle prédictifs et les capteurs de détection avancés sont des technologies qui peuvent contribuer à ces besoins croissants. Ces technologies de contrôle utilisent largement les connaissances disponibles sur le comportement dynamique des processus. La connaissance du comportement du processus est représentée sous la forme d'un modèle mathématique de la dynamique des processus.

3.5.2.2 Modèle de contrôle prédictif:

Un système de contrôle prédictif est l'outil idéal pour contrôler les processus multi variables.

Les processus multi variables sont des processus dont les entrées influencent plus qu'une simple sortie de processus simultanément. Une caractéristique des MPC est que la stratégie de contrôle peut être ajustée pour chaque calcul d'une action de contrôle suivante.

Par conséquent, les MPC sont très flexibles pour changer les conditions, telles que, par exemple, l'évolution des exigences, la coupure et / ou la défaillance des capteurs et des actionneurs. En outre, ces systèmes peuvent traiter les exigences de contraintes, c'est-à-dire qu'ils peuvent garder à la fois des variables manipulées ainsi que des variables contrôlées dans certaines plages prédéfinies.

MPC a été développé dans l'industrie, en émergeant de la nécessité d'opérer des processus plus étroitement dans les contraintes opérationnelles et physiques du processus et de l'équipement appliqué, ainsi que des contraintes d'exploitation qui maximisent les marges. Depuis son développement initial, MPC est devenue une technologie largement prouvée, en particulier dans l'industrie du raffinage du pétrole. L'utilisation dominante de MPC dans les applications de raffinage du pétrole implique fortement de pousser le processus contrôlé à des conditions de fonctionnement qui maximisent les marges et minimisent la variabilité du processus. Pour la plupart des applications de raffinerie, cela permet de maximiser le débit d'un certain mélange de produits. Dans la fabrication du verre par exemple, les bénéfices découlent principalement du contrôle strict de la qualité du produit, de l'augmentation de la

Chapitre 2

charge moyenne du four, de l'augmentation de l'efficacité, d'un contrôle strict des émissions et de la réduction de la consommation d'énergie.

La figure 2.26 montre un schéma fonctionnel d'un système de contrôle MPC. Initialement, MPC n'a pas tenu compte explicitement des contraintes. Les raffinements de la technologie développée dans Combustion Technologies pour les systèmes de chauffage industriels et urbains à la fin des années 1980 pour permettre des contraintes sur les variables d'entrée et de sortie à prendre en compte dans la formulation de la stratégie de contrôle.

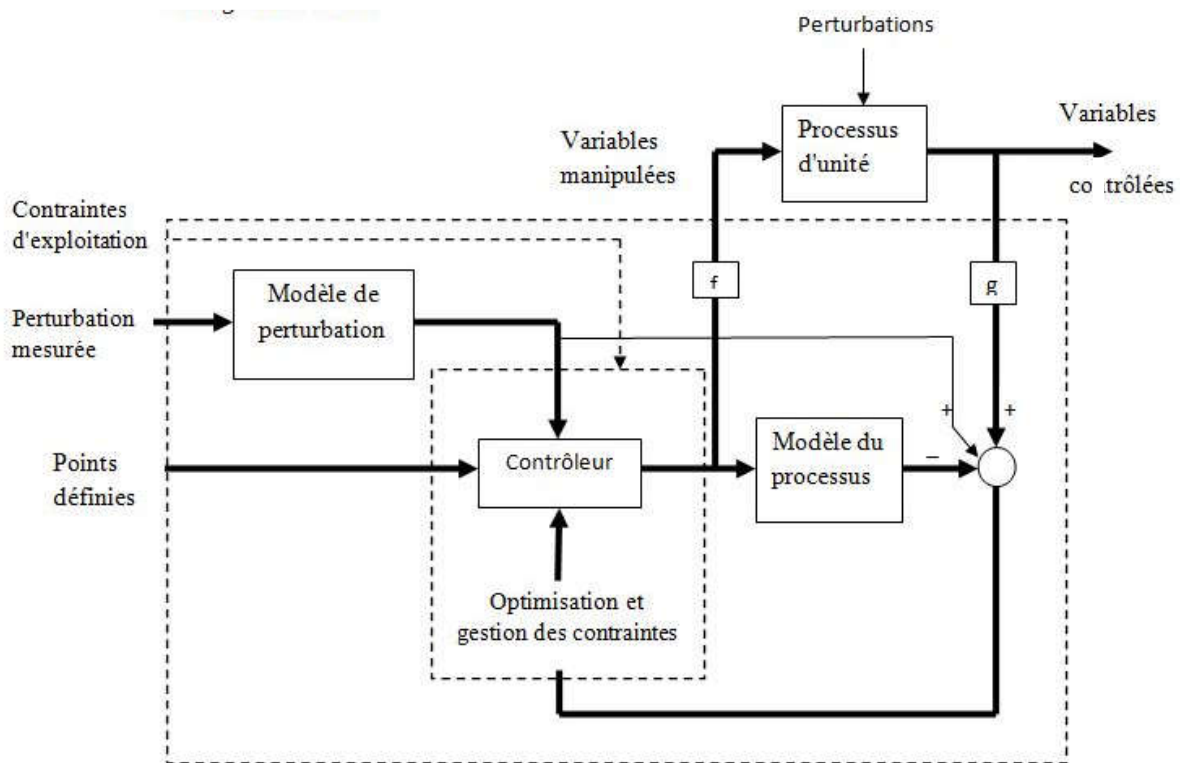


Figure 2.26: Schéma de principe du modèle de contrôle prédictif adapté de [11] .

De la figure 2.26, on constate qu'il existe trois blocs principaux dans les systèmes MPC. Le contrôleur est le bloc général, tandis que les deux autres, le modèle de processus et le modèle de perturbation dépendent de l'application spécifique. Dans ces blocs, la connaissance du processus joue un rôle important. Ce modèle est explicitement utilisé dans le contrôleur pour prédire les réactions futures du processus aux manipulations d'entrée passées et les perturbations mesurées et pour calculer les meilleures manipulations d'entrée futures qui satisfont les objectifs de contrôle.

3.5.2.3 Capteur de détection avancé:

Les techniques de capteurs avancés sont des techniques basées sur des logiciels qui sont utilisées pour estimer une quantité de processus (non) mesurable basée sur des mesures de processus existantes. Le terme «capteur avancé» est utilisé car les modèles informatiques sont utilisés pour estimer la sortie du capteur. Ces techniques pourraient fournir de précieuses informations supplémentaires sur une quantité de processus qui ne serait normalement pas disponible en raison de:

- Une mesure ne peut être disponible qu'après une longue analyse de laboratoire, ces informations peuvent être disponibles trop tard.
- Une mesure directe peut être trop coûteuse.
- Une méthode pour une mesure directe peut techniquement ne pas exister.

Un exemple de capteur avancé qui peut être utilisé pour les installations de combustion à biomasse est le capteur avancé de valeur calorifique qui a été développé et démontré par TNO (Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée). Ce capteur estime les propriétés de la biomasse qui est brûlée en temps réel, en fonction des mesures de la composition des gaz de combustion et de certaines mesures de processus supplémentaires. Un contrôleur automatique (ou un opérateur qui contrôle le processus manuellement) peut alors utiliser les sorties de capteur suivantes, afin de manipuler le processus:

- Valeur calorifique de la biomasse.
- Densité de la biomasse.
- Teneur en humidité de la biomasse.

Chapitre 3
Modélisation mathématique

1 Introduction:

Les CFD sont une branche de la physique qui traite de l'étude de la mécanique du fluide: liquide, plasmas et gaz et forces agissant sur eux. Ils sont basés sur les équations de Navier-Stocks qui décrivent comment la pression, la vitesse, la densité et la température d'un fluide en mouvement sont liées. Ils utilisent des méthodes numériques, des modélisations mathématiques et des logiciels pour résoudre et analyser les problèmes qui impliquent des écoulements de fluide et utilisent les dernières technologies de programmation pour modéliser et simuler les interactions liquide et gaz avec les surfaces, telles qu'elles sont définies par les conditions aux limites. Cela donne un aperçu des modèles d'écoulement qui seraient difficiles, coûteux ou impossibles à étudier en utilisant des techniques traditionnelles.

2 Théorie de transport:

2.1 Diffusion :

Les processus diffusifs sont causés par le mouvement thermique des molécules (mouvement brownien) et ne peuvent être décrits que de manière statistique. Nous considérons d'abord le cas unidimensionnel et divisons l'axe des x en cellules de largeur Δx et de section transversale A où résident des molécules (figure 3.1). En raison d'une température thermodynamique positive $T > 0^\circ\text{K}$, les molécules sont en mouvement (mouvement brownien). La densité de particules (particules par volume) à la coordonnée x est indiquée par $N(x)$.

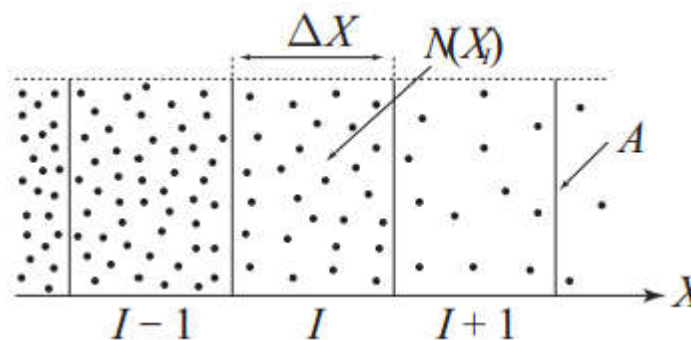


Figure 3.1: Modèle de diffusion unidimensionnelle [13].

Nous décrivons le mouvement aléatoire par une probabilité p qu'une particule saute d'une cellule à la cellule voisine. Nous supposons en outre que la diffusion est isotrope (Ce n'est pas toujours le cas dans la nature). Par conséquent, la probabilité p est uniforme et indépendante de la direction du mouvement des particules.

Nous déterminons la densité de flux de particules (particules par unité de surface et unité de temps) à la limite de la Cellule $i / i + 1$ pour un intervalle de temps Δt . A partir de la cellule i , un nombre de $p N(x_i) A \Delta x$ de particules sautent vers la droite, tandis que dans la cellule $i + 1$ un nombre $p N(x_i + \Delta x) A \Delta x$ sautent à gauche. Par conséquent, la densité nette de flux de particules diffusives (nombre de particules par Zone A et temps Δt) à la limite cellulaire $i / i + 1$ est donnée par la différence entre le nombre de particules venant de

Chapitre 3

la cellule i vers $i+1$ et de la cellule $i+1$ vers i divisé par unité de surface et de temps ($A \Delta t$), on a donc:

$$J = \frac{pN(x_i)A\Delta x - pN(x_i+\Delta x)A\Delta x}{A\Delta t} \quad (\text{particules/m}^2\text{s})$$

$$J = \frac{p\Delta x^2}{\Delta t} \frac{N(x_i+\Delta x) - N(x_i)}{\Delta x}$$

Pour des largeurs et périodes infinitésimales $\Delta x \rightarrow 0$, $\Delta t \rightarrow 0$, à condition que

$\frac{p\Delta x^2}{\Delta t}$ soit constante, on a la première loi de Fick:

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x}$$

En généralisant la loi sur un espace 3 dimensions isotopique on a:

$$J = -D \bar{\nabla} C$$

D : est la constante de diffusion isotropique m^2s^{-1} . Elle dépend des propriétés physiques des particules diffusives et des particules du milieu de propagation.

La densité de flux diffusif peut être généralisée pour le transfert de masse ou bien pour le transfert de chaleur (énergie) cela donne:

$$\text{masse} : j = -D \bar{\nabla} \rho$$

$$\text{chaleur} : j = -D \rho c \bar{\nabla} T = -\lambda \bar{\nabla} T$$

2.2 Advection:

L'advection est le transport d'une quantité (scalaire ou vectorielle) d'un élément donné (tel que la chaleur, l'énergie interne, un élément chimique, des charges électriques) par le mouvement (et donc la vitesse) du milieu environnant.

Nous considérons tout d'abord le cas unidimensionnel illustré dans figure 3.2. On suppose un flux $u(x, t)$ qui transporte la quantité à considérer.

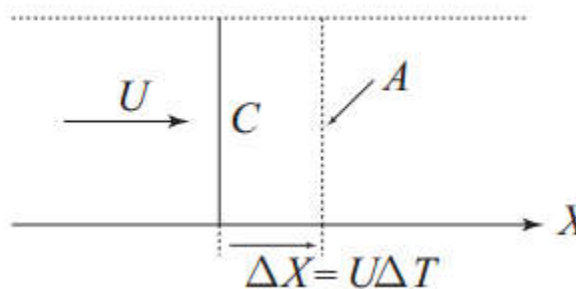


Figure 3.2: Ecoulement le long de l'axe des x [13].

Le fluide (gaz, air, eau) se déplace à travers un volume de contrôle fixe de section transversale A . Le transport des quantités physiques (particules, masse, énergie) est donnée en tant que concentration $C(x, t)$, donc la quantité est rapportée à un volume. Dans un court intervalle de temps Δt un volume $A\Delta x$ traverse une section transversale A et transmet la quantité $A \Delta x C$. La densité de flux advectif est donnée par:

$$F = \frac{A\Delta x C}{A \Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} C$$

$$\text{ou: } \frac{\Delta x}{\Delta t} = u$$

$$F = uC$$

En le généralisant a un espace 3 dimensions:

$$F = \bar{u}C$$

2.3 Equation de transport:

Dans la discussion suivante, nous allons décrire la connexion entre les flux des quantités physiques et les durées de variation de ces quantités. Elle est établie par la formulation des bilans pour les quantités physiques qui satisfait la loi de conservation.

Nous établirons une équation de conservation pour une grandeur physique (par exemple le nombre de particules, énergie, masse, quantité de mouvement) avec une densité C (c'est-à-dire la densité des particules, la densité d'énergie, masse volumique) on considère un volume de contrôle $\Delta V = A\Delta x$. Le bilan de la grandeur considérée est donné par:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C\Delta V) = F(x)A - F(x + \Delta x)A + P\Delta V$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(C) = \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} + P$$

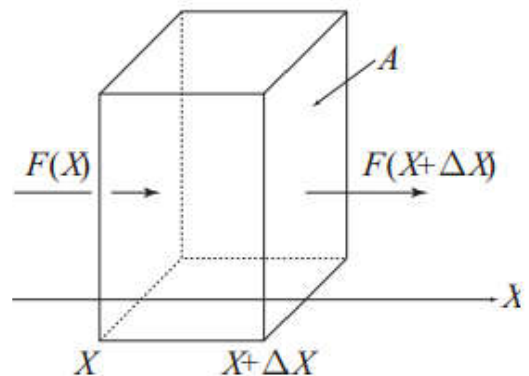


Figure 3.3: Volume de contrôle.

$$\text{avec } F(x) = uC + D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{unidimensionnelle})$$

$$F = \bar{u}C + D \bar{\nabla} C \quad (\text{tridimensionnelle})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(C) = \frac{\partial F(x)}{\partial x} + P$$

En remplaçant la densité de flux:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C) = \frac{\partial}{\partial x}(uC) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial C}{\partial x}\right) + P$$

la généralisation à 3 dimensions:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C) = \bar{\nabla}(\bar{u}C) + \bar{\nabla}(D \bar{\nabla}C) + P$$

En organisant cette équation on aboutit à l'équation de transport:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C) + \bar{\nabla}(\bar{u}C) = \bar{\nabla}(\bar{j}) + P$$

où:

J la densité de flux diffusif.

P: La densité nette de source (sources moins les consommateurs par unité de volume de la grandeur C).

Cette équation permet, si on remplace C par une grandeur physique, de décrire mathématiquement le comportement de cette grandeur en chaque point de l'espace et du temps ce qui permet de simuler son évolution dans le système mis en œuvre.

3 Equations fondamentales de la dynamique des fluides:

3.1 Equation de continuité:

L'équation pour la conservation de la masse, ou l'équation de continuité, peut être déduite en posant la grandeur $C=\rho$ comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) = \bar{\nabla}(\bar{u}\rho) + \bar{\nabla}(D \bar{\nabla}\rho) + P$$

La masse totale est conservée, la masse n'est ni produite ni détruite ($P = 0$), les changements locaux de densité de masse sont toujours dus à des divergences du flux massique ($\bar{\nabla}\rho = 0$) [1].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \bar{\nabla}(\bar{u}\rho) = \bar{\nabla}(D \bar{\nabla}\rho) + P \rightarrow$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \bar{\nabla}(\bar{u}\rho) = 0$$

L'équation est la forme générale de l'équation de conservation de masse et est valable pour les écoulements incompressibles et compressibles.

3.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement:

La conservation de la quantité de mouvement est décrite remplaçant la grandeur C par ρu_i comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = \bar{\nabla}(\bar{u}\rho u_i) - \bar{\nabla}(j) + P$$

où:

$$j = p - \mu[\nabla u + \nabla u_i] \quad [14]$$

où p est la pression ; μ , le coefficient de viscosité relatif aux contraintes de cisaillement au sein du fluide (viscosité dynamique) ; et $i=x, y, z$.

avec $P = \rho g$ la force de gravité.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \bar{u} \cdot \bar{\nabla}(\rho \bar{u}) = \bar{\nabla}(p) + \mu \bar{\nabla} \cdot \bar{u} + \mu \bar{\nabla}(\bar{\nabla} \cdot \bar{u}) + \rho g$$

Les équations de mouvement pour un fluide incompressible sont appelées les équations de NAVIER et STOCKS.

3.3 Conservation de l'énergie

La conservation de l'énergie est décrite en remplaçant la grandeur C par ρH comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) = \bar{\nabla} \cdot (\bar{u}\rho H) + \bar{\nabla} \cdot (k_{eff} \bar{\nabla}\rho H + \tau_{eff} \cdot \bar{u}) + P \quad [15].$$

où:

H est l'enthalpie totale.

$k_{eff} = \frac{k+k_t}{\rho c_p}$ avec k_t qui est la conductivité thermique turbulente, τ_{eff} est le tenseur de contraintes effectives, il est défini selon le modèle de turbulence utilisé.

P : Tient compte des termes de source en raison du rayonnement, du transfert de chaleur aux limites des parois et de l'échange de chaleur avec la phase dispersée.

3.4 Equation de conservation des espèces

L'équation de transport permet, si on remplace C par la masse volumique d'une espèce i , de calculer cette grandeur en chaque point de l'espace ce qui permet de simuler la combustion en voyant à chaque instant les quantités des espèces qui sont mise à l'œuvre dans la combustion.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) = \bar{\nabla}(\bar{u}\rho Y_i) + \bar{\nabla}(\rho D \bar{\nabla} Y_i) + P_i \quad \text{avec } i = 1, \dots, N$$

où N représente le nombre d'espèces dans le mélange, P_i le taux de production de l'espèce i .

Les taux de réaction P_i qui apparaissent comme termes sources dans l'équation sont calculés, pour les écoulements turbulents, par l'un des trois modèles:

Modèle laminaire à taux fini: l'effet des fluctuations turbulentes est ignoré et les taux de réaction sont déterminés par les expressions cinétiques d'Arrhenius.

Modèle de dissipation des tourbillons: les taux de réaction sont supposés être contrôlés par la turbulence, on peut éviter les calculs cinétiques chimiques d'Arrhenius qui sont coûteux. Le modèle est peu coûteux en termes de calcul.

Modèle Eddy-dissipation-concept (EDC): La cinétique chimique détaillée d'Arrhenius peut être incorporée dans des flammes turbulentes. Notez que les calculs de cinétiques chimiques détaillés sont coûteux en termes de calcul.

Dans notre cas on va utiliser une méthode qui permet d'éviter le calcul des taux de production ou de disparition des espèces. Cette méthode s'appelle la fraction de mélange.

3.4.1 Méthode de fraction de mélange:

Soit l'équation de conservation des espèces:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) = \bar{\nabla}(\bar{u}\rho Y_i) + \bar{\nabla}(\rho D \bar{\nabla} Y_i) + P$$

Ecrivons cette équation pour le fuel et pour l'oxygène:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_f) = \bar{\nabla}(\bar{u}\rho Y_f) + \bar{\nabla}(\rho D \bar{\nabla} Y_f) + P_f$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_o) = \bar{\nabla}(\bar{u}\rho Y_o) + \bar{\nabla}(\rho D \bar{\nabla} Y_o) + P_o$$

Stœchiométrie:



Chapitre 3

En introduisant une nouvelle variable : $\phi = s Y_f - Y_o$

Et en multipliant l'équation du fuel par s, puis lui soustraire celle de l'oxygène on trouve:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho(sY_f - Y_o)) = \bar{V}(\bar{u}\rho(Y_f - Y_o)) + \bar{V}(\rho D \bar{V}(Y_f - Y_o)) + sP_f - P_o$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) = \bar{V}(\bar{u}\rho \phi) + \bar{V}(\rho D \bar{V} \phi)$$

avec $sP_f - P_o = 0$ grâce à la stœchiométrie.

la fraction de mélange f est définie comme une fonction linéaire de ϕ tels que f=1 dans le fuel et f=0 dans l'écoulement de l'air.

$$f = \alpha + \beta \phi$$

$$\begin{cases} f = \alpha + \beta = 1 \\ f = \alpha - \beta = 0 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \alpha = \frac{1}{1 - \beta} \\ \beta = \frac{1}{1 - \beta} \end{cases}$$

$$f = \frac{\phi + 1}{2} = \frac{s Y_f - Y_o + 1}{s Y_{f,1} - Y_{o,2}} \quad [16].$$

et comme f est une fonction linéaire de ϕ on peut le substituer dans l'équation de transport:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) = \bar{V}(\bar{u}\rho f) + \bar{V}(\rho D \bar{V} f)$$

Cette méthode permet de résoudre une seule équation comme variable f. à partir de f on peut calculer les fractions massique des autres espèces.

$$f_{sto} < f \leq 1 \quad \text{mélange riche} \quad Y_o = 0 \quad Y_f = \frac{f - f_{sto}}{1 - f_{sto}} Y_{f,1}$$

$$0 < f < f_{sto} \quad \text{mélange pauvre} \quad Y_f = 0 \quad Y_o = \frac{f_{sto} - f}{f_{sto}} Y_{o,2}$$

3.4.2 Relation de la fraction de mélange avec la fraction massique des espèces, la densité et la température:

L'approche de la modélisation de la fraction de mélange est que la chimie est réduite à une ou deux fractions de mélange conservées. Sous l'hypothèse de l'équilibre chimique, tous les

Chapitre 3

scalaires thermochimiques (fractions d'espèces, densité et température) sont uniquement liés à la fraction de mélange f et à l'enthalpie comme suit:

$$\omega_i = \omega_i(f, H) [17].$$

Où

H est l'enthalpie totale.

ω_i est un scalaire thermochimique tels que: les fractions d'espèces, la densité et la température.

4 La turbulence:

4.1 Introduction:

La turbulence est l'état d'un fluide dont l'écoulement est irrégulier tel qu'en tout point de l'espace la vitesse varie aléatoirement. Il est en fait très rare d'observer un écoulement complètement régulier, et souvent on pense que les écoulements réels sont désordonnés car les forces qui leur ont donné naissance le sont, ou que les conditions extérieures sont mal contrôlées ou complexes : c'est faux. Les écoulements sont turbulents et imprévisibles par nature.

La réponse instationnaire à une excitation stationnaire témoigne du caractère non-linéaire de la dynamique des fluides. On dispose de l'équation de la dynamique des fluides, on connaît le terme non-linéaire mais la non-unicité des solutions ne donne aucun espoir de tentative de recherche de solutions analytiques dans des cas réels. D'ailleurs, d'un point de vue mathématique, cette équation n'a toujours pas livré tous ses secrets.

À l'heure actuelle, la turbulence est au cœur des problèmes fondamentaux de la physique classique. Elle est essentiellement caractérisée par l'existence de mouvements de toutes tailles, à l'inverse de l'écoulement laminaire qui a lieu à une échelle précise.

4.2 La théorie de Kolmogorov:

Le mathématicien Andreï Kolmogorov (1903-1987) a publié en 1941 une série d'articles qui sont à la base de la compréhension actuelle de la turbulence.

La théorie stipule que les écoulements turbulents sont caractérisés par l'existence d'une multitude de tourbillons de tailles différentes. Les grands tourbillons se divisent en petits tourbillons qui se divisent à leurs tours en plus petits tourbillons. Ce processus continue jusqu'à la prépondérance des forces visqueuses qui dissipent les plus petits tourbillons.

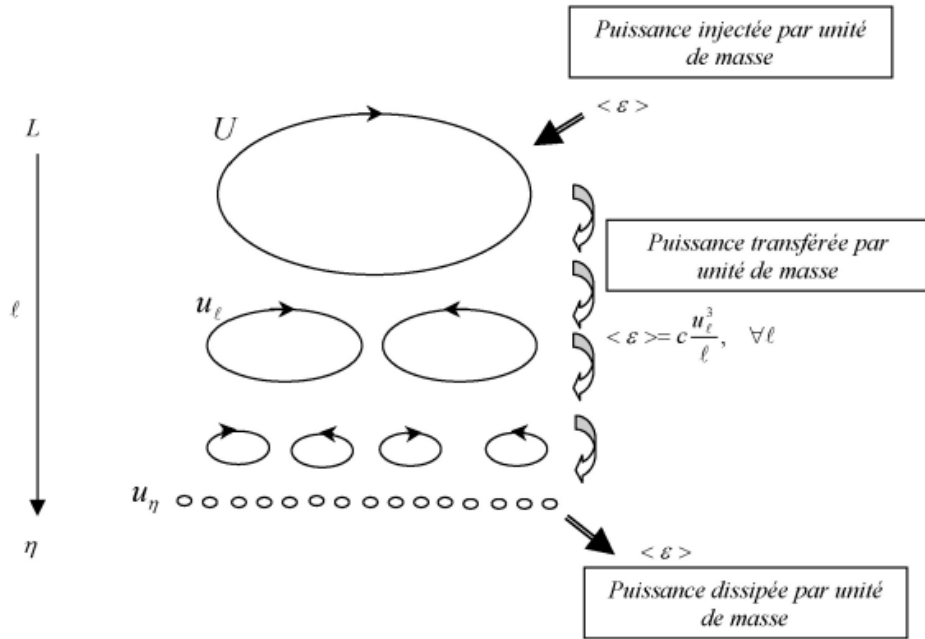


Figure 3.4: Représentation schématique de la théorie de Kolmogorov[18].

Chaque structure d'échelle l transfère son énergie cinétique u_l^2 pendant une durée $\tau_l = \frac{l}{u_l}$ soit $\langle \varepsilon \rangle = c \frac{u_l^2}{\tau_l}$. Une fois transférée l'énergie n'est plus disponible à l'échelle l mais stockée de façon incohérente à des échelles plus petites. En ce sens, l'énergie perdue pour l'échelle l correspond à une dissipation pour cette échelle. C'est la zone inertielle.

Arrivée à l'échelle de Kolmogorov η l'énergie cinétique de ces plus petites structures de la cascade est dissipée sous forme de chaleur par diffusion visqueuse sur un temps caractéristique $\frac{\eta^2}{\nu}$. C'est la zone dissipative.

L'échelle de Kolmogorov η spécifie les tourbillons les plus petits où les forces de viscosité dominent telle que l'énergie cinétique des plus petits tourbillons est convertie en énergie thermique. Donc, cette échelle est fonction de la viscosité cinématique ν et du taux de dissipation de l'énergie cinétique $\langle \varepsilon \rangle$. Elle est donnée par:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}, \quad \tau_\eta = \sqrt{\nu/\varepsilon}, \quad u_\eta = (\nu\varepsilon)^{1/4}$$

où

τ_η : temps de retournement d'un tourbillon.

u_η : vitesse de retournement d'un tourbillon.

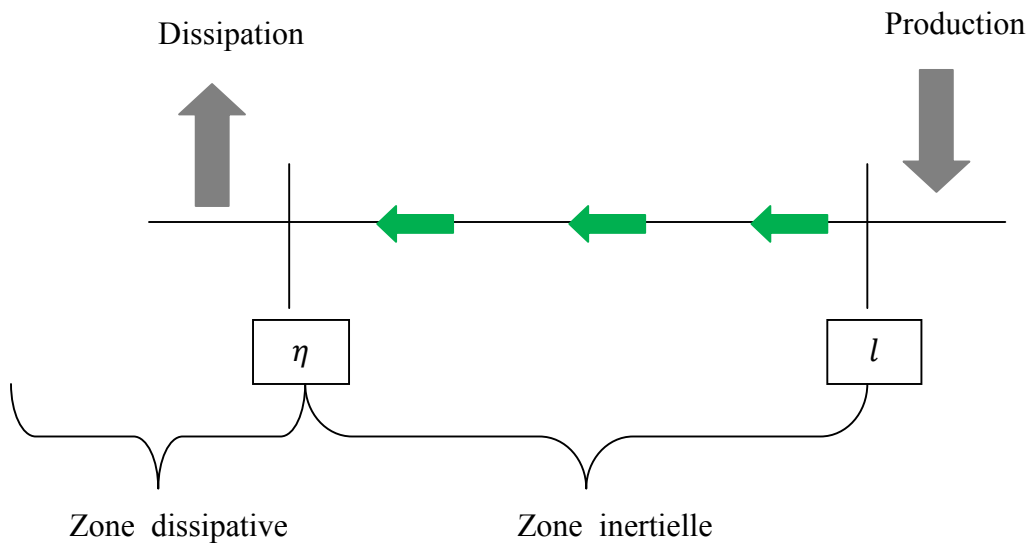


Figure 3.5: Différentes échelles de la turbulence.

La problématique de la turbulence réside dans le coût prohibitif de la simulation numérique.

En effet l'équation de la dynamique des fluides doit être capable de reproduire tout type d'écoulement quel que soit le nombre de Reynolds. Cependant, pour que ce calcul soit fidèle à la réalité, le schéma numérique devra résoudre toutes les échelles, jusqu'à l'échelle de dissipation de Kolmogorov.

La résolution d'un écoulement nécessite de résoudre les équations de Navier Stokes $Re^{\frac{11}{4}}$ fois. Ainsi plus le nombre de Reynolds est grand et bien plus la simulation coûtera en temps de calcul. Par exemple, il est inconcevable aujourd'hui de simuler les écoulements autour d'une voiture ou d'un avion (qui présentent un nombre de Reynolds supérieur à 10^6).

La problématique est donc de modéliser l'énergie évacuée par les petites échelles vers l'échelle dissipative sans avoir à simuler toute la gamme d'échelles responsables de cette dissipation.

4.3 Modèles de turbulence:

Il existe trois approches principales figure (3.6) de la simulation numérique des écoulements turbulents qui sont :

- **Simulation Numérique Directe (DNS pour Direct Numerical Simulation):** Dans cette approche toutes les échelles de l'écoulement sont résolues. La DNS résout $Re^{\frac{11}{4}}$ fois les équations de la dynamique des fluides, donc cette approche est numériquement extrêmement coûteuse et limitée à de faibles nombres de Reynolds. Cependant, c'est l'approche la plus précise pour la simulation de la turbulence.
- **Simulation des équations de Navier Stokes moyennées au sens de Reynolds (RANS pour Reynolds-Average Navier-Stokes Simulation) :** elles ne s'attachent qu'à réaliser un suivi des quantités moyennes et ne résolvent ainsi aucune échelle de la

Chapitre 3

turbulence. Les termes non fermés (contraintes de Reynolds), intervenant dans les équations RANS et impliquant des corrélations nécessitent l'introduction de modèles.

- **Simulation numérique des grandes échelles (LES pour Large Eddy Simulation):** elle résout les équations des quantités filtrées, en décrivant la dynamique des larges structures énergétiques et modélise ce qui se passe aux plus petites échelles. En effet, ce sont les grandes échelles du mouvement qui contribuent à la diffusion turbulente de la quantité de mouvement, de la chaleur et des espèces. Elles sont par ailleurs plus sensibles aux conditions aux limites. Elle est moins chère que la DNS et plus précise que les RANS.

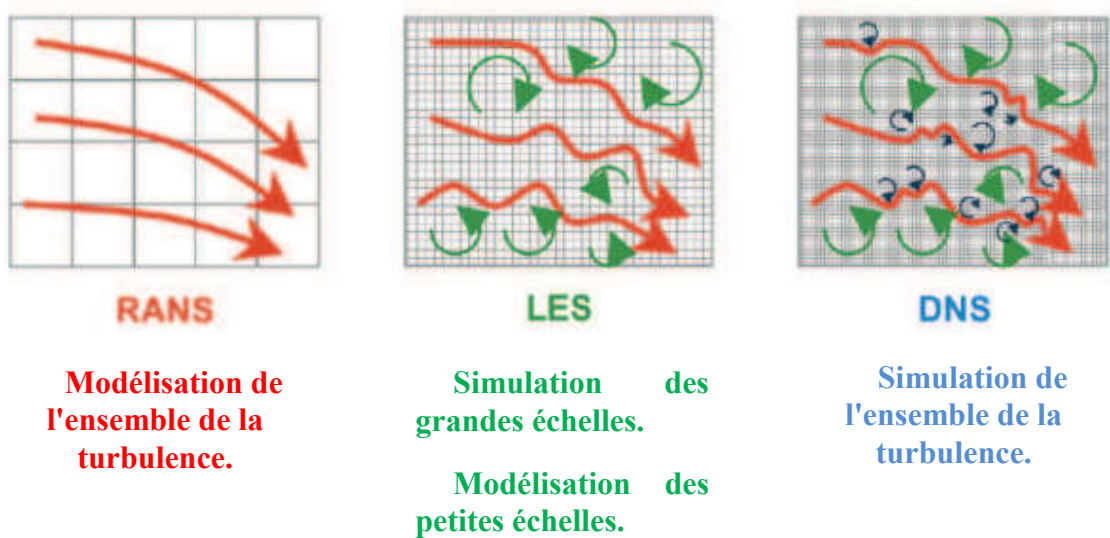


Figure 3.6: Comparaison entre simulation numérique directe (DNS), résolution des équations moyennées (RANS) et simulation aux grandes échelles (LES)[15].

Dans notre cas on va s'intéresser à l'approche RANS qu'on va décrire dans le paragraphe qui suit.

4.3.1 Equations de Navier Stokes moyennées au sens de Reynolds:

La turbulence est un phénomène aléatoire ce qui justifie l'emploi des outils statistiques. D'un point de vue engineering, seulement la moyenne et la variance d'une quantité sont d'un intérêt primaire. Toutes les quantités instantanées sont divisées en une partie moyenne et fluctuante comme suit:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi'$$

où ϕ désigne un scalaire telles que la vitesse, la pression, l'énergie ou la concentration de l'espèce.

La barre montre que la quantité est moyennée, la prime indique la fluctuation. Les quantités moyennes sont calculées par une moyenne d'ensemble sur toutes les réalisations $U_k, k=1,2,\dots,n$ de cette quantité à un point fixe de l'espace et lu temps:

$$\bar{\phi} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \phi_k(x, t) \right)$$

L'application de cette moyenne aux équations fondamentales donne :

4.3.1.1 Equation de continuité:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}) + \bar{\nabla}(\bar{u}\rho) = 0$$

4.3.1.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\bar{u}_i) + \bar{u}_j \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\bar{u}_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{p}) + \mu \frac{\partial^2}{\partial x_j^2}(\bar{u}_i) + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_j) \right) + \bar{\rho}g_i - \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \overline{u'_j u'_i}) \end{aligned}$$

On rappelle que l'écoulement moyen est stationnaire, et donc que la quantité de mouvement doit être constante en un point fixe de l'écoulement $\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\bar{u}_i) = 0$.

$\bar{u}_j \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\bar{u}_i)$: transport de la quantité de mouvement par convection de l'écoulement moyen.

$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{p})$: transport de la quantité de mouvement associé aux forces de pression moyenne.

$\frac{\partial^2}{\partial x_j^2}(\bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_j) \right)$: transport de la quantité de mouvement associé aux forces de frottement visqueux de l'écoulement moyen.

$\bar{\rho} \overline{u'_j u'_i}$: transport de la quantité de mouvement associé aux fluctuations de la turbulence.

Le terme $\bar{\rho} \overline{u'_j u'_i}$: est appelé le tenseur de Reynolds.

4.3.1.3 Conservation de l'enthalpie:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\bar{H}) = \bar{\nabla}(\bar{u}\bar{\rho}\bar{H}) + \bar{\nabla}(D\bar{\nabla}\bar{\rho}\bar{H} + \overline{\tau_{eff}\cdot\bar{u}}) + P$$

4.3.1.4 Equation de conservation de la fraction de mélange:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\bar{f}) = \bar{\nabla}(\bar{u}\bar{\rho}\bar{f}) + \bar{\nabla}(\bar{\rho}D\bar{\nabla}\bar{f})$$

4.3.1.5 Expressions empiriques du tenseur de Reynolds : fermeture des équations:

La décomposition de Reynolds en un champ moyen et un champ fluctuant ajoute des inconnues au problème, il manque donc une équation donnant l'expression du tenseur de Reynolds (on parle de problème de fermeture des équations). On se réduit donc à trouver des solutions approchées en imaginant des expressions possibles du terme $\bar{\rho} \overline{u'_j u'_i}$ (relations de fermetures) pour la résolution des équations moyennées de l'écoulement. La fermeture de ces termes peut se faire directement par une relation algébrique (par exemple le modèle de Prandtl de longueur de mélange), où par des équations pour les contraintes de Reynolds (2 pour le modèle k-ε et 7 pour le modèle RSM).

4.4 Modèle de turbulence k ε:

Les modèles de turbulence à deux équations permettent la détermination de la longueur turbulente et de l'échelle de temps en résolvant deux équations de transport distinctes. La robustesse, l'économie et la précision raisonnable pour une large gamme d'écoulement turbulents expliquent sa popularité dans les simulations des écoulements turbulents et des transferts de chaleur.

Le modèle standard est basé sur des équations de transport pour l'énergie cinétique de turbulence (k) et son taux de dissipation (ε). Elles sont données par:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon + G_k$$

L'équation de transport de ε peut être modélisée de façon analogue à celle de k donnant :

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Dans ces équations, G_k représente la génération de l'énergie cinétique de la turbulence due aux gradients de vitesse moyens. $C_{1\varepsilon}$ et $C_{2\varepsilon}$ sont des constantes. σ_k et σ_ε sont les nombres de Prandtl turbulents pour k et ε . μ_t est la viscosité turbulente qui est une propriété du champ de l'écoulement turbulent, elle est donnée par:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

où C_μ est une constante.

Les constantes du modèle $k - \varepsilon$ sont tabulées ci-dessous [17] :

Symbole	Valeur
C_μ	0.09
σ_k	1.0
σ_ε	1.3
C_1	1.44
C_2	1.92

Valeurs des constantes du modèle $k - \varepsilon$

Dans la dérivation du modèle, l'hypothèse est que l'écoulement est totalement turbulent et que les effets de la viscosité moléculaire sont négligeables. Le modèle standard n'est donc valable que pour des écoulements totalement turbulents.

4.4.1 Modélisation de la génération de l'énergie cinétique de turbulence:

Le terme G_k , représentant la production de l'énergie cinétique de la turbulence, est modélisé pour le modèle standard comme:

$$G_k = \rho \overline{u'_j u'_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

4.4.2 Fermeture des équations du premier ordre:

Ce type de fermetures représente la méthode la plus facile pour approximer les contraintes de Reynolds. Elles sont basées sur le principe de la viscosité turbulente de Boussinesq qui s'écrit

$$\rho \overline{u'_j u'_i} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

L'avantage de cette approche est le coût de calcul relativement faible. L'inconvénient de l'hypothèse de Boussinesq telle que présentée est qu'elle suppose que μ_t est une quantité scalaire isotrope, ce qui n'est pas strictement vrai. Cependant, l'hypothèse d'une viscosité turbulente isotrope fonctionne généralement bien.

4.4.3 Le transfert de chaleur dans le modèle de turbulence $k \quad \varepsilon$:

Le modèle $k \quad \varepsilon$ définit la conductivité thermique turbulente k_t et le tenseur de contraintes effective, τ_{eff} comme suit:

$$k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

où $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$

La valeur par défaut du nombre de Prandtl turbulent est de 0.85.

La simulation du transfert de chaleur est effectuée par la résolution de l'équation de la conservation de l'énergie dans les régions fluides et par la résolution de l'équation ci-dessous pour les régions solides:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) = \bar{\nabla} \cdot (\bar{u} \rho T) + \bar{\nabla} \cdot (k \bar{\nabla} T) + P$$

où k est la conductivité et T la température.

5 Le Rayonnement:

L'objectif de la modélisation de rayonnement est de résoudre l'équation de transport de rayonnement, d'obtenir le terme source, P , pour l'équation d'énergie et le flux de chaleur radiatif aux murs. Nous devons nous limiter à des processus de rayonnement cohérents indépendants du temps. Il s'agit normalement d'une très bonne approximation des situations susceptibles d'être rencontrées dans les applications industrielles, car l'échelle de temps, pour que les rayonnements entrent dans l'équilibre local, soit très courte et les températures soient relativement faibles.

L'équation de transport radiatif pour un milieu absorbant, émettant et diffusant à la position r dans la direction s est:

$$\frac{dI(r, s)}{ds} + (\alpha + \alpha_s)I(r, s) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \Phi(s, s') d\Omega$$

où

I : L'intensité du rayonnement, qui dépend de la position r et de la direction s

s' : Vecteur de direction de diffusion.

α et α_s sont respectivement les coefficients d'absorption et de diffusion.

n : Indice de réfraction.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

T : Température locale.

Ω : L'angle solide.

Φ : Fonction de phase de diffusion linéaire anisotrope:

$$\Phi(s, s') = 1 + C s' \cdot s$$

C : Coefficient de fonction de phase linéaire-anisotrope, qui est une propriété du fluide. La valeur de C varie de -1 à 1. Une valeur positive indique que plus d'énergie rayonnante est dispersée vers l'avant que vers l'arrière, et une valeur négative signifie que plus d'énergie rayonnante est dispersée vers l'arrière que vers l'avant. Une valeur zéro définit la diffusion isotrope (c'est-à-dire la diffusion est uniforme dans toutes les directions).

En raison de la dépendance de 3 coordonnées spatiales, 2 coordonnées de direction locales, la solution formelle de l'équation de transfert radiatif prend beaucoup de temps et est habituellement réalisée en utilisant des modèles approximatifs pour les dépendances directionnelles. Pour les approximations directionnelles, on va se contenter du modèle P-1 qui est le plus simple pour modéliser le rayonnement.

5.1 Modèle P-1:

L'approximation différentielle ou P-1 est une simplification de l'équation de transport radiatif, qui suppose que l'intensité du rayonnement I est isotrope ou indépendante de la direction à un emplacement donné dans l'espace.

Le flux de chaleur radiatif pour un milieu émetteur, absorbant et diffusant peut être calculé comme suit:

$$q_{rv} = \frac{1}{3(\alpha + \alpha_s)} \frac{\nabla G}{C \alpha_s}$$

G est le rayonnement incident, et C est le coefficient de fonction de phase linéaire-anisotrope.

L'équation pour le rayonnement incident résultant de la substitution des termes ci-dessus à l'équation de transport radiatif:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{3(\alpha + \alpha_s)} \frac{\nabla G}{C \alpha_s} \right) \quad \alpha G + 4\alpha n^2 \sigma T^4 = 0$$

En combinant l'équation 20 et l'équation 21, on obtient l'équation suivante:

$$\nabla \cdot (q_{rv}) = \alpha G - 4\alpha n^2 \sigma T^4$$

L'expression pour $\nabla \cdot (q_{rv})$ peut être directement substituée à l'équation d'énergie pour tenir compte des sources de chaleur en raison des rayonnements.

6 Modélisation de l'interaction Turbulence-Chimie:

Dans le problème de la combustion turbulente, une partie importante des intérêts de recherche est toujours axée sur la description de ces détails telle que la façon dont le mélange change de son état initial à la phase finale et combien de temps il faut pour atteindre cet état. Dans cette recherche, La chimie turbulente est explorée par trois méthodes séparément: la cinétique de réaction, le modèle turbulent de dissipation et le modèle qu'on va utiliser :le modèle de fonction de densité de probabilité (PDF).

6.1 Fonction de densité de probabilité (PDF):

La théorie de la combustion non pré-mélangée repose sur le fait que le mélange n'est pas suffisamment rapide avant l'initiation de la réaction chimique, donc le mélange et la réaction ne prendront place que dans des zones de réaction minces qui les séparent.

Dans ce modèle, les équations de transport pour un ou deux scalaires conservés qui sont appelés les fractions de mélange sont résolues. Les concentrations en espèces sont dérivées du mélange prédit des champs de fraction au moyen du calcul de l'équilibre thermodynamique au lieu de l'équation de transport des espèces individuelles. L'interaction de la turbulence et de la chimie est donc prise en compte avec une fonction de densité de probabilité PDF.

Les équations précédentes décrivent les relations instantanées entre la fraction de mélange et les fractions d'espèces, la densité et la température sous l'hypothèse d'équilibre chimique. Cependant, la prévision de l'écoulement réactionnel turbulent concerne la prédiction des valeurs moyennes de ces scalaires fluctuants. La relation entre ces valeurs moyennes et les valeurs instantanées dépend du modèle d'interaction turbulence-chimie.

6.1.1 Description de la fonction de densité de probabilité :

La fonction de densité de probabilité $p(f)$ peut être considérée comme la fraction de temps que le fluide dépense dans le voisinage de l'état f figure(3.7). La valeur fluctuante de f , tracée sur le côté droit de la figure, dépense une fraction de temps dans la plage notée f , tracée sur le côté gauche de la figure, la fonction de densité de probabilité prend des valeurs telle que la zone sous sa courbe dans la bande dénotée f , soit égale à la fraction de temps que f passe dans cette plage. Ecrit mathématiquement:

$$p(f) \quad f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i$$

Où T est l'échelle de temps et τ_i est la quantité de temps que f passe dans la bande Δf . La forme de la fonction dépend de la nature des fluctuations turbulentes en f . Dans la pratique, $p(f)$ est inconnu et est modélisé comme une fonction mathématique qui se rapproche des formes réelles qui ont été observées expérimentalement.

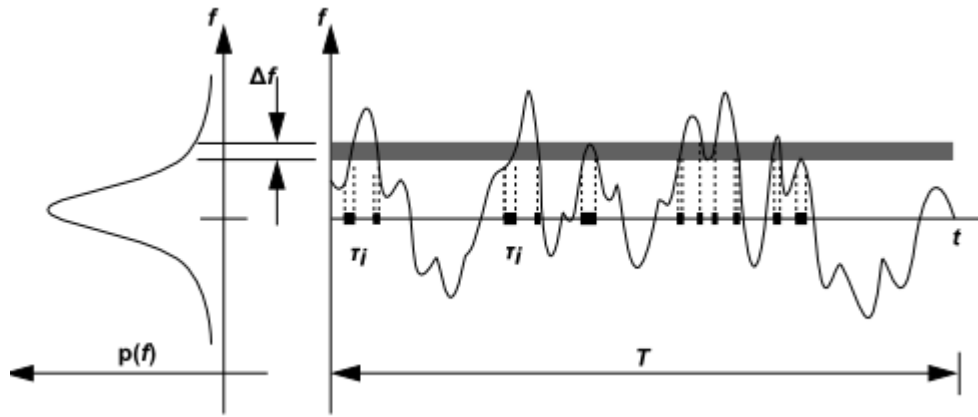


Figure 3.7: Représentation graphique de la fonction de densité de probabilité [17].

6.1.2 Dérivation des valeurs scalaires moyennes de la fraction de mélange instantanée:

Les valeurs instantanées de la fraction de masse, de la densité et la température sont calculées à partir de l'équation ci-dessous, où H est l'enthalpie totale instantanée:

$$\omega_i = \omega_i(f, H)$$

La fonction de densité de probabilité, décrivant les fluctuations temporelles de f dans le flux turbulent, peut être utilisée pour calculer les valeurs moyennes des variables qui dépendent de f . On peut calculer les fractions de masse des espèces moyennes pondérées par densité et la température comme:

$$\bar{\omega}_i = \int_0^1 p(f) \omega_i(f, \bar{H}) df$$

la détermination de $\bar{\omega}_i$ requiert la résolution de l'équation de transport de l'enthalpie H :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{H}) = \bar{v} (\bar{u} \rho \bar{H}) + \bar{v} \left(\frac{k_t}{c_p} \bar{v} \bar{H} \right) + S_h$$

Où S_h tient compte des termes de source en raison du rayonnement, du transfert de chaleur aux limites des parois et de l'échange de chaleur avec la phase dispersée.

La forme de la densité de probabilité est décrite par l'une de deux fonctions mathématiques:

Chapitre 3

La fonction double-delta (cas de fraction de deux-mélange-seulement)

La fonction beta (cas de fraction à un seul et à deux mélanges)

La fonction double-delta est la plus facilement calculée, tandis que la fonction beta est la plus étroitement représentante des formes observés expérimentalement. La forme produite par cette fonction dépend uniquement de la fraction moyenne du mélange, et de sa variance,. Une description détaillée de chaque fonction suit.

6.1.2.1 La fonction double-delta:

$$p(f) = \begin{cases} 0.5, & f = \bar{f} - \sqrt{\bar{f}'^2} \\ 0.5, & f = \bar{f} + \sqrt{\bar{f}'^2} \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases}$$

La fonction double delta est très facile à calculer, mais est toujours moins précise que la fonction beta car elle suppose que seuls deux états se produisent dans les écoulements turbulents. Pour cette raison, il n'est disponible que pour les simulations de fraction de deux mélanges où l'économie de coût de calcul est significative.

6.1.2.2 La fonction beta :

elle est donné par:

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}df}$$

où:

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} + 1 \right]$$
$$\beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} + 1 \right]$$

Il est important de noter que cette forme n'est fonction que de ses deux premiers moments, à savoir la fraction de mélange moyenne \bar{f} , et la variance de fraction de mélange \bar{f}'^2 . Ainsi, compte tenu de la prédiction et à chaque point du champ d'écoulement, la forme supposée peut être calculée et utilisée comme fonction de pondération pour déterminer les valeurs moyennes des fractions massiques des espèces, La densité et la température en utilisant, l'équation précédente.

La dépendance unique de φ_i (espèces de fractions de masse, de densité ou de température) f et H exige que le système de réaction réponde aux conditions suivantes:

- Le système chimique doit être du type diffusion avec des entrées séparées de combustible et d'oxydant.

- Le nombre de Lewis doit être l'unité. (Ceci implique que les coefficients de diffusion pour toutes les espèces et l'enthalpie sont égaux, une bonne approximation dans le flux turbulent).
- Le flux doit être turbulent.

7 Ecoulement multiphasique:

Les progrès de la mécanique des fluides ont servi de base à une meilleure compréhension de la dynamique des écoulements multiphasique. Actuellement, il existe deux approches pour le calcul numérique des écoulements multiphasiques: l'approche Euler-Lagrange ("Discret phase Model") et l'approche Euler-Euler ("Multiphase Model").

7.1 L'approche Euler-Lagrange:

La phase fluide est traitée comme une phase continue en résolvant les équations de Navier-Stokes, tandis que la phase dispersée est résolue en effectuant le suivi d'un grand nombre de particules, de bulles ou de gouttelettes dans le champ d'écoulement calculé. La phase dispersée peut échanger de la quantité de mouvement, la masse et l'énergie avec la phase fluide.

Cette approche est considérablement plus simple lorsque les interactions particule-particule peuvent être négligées, ce qui nécessite que la deuxième phase dispersée occupe une faible fraction de volume, même si une charge de masse élevée ($m_{particule} \geq m_{fluide}$) est acceptable. Les trajectoires de particules sont calculées individuellement à des intervalles spécifiés pendant le calcul de la phase fluide. Cela rend le modèle approprié pour la modélisation de l'atomisation, de la combustion de charbon, de biomasse, de combustibles liquides et de certains écoulements chargés de particules, mais inapproprié pour la modélisation de mélanges liquides-liquides, de lits fluidisés ou de toute application dans laquelle la fraction volumique de la deuxième phase ne peut être négligée.

7.1.1 Limitations:

7.1.1.1 Limitation de la fraction de volume de particules:

La formulation du modèle de phase discrète contient l'hypothèse que la deuxième phase est suffisamment diluée pour que les interactions particule-particule et les effets de la fraction volumique des particules sur la phase fluide soient négligeables. Dans la pratique, ces problèmes impliquent que la phase discrète doit être présente à une fraction de volume assez faible, généralement inférieure à 10-12%.

7.1.1.2 Limitation de la modélisation de particules en suspensions continues:

Le modèle de phase discrète à particules stables est adapté aux écoulements dans lesquels des flux de particules sont injectés dans un écoulement de phase continue avec une condition d'entrée et de sortie bien définie. Ce modèle ne modélise pas efficacement les écoulements dans lesquels les particules sont suspendues indéfiniment dans la phase continue, comme cela se produit dans des suspensions solides dans des systèmes fermés tels que des réservoirs agités, des récipients mélangeurs ou des lits fluidisés.

7.1.2 Théorie des mouvements de particules:

Le modèle prédit la trajectoire d'une particule de phase discrète en intégrant le bilan de force sur la particule, qui est écrit dans un cadre de référence Lagrangien. Ce bilan de force équivaut à l'inertie des particules avec les forces agissant sur la particule, et peut être écrit comme:

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = F_D(\bar{u} - \bar{u}_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F$$

Où F est un terme d'accélération supplémentaire (force /unité de masse), $F_D(\bar{u} - \bar{u}_p)$ est la force de traînée par unité de masse de particules. Avec:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D R_e}{24}$$

Ici, \bar{u} la vitesse de la phase fluide, \bar{u}_p est la vitesse de la particule, μ la viscosité moléculaire du fluide, ρ la densité du fluide, ρ_p la densité de la particule, d_p le diamètre de la particule et C_D le coefficient de glissement. R_e est le nombre relatif de Reynolds, qui est défini comme:

$$R_e = \frac{\rho d_p}{\mu} |\bar{u}_p - \bar{u}|$$

L'intégration de ces équations fournit les composantes de vitesse des particules, à partir desquelles les trajectoires peuvent être obtenues par une intégration supplémentaire de l'équation pour le vecteur de position:

$$\frac{d\bar{X}_p}{dt} = \bar{u}_p$$

7.1.2.1 Forces additionnelles:

L'équation du bilan de force intègre des forces supplémentaires dans le bilan de force qui peut être important dans des circonstances particulières. La première est la force de «masse virtuelle», c'est la force requise pour accélérer le fluide entourant la particule. Cette force peut être écrite comme:

$$F = C_{VM} \frac{\rho}{\rho_p} \left(\bar{u}_p \nabla \bar{u} - \frac{d\bar{u}_p}{dt} \right)$$

Où C_{VM} est le facteur de masse virtuel avec une valeur par défaut de 0,5.

Une force supplémentaire provient du gradient de pression dans le fluide:

$$F = \frac{\rho}{\rho_p} \bar{u}_p \nabla \bar{u}$$

Chapitre 3

Les forces de «masse virtuelle» et du gradient de pression ne sont pas importantes lorsque la densité du fluide est bien inférieure à la densité des particules, comme c'est le cas pour les particules liquides / solides dans les écoulements gazeux ($\frac{\rho}{\rho_p} \ll 1$).

7.1.3 Lois du Coefficient de glissement:

- **Loi de traînée sphérique:** La traînée de la particule est autorisée à varier avec le nombre (instantané) de Reynolds en utilisant une approximation analytique de la relation expérimentale (Traîné-Nombre de Reynolds) pour les particules sphériques. Le coefficient de traînée, pour les particules sphériques lisses, est donné par:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$$

Où a_1 , a_2 et a_3 sont des constantes qui s'appliquent sur plusieurs gammes de Re données par Morsi et Alexander [19].

- **Loi de traînée non sphérique:** Pour les particules non sphériques, Haider et Levenspiel [20] ont développé la corrélation:

$$C_D = \frac{24}{Re} [1 + b_1 Re^{b_2}] + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re}$$

$$\text{où } b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581 Re + 2.4486 Re^2)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944 Re + 18.4222 Re^2 - 10.2599 Re^3)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584 Re - 20.7322 Re^2 + 15.8855 Re^3)$$

s a été introduit pour tenir compte de la forme des particules, c'est le concept de Sphéricité des particules. Il est donné:

$$s = \frac{S}{S_p}$$

où s est la surface d'une sphère ayant le même volume que la particule et S est la surface spécifique de la particule.

7.1.4 Lois d'échange de chaleur et de masse:

La réaction de particules peuvent être modélisées et leur impact sur la phase continue peut être examiné. Plusieurs relations de transfert de chaleur et de masse, appelées «lois», sont disponibles et les modèles physiques employés dans ces lois sont décrits dans cette section.

Dans le cas de particule dite de combustion les lois ci-dessous sont utilisées:

- Chauffage.
- Dévolatilisation.

Chapitre 3

- Combustion de surface (Combustion du Charbon).

7.1.4.1 Chauffage:

Les lois de chauffage sont appliquées lorsque la température de la particule est inférieure à la température de vaporisation/dévolatilisation définie, et après que la fraction volatile, d'une particule a été consommée, c'est à dire après le processus de dévolatilisation. Ces conditions peuvent être écrites comme:

$$T_p < T_{vap/dev}$$
$$m_p < (1 - f_{v,0})m_{p,0}$$

Où T_p est la température des particules, $T_{vap/dev}$ est la température de vaporisation/dévolatilisation, $m_{p,0}$ est la masse initiale de la particule, $f_{v,0}$ est fraction volatile et m_p c'est sa masse actuelle.

On utilise un bilan thermique simple pour relier la température des particules, au transfert de chaleur convectif et à l'absorption/émission de rayonnement à la surface de la particule:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4)$$

où:

c_p : Capacité calorifique de la particule (J / kg-K).

A_p : Surface de la particule (m²).

T_∞ : Température locale de la phase fluide (K).

h_c : Coefficient de transfert de chaleur convective (W/m².K).

ε_p : Emissivité des particules (sans dimension).

σ : Constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x10⁻⁸ W/m².K⁴).

θ_R : Température de rayonnement = $\left(\frac{\int I d\Omega}{4\sigma}\right)^{1/4}$ Où I est l'intensité du rayonnement et Ω est l'angle solide.

Le coefficient de transfert de chaleur convectif, est évalué à l'aide de la corrélation de Ranz et Marshall [17]:

$$Nu = \frac{d_p}{k_\infty} = 2 + 0.6 Re_e^{1/2} Pr^{1/3}$$

Où:

d_p :Diamètre des particules (m).

k_∞ : Conductivité thermique de la phase continue (W/ m. K).

Re_e : est le nombre relatif de Reynolds.

Enfin, la chaleur perdue ou acquise par la particule lorsqu'elle traverse chaque cellule de calcul apparaît comme une source ou un puits de chaleur dans les calculs ultérieurs de l'équation d'énergie en phase continue.

7.1.4.2 Dévolatilisation:

La loi de dévolatilisation est appliquée à une particule de combustion lorsque la température de la particule atteint la température de dévolatilisation et reste en vigueur tant que la masse de la particule dépasse la masse des non volatils dans la particule:

$$T_p \geq T_{vap/dev}$$
$$m_p > (1 - f_{v,0})m_{p,0}$$

Il existe un large choix de modèles de dévolatilisation:

- Le modèle à taux constant.
- Le modèle à un taux cinétique.
- Le modèle à deux taux (modèle Kobayashi).

7.1.4.2.1 Le modèle de dévolatilisation à taux constant:

Dans le modèle de dévolatilisation à taux constant, les volatiles sont libérés à un taux constant A_0 (s^{-1}) suivant cette expression [21]:

$$\frac{dm_p}{dt} = A_0 f_{v,0} m_{p,0}$$

Une valeur représentative est $12 s^{-1}$ dérivée du travail de Pillai [21] sur la combustion du charbon. L'utilisation correcte du taux constant de dévolatilisation exige que la température de vaporisation/ dévolatilisation, qui contrôle l'apparition de la dévolatilisation, soit réglée de manière appropriée.

7.1.4.2.2 Le modèle à un taux cinétique:

Le modèle de dévolatilisation à un taux cinétique suppose que le taux de dévolatilisation dépend de la quantité de substances volatiles restant dans la particule [21]:

$$\frac{dm_p}{dt} = A_c [m_p - (1 - f_{v,0})m_{p,0}]$$

Le taux cinétique, A_c , est défini par la loi d'Arrhenius, donné par:

$$A_c = A_1 \exp \left(-E/RT_p \right)$$

où A_1 est le facteur pré-exponentiel et E l'énergie d'activation.

7.1.4.2.3 Le modèle à deux taux (modèle Kobayashi):

Kobayashi a fourni les expressions de taux de dévolatilisation cinétique [22] :

$$\frac{m_{p,0} - m_p}{m_{p,0} - m_a} = \int_0^t (a_1 R_1 + a_2 R_2) \exp\left(-\int_0^t (R_1 + R_2) dt\right) dt$$

où:

$$R_1 = K_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_p}\right)$$

$$R_2 = K_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_p}\right)$$

m_a est masse des cendres.

Le modèle de Kobayashi nécessite l'entrée des paramètres de la vitesse cinétique K_1 , K_2 , E_1 et E_2 , et les rendements des réactions, a_1 et a_2 .

Il est recommandé dans la littérature [22] que les valeurs par défaut pour les facteurs de rendement sont de 0,3 pour la première réaction (lente) et 1,0 pour la seconde réaction (rapide).

7.1.4.3 Combustion de surface (Combustion du Charbon):

Une fois que la composante volatile de la particule est complètement évoluée, une réaction de surface commence à consommer la fraction de combustible, f_{com} de la particule. Cette loi est donc active après la transformation des substances volatiles:

$$m_p < (1 - f_{v,0})m_{p,0}$$

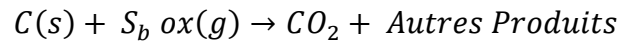
Et jusqu'à ce que la fraction de combustible soit consommée:

$$m_p < (1 - f_{v,0} - f_{com})m_{p,0}$$

Lorsque la fraction de combustible f_{com} , a été consommée, la particule de combustion peut contenir des «cendres» résiduelles qui reviennent à la loi de chauffage (décrite précédemment).

La combustion de surface consomme le contenu réactif de la particule selon la réaction stœchiométrique:

Chapitre 3



Où S_b est défini en termes de masse d'oxydant par masse de charbon.

7.1.4.3.1 Le modèle de taux de réaction de surface limité à la diffusion:

Le modèle de taux de réaction de surface limité à la diffusion suppose que la réaction de surface se déroule à une vitesse déterminée par la diffusion de l'oxydant gazeux à la surface de la particule:

$$\frac{dm_p}{dt} = 4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{OX} T_\infty \rho}{S_b (T_p + T_\infty)}$$

$D_{i,m}$: Coefficient de diffusion pour l'oxydant dans la masse (m^2/s).

Y_{OX} : Fraction de masse locale de l'oxydant dans le gaz.

ρ : Densité du gaz (kg/m^3).

Le modèle de taux limité à la diffusion suppose que le diamètre des particules ne change pas et que la contribution cinétique au taux de réaction de surface est négligeable.

7.1.4.3.2 Le modèle de taux de réaction de surface cinétique / diffusif:

Le modèle de taux de cinétique / diffusif suppose que le taux de réaction de surface est déterminé par la cinétique et par un taux de diffusion, dans lequel le taux de diffusion est donné par:

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p}$$

Et un taux cinétique:

$$= C_2 e^{-(E/RT_p)}$$

Et le taux de combustion:

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p^2 p_{ox} \frac{D_0}{D_0 +}$$

p_{ox} : Est la pression partielle des espèces oxydantes dans le gaz entourant la particule de combustion donné par la loi des gaz parfaits:

$$p_{ox} = \rho Y_{ox} R T_\infty$$

On suppose que la taille des particules reste constante dans ce modèle alors que la densité est autorisée à diminuer.

7.1.4.3.3 Transfert de chaleur et de masse pendant la combustion Charbon:

La réaction de surface consomme les espèces oxydantes en phase gazeuse; c'est-à-dire qu'il fournit un terme source (négatif) pendant le calcul de l'équation de transport pour cette espèce. De même, la réaction de surface est une source d'espèces en phase gazeuse: le produit de la réaction de surface hétérogène apparaît dans la phase gazeuse comme une espèce chimique choisie par l'utilisateur. La réaction de surface consomme ou produit de l'énergie, en une quantité déterminée par la chaleur de réaction définie. Le bilan thermique des particules lors de la réaction de surface est:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dT_p}{dt} H_{reac} + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4)$$

Où H_{reac} est la chaleur dégagée par la réaction de surface. Notez qu'une seule partie $(1 - f_h)$ de l'énergie produite par la réaction de surface apparaît comme une source de chaleur dans l'équation d'énergie en phase gazeuse: la particule absorbe directement une fraction de cette chaleur.

Chapitre 4

Résolution des équations avec Fluent et interprétation des résultats

1 Introduction:

La chaudière à biomasse réalisée dans ce projet de fin d'étude permet de produire de l'eau chaude qui peut atteindre 80 °C de température.

2 Architecture générale:

La chaudière se présente sous la forme d'un cylindre reposant sur un support rectangulaire, le cylindre représente la chambre de combustion et le support représente un châssis. Ce dernier abrite le système d'évacuation des cendres, l'alimentation en air et celle de la biomasse.

L'échangeur de chaleur est monté juste au dessus de la chambre de combustion pour augmenter le transfert de chaleur par rayonnement. Sur la face supérieure du cylindre se trouve le système d'échappement des gaz, sur le côté gauche se trouve le silo d'alimentation qui contient la biomasse..

3 Eléments constituant la chaudière:

3.1 Système d'alimentation en biomasse:

Il est constitué d'un silo de forme pyramidale de base rectangulaire, ce silo peut contenir jusqu'à 50 kg de grignon d'olive. A son extrémité basse se trouve une vis sans fin rattachée à un moteur électrique ce qui permet d'alimenter la chaudière en grignon d'olive avec un débit modulable selon les conditions de fonctionnement optimales.

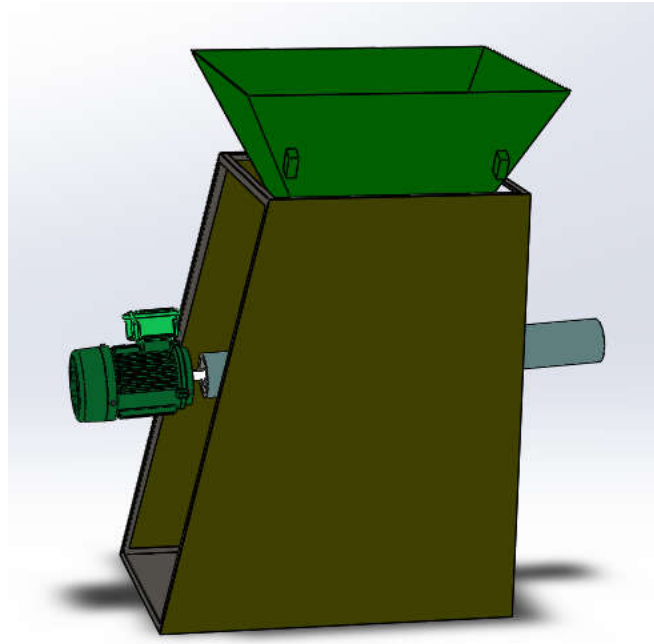


Figure 4.1: Silo d'alimentation

3.2 Système d'alimentation en air:

Il est constitué d'un ventilateur et du circuit d'alimentation. Le ventilateur permet d'alimenter la chaudière en air avec un débit précis qui est défini dans la partie calculs préliminaires. Le circuit d'alimentation dans notre cas est un tuyau en Acier Inoxydable pour éviter des problèmes liés aux hautes températures de la chambre de combustion.

La distribution d'air se fait par une pièce de forme conique pour réaliser un meilleur mélange air combustible.

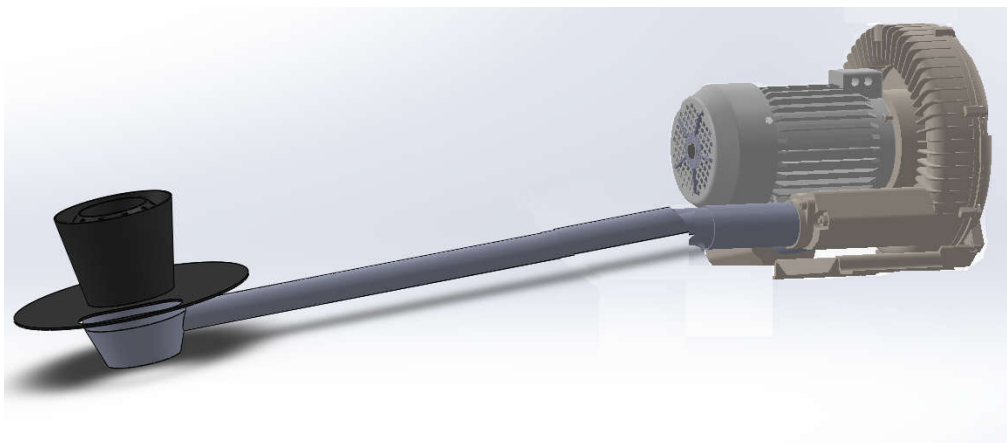


Figure 4.2: Système d'alimentation en air.

3.3 Echangeur de chaleur:

L'échangeur de chaleur va permettre d'assurer le transfert de chaleur des gaz de combustion vers le fluide caloporteur (eau). Plusieurs types d'échangeurs de chaleur existent, ils sont classifiés selon la configuration de l'écoulement et selon leur type de construction. L'échangeur choisi pour ce projet est un échangeur à tubes serpentin. Il est constitué de 16 révolutions, d'une hauteur de 500 mm et d'un diamètre des tubes de 15 mm.



Figure 4.3: Echangeur de chaleur.

3.4 Grille et cendrier:

C'est la partie qui détermine le type de chaudière à biomasse. Il y a plusieurs types en partant du four à grille jusqu' au carburant pulvérisé. Les types de fours complexes ne sont rentables que pour des chaudières d'une grande échelle. Pour y remédier nous allons choisir le type le plus simple à savoir: le four à grille fixe.

Ce type de four est constitué d'une grille placée au-dessus d'un cendrier pour évacuer les cendres. La figure 4.4 montre le cendrier et la grille.

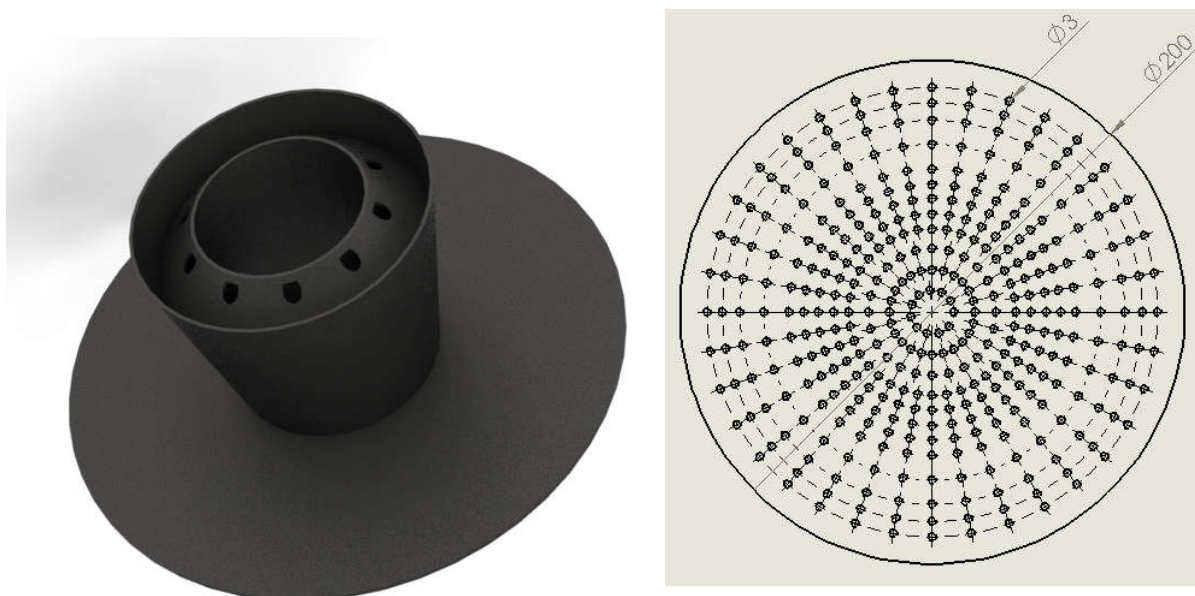


Figure 4.4: a) Cendrier. b) Grille.

3.5 Système d'isolation du corps de combustion :

La chambre de combustion est constituée d'un cylindre abritant l'échangeur de chaleur, et le cache inférieur comme illustré sur la figure 4.5. C'est le corps le plus exposé à la chaleur.

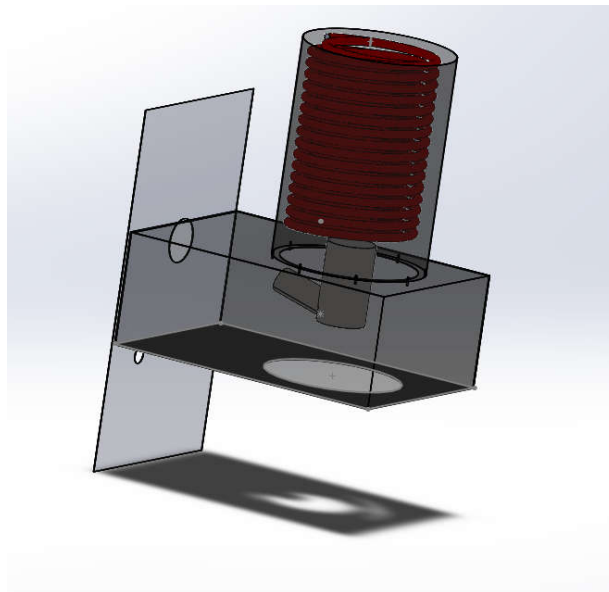


Figure 4.5: Chambre de combustion.

Le choix du matériau est primordial pour réduire les pertes de chaleur. Vu que cette partie est récupérée d'une chaudière usagée, ses caractéristiques sont connues. En ajoutant une couche de laine de verre.

Caractéristiques de la laine de verre :

- $k = [0.03, 0.04]$ (W/m.k)
- Résiste à une chaleur de plus de 600°C.

4 Dimensionnement thermique de la chaudière:

4.1 Evaluation des caractéristiques de la chaudière

Nous désirons dimensionner la chaudière, c'est-à-dire déterminer la surface d'échange nécessaire à la réalisation du besoin en fluide caloporteur fixé, désigner la taille du brûleur et du ventilateur et décider des systèmes de régulation et de sécurité. Dans notre cas les dimensions sont fixées par la géométrie, ce qui nous contraint à un dimensionnement des variables de fonctionnements: le débit du combustible, le débit d'air et la puissance calorifique..

On a besoin pour cela des données minimales suivantes:

- Débit d'eau
- Température d'entrée et de sortie de l'eau
- Le pouvoir calorifique du combustible utilisé

On doit ensuite rechercher les chaleurs massiques de l'eau à la température d'entrée et de sortie.

4.1.1 Puissance thermique de chauffage

La puissance calorifique nécessaire au chauffage de l'eau peut être écrite sous la forme suivante :

$$Q_{cal} = m_e c_p (T_s - T_e)$$

4.1.2 Débits du combustible et d'air:

4.1.2.1 Débits du combustible:

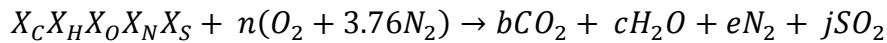
Pour calculer le débit de combustible, il faut tenir compte de la puissance calorifique nécessaire au chauffage de l'eau aux conditions désirées en ne prenant pas en compte les différentes pertes calorifiques comme les pertes par la cheminée, les pertes de la carcasse et le rendement de la combustion dont on n'a pas les données pour les quantifier.

Le débit de combustible est calculé comme suit :

$$m_{cmb} = \frac{Q_{cal}}{PCI}$$

4.1.2.2 Débits d'air:

4.1.2.2.1 Equation de la réaction de combustion du grignon d'olive:



Avec X_x : la fraction molaire de l'élément X dans le grignon d'olive donné dans le chapitre 1.

Remarque:

On suppose une combustion complète et on néglige les effets de dissociations à haute température.

$$\begin{array}{l}
 X_C = b \\
 c = \frac{X_H}{2} \\
 X_O + 2n = 2b + c + 2j \rightarrow n = b + \frac{c}{2} + j + \frac{X_O}{2} \\
 X_N + 2 \cdot 3.76 \cdot n = 2e \quad e = \frac{X_N}{2} + 3.76 \cdot n \\
 X_S = j \quad j = X_S
 \end{array}$$

Chapitre 4

Ce qui nous donne comme résultat:

$$\begin{aligned}b &= 0,32 \\c &= 0.25 \\n &= 0,52 \\e &= 1.9 \\j &= 0.0002\end{aligned}$$

Pour une combustion stœchiométrique le débit d'air est donné par:

$$m_{air} = n (32 + 14 \cdot 2 \cdot 3.76) m_{cmb} = 7,265 m_{cmb}$$

Ci-dessous un tableau récapitulatif des caractéristiques de la chaudière:

Température d'eau à l'entrée	$T_e = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Température d'eau à la sortie	$T_s = 80 \text{ }^\circ\text{C}$
Débit d'eau	$m_e = 0.1 \text{ kg/s}$
Pouvoir calorifique inférieur	$PCI = 12 \text{ MJ}$
Puissance calorifique	$Q_{cal} = 25087.2 \text{ W}$
Débit de combustible	$m_{cmb} = 2.034 \text{ g/s}$
Débit d'air théorique	$m_{air} = 14.766 \text{ g/s}$

La chaudière réalisée a une puissance de 25 kW, le volume de la chambre de combustion nous contraint à de petits débits de combustible et donc à des puissances très faibles.

5 Modélisation d'une chaudière à biomasse avec ANSYS FLUENT 15:

5.1 Procédure:

- Créer un nouveau projet Mécanique des fluides (Fluent) dans WorkBench.
- Importer la géométrie à partir du logiciel CAO utilisé (SOLIDWORKS).
- Générer un maillage à l'aide de l'outil Meshing.
- Cliquer sur Editier dans la partie configuration du projet.

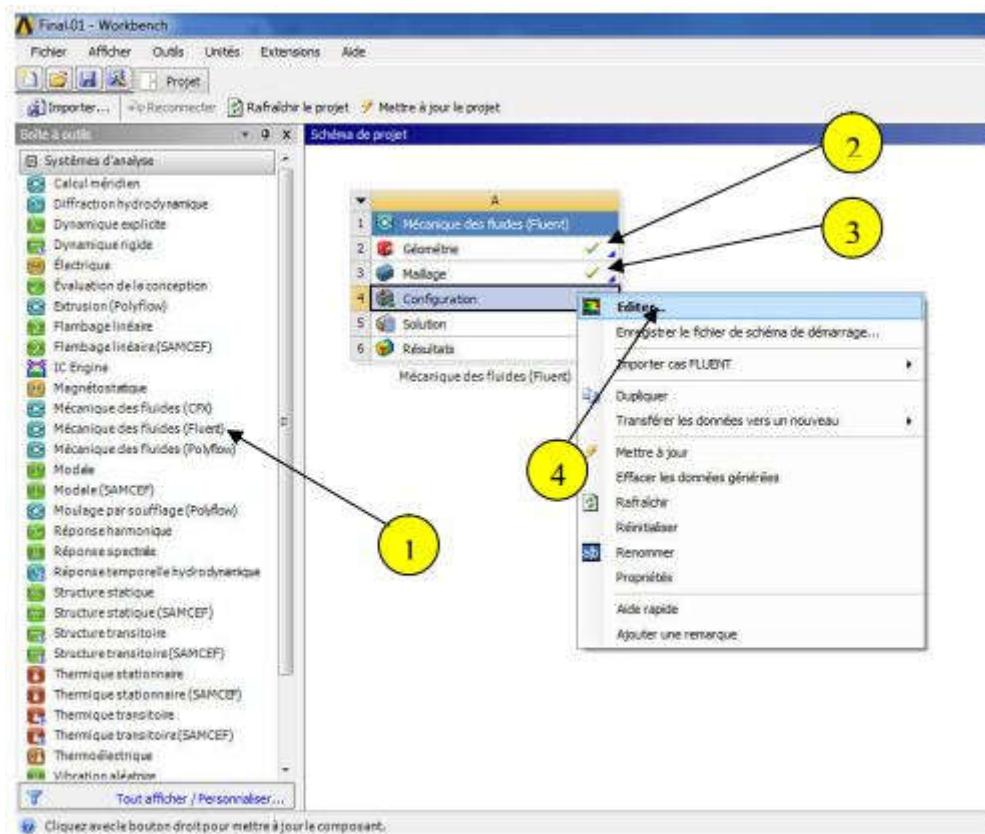


Figure 4.6: Fenêtre Principale de projet (ANSYS WORKBENCH).

Dans le menu **General** de la fenêtre principale de ANSYS FLUENT :

- Dans la partie **Solver** s'assurer que les choix suivants ont été cochés:
Type: **Pressure-Based** , Velocity Formulation: **Absolute** et Time: **Steady**.
- Dans la partie **Gravity** on choisit l'accélération de gravité selon un axe suivant le modèle géométrique adopté.
- Cliquer sur **Units** pour définir les unités à utiliser (si , cgs, british).

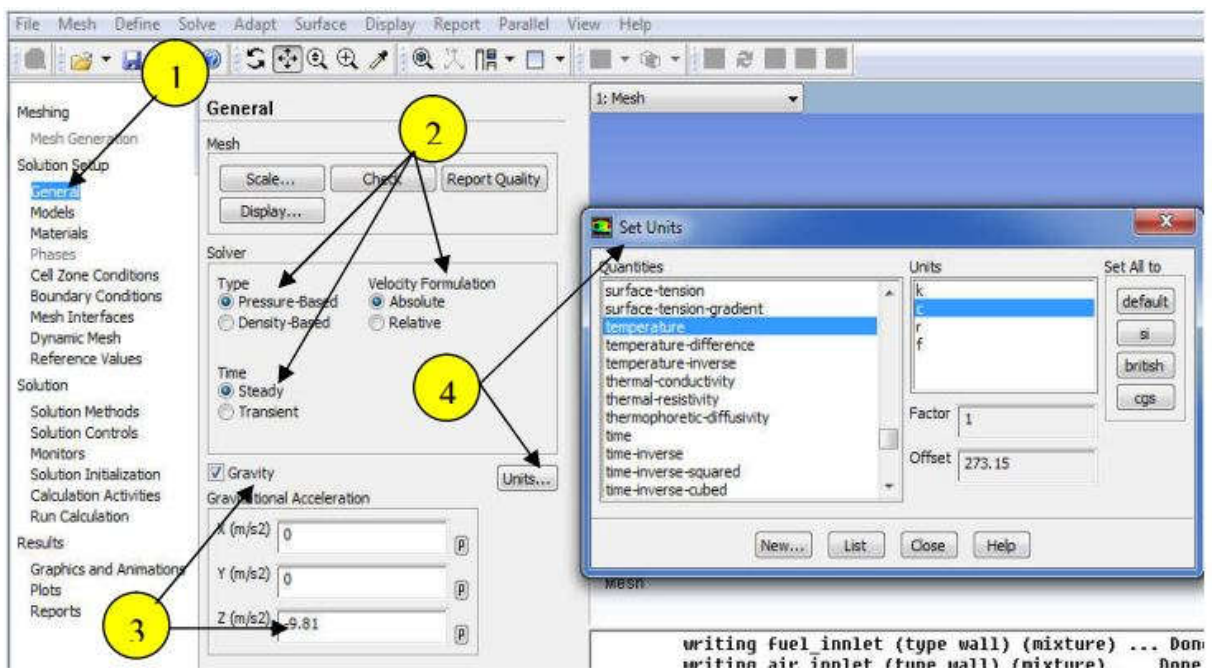


Figure 4.7: Fenêtre principale de ANSYS FLUENT.

Dans le menu **Models** de la fenêtre principale de ANSYS FLUENT :

- Activer le modèle **Energy**.
- Dans **Viscous** choisir le modèle **k-epsilon standard, Standard Wall function**.
- Dans **Radiation** choisir le modèle **P1**.
- Dans **Species** choisir le modèle **Non-Premixed Combustion**.
- Activer le modèle **Discret Phase**.

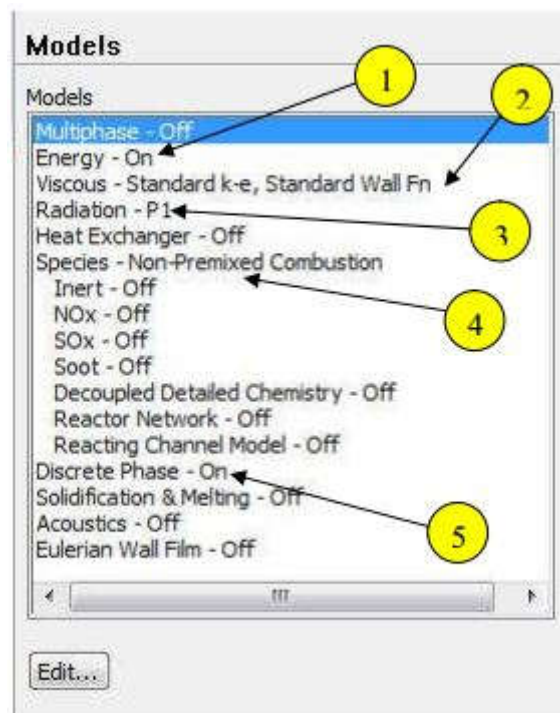


Figure 4.8: Menu **Models** Dans ANSYS FLUENT

Dans la partie **Species** et **Non-Premixed Combustion**:

- Assurez-vous que les choix suivants sont cochés : Dans *State Relation*: **Chemical Equilibrium**, *Energy Treatment*: **Non-Adiabatic**.
- Cliquer sur **Coal Calculator** et définir la composition chimique de la biomasse.
- Dans la sous partie *Table*, choisir dans *PDF Options* **Inlet diffusion** et **beta** dans *Probability Density Function*.
- Finalement cliquer sur **Calculate PDF Table**.

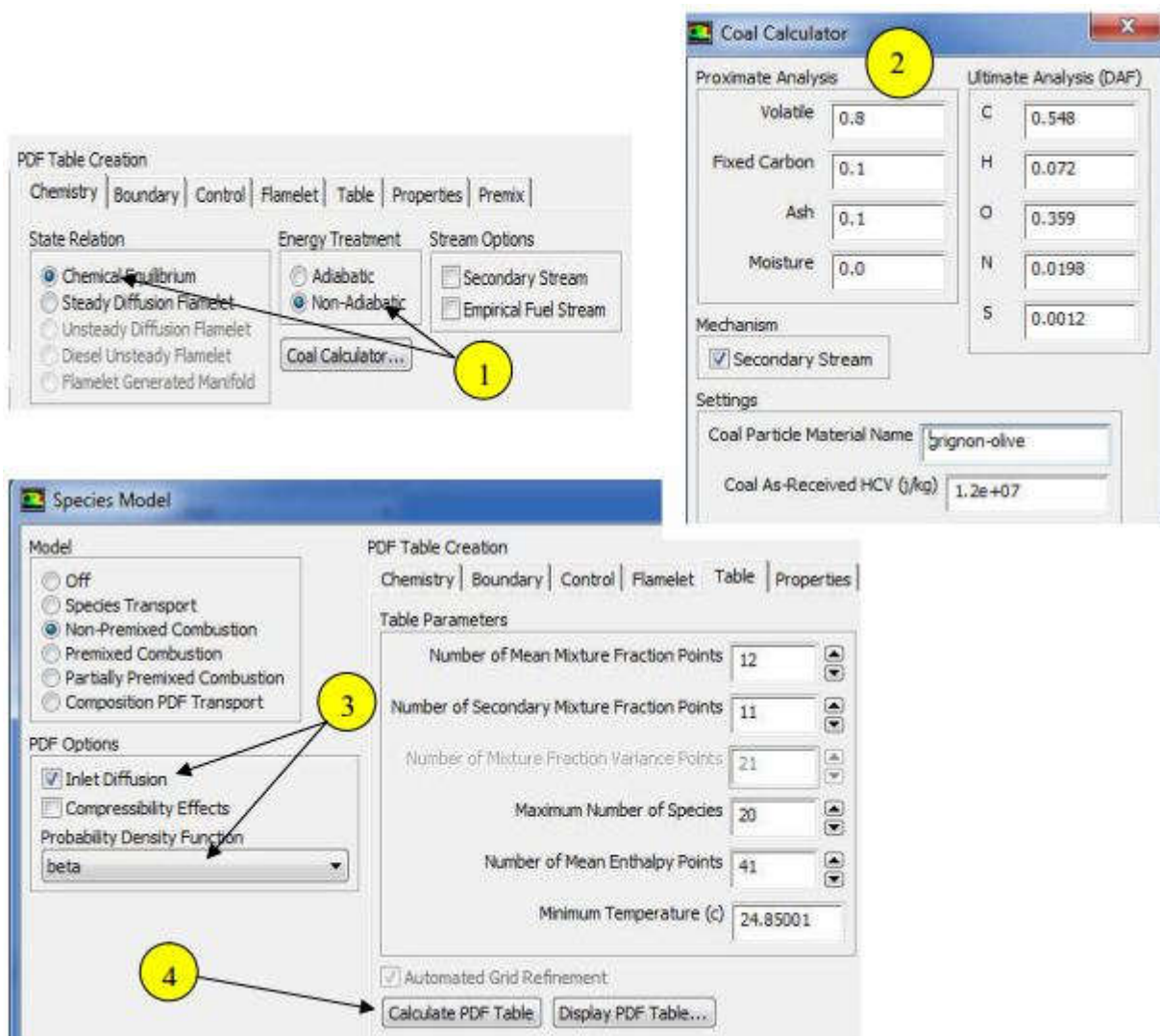


Figure 4.9: Fenêtres du modèle **Non-Premixed Combustion**.

Dans la partie **Discret Phase**:

- Cliquer sur *Injections*, choisir dans *Injection Type*: **surface**, *Release from surfaces*: **fuel-Innlet**, *Particle Type*: **Combusting**, *Material*: **grignon d'olive**, *Devolatilizing Stream* : **Secondary** et *Char Stream*: **Primary**.
- Dans *Physical Models* choisir **Particle Radiation Interaction** et **Pressure gradient Force**.
- Dans *Drag Parameters* choisir **Spherical**.

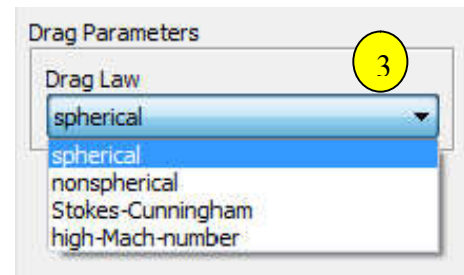
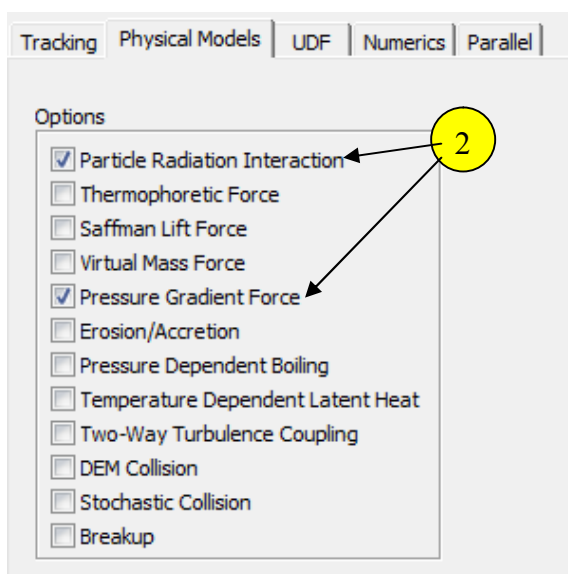
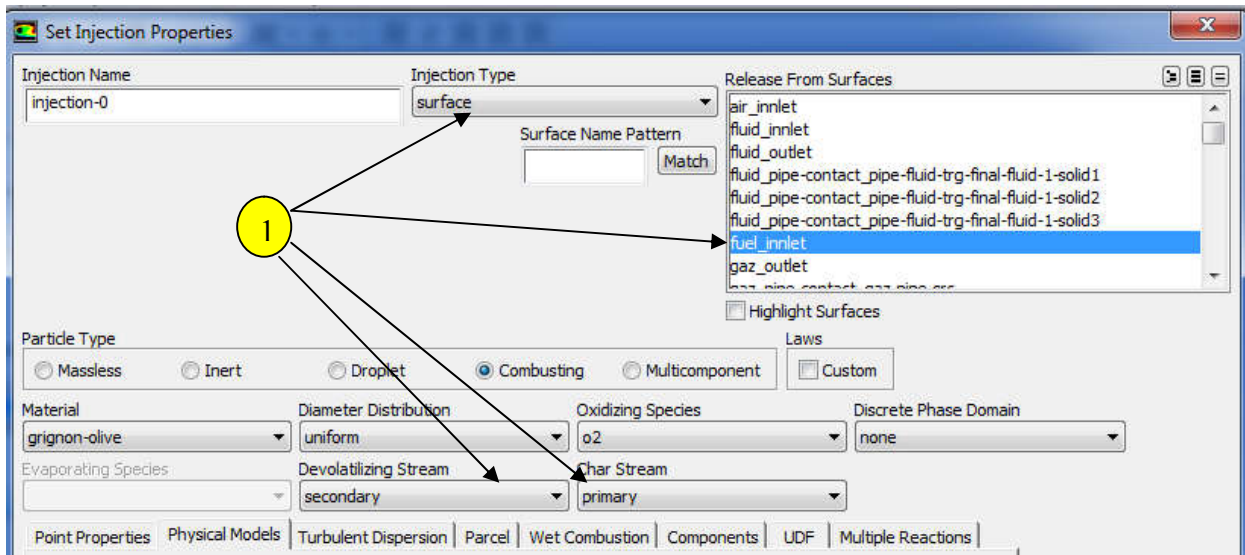
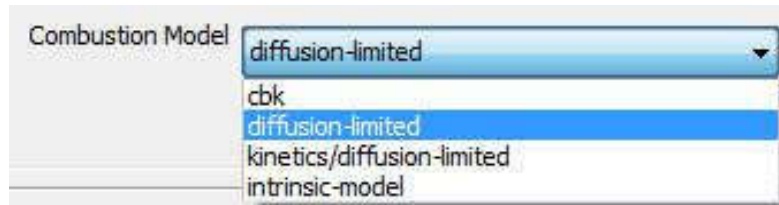


Figure 4.10: Fenêtres du modèle **Discrete Phase**.

Dans le menu *Materials*:

- Dans la partie *Combusting Particle*: **grignon-olive** , choisir dans *Combustion Model*: **diffusion-limited**.



*Figure 4.11: Fenêtre Properties du menu **Materials**.*

Dans le menu *Boundary Conditions*:

- Définir les conditions aux limites du problème à résoudre, ces conditions sont résumées dans le tableau ci-dessous:

Zone	Type	Valeurs
Fuel Inlet	Mass Flow Inlet	Mass Flow Rate: 0.002 Kg/s Direction Specification Mode: Normal to Boundary Total Temperature: 300 K Mean Mixture Fraction: 1
Air Inlet	Mass Flow Inlet	Mass Flow Rate: 0.01476 Kg/s Direction Specification Mode: Normal to Boundary Total Temperature: 300 K Mean Mixture Fraction: 0
Fluid Inlet	Mass Flow Inlet	Mass Flow Rate: 0.1 Kg/s Direction Specification Mode: Normal to Boundary Total Temperature: 300 K Mean Mixture Fraction: 0
Side Wall	Wall	Temperature: 300 K Wall Thickness: 0.005 m Heat Generation Rate: 0 w/m ³ Material Name: Steel
Gaz Outlet	Pressure Outlet	
Fluid Outlet	Pressure Outlet	

Dans le menu **Solution Initialization - Standard Initialization**:

- Choisir *Compute from*: Air-Inlet et cliquer sur **Initialize**.

Dans le menu **Run Calculation**:

- Choisir 500 dans *Number of Iterations* et cliquer sur **Calculate**.

5.2 Résultats et interprétations:

ANSYS Fluent nous permet de récupérer les résultats des simulations soit sous forme d'un fichier Excel soit sous forme graphique, comme la géométrie est complexe le fichier Excel est inutilisable pour interpréter convenablement ces résultats.

Pour récupérer les résultats sous forme graphique on lance dans WORKBENCH le module CFD-POST.

La figure ci-dessous montre la distribution de température dans la chambre de combustion, on remarque que le système d'injection de biomasse utilisé engendre une distribution non homogène de la température.

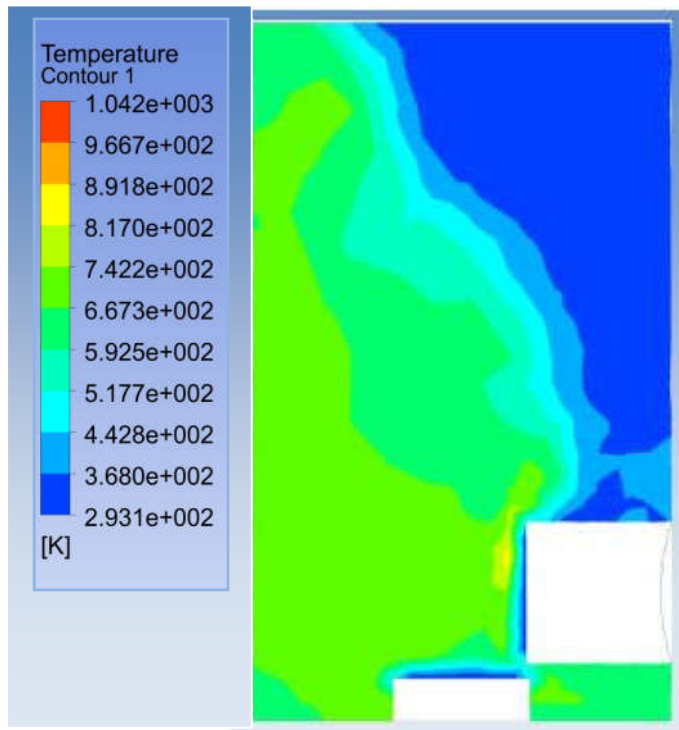


Figure 4.12: Distribution de température sur un plan médian.

La figure 4.13 illustre la distribution de température dans la chaudière, le module CFD-POST indique plusieurs informations qui sont résumées dans le tableau ci-dessous.

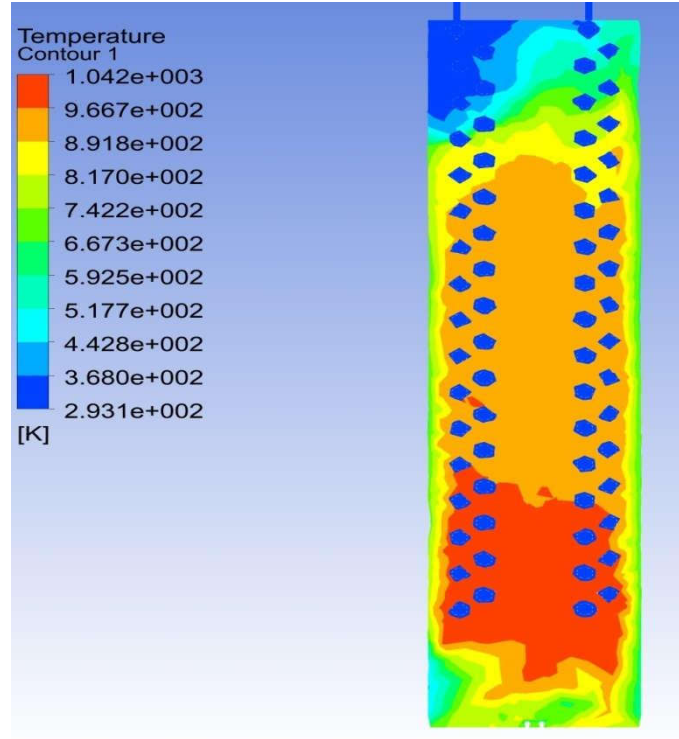


Figure 4.13: Distribution de température dans la chambre de combustion .

Type	Valeurs
Température maximale	1042K (769 °C)
Température de sortie de l'eau	324K (51 °C)
Température de sortie des gaz	380K (107 °C)

La surface d'échange fournie par le serpentin n'est pas suffisante pour atteindre la température de conception (80°C).

La différence entre la température de conception et la température résultante de la simulation est due aux pertes calorifiques non prises en compte dans le calcul préliminaire du débit de combustible.

Les pertes calorifiques sont principalement les pertes par la cheminée (107 °C à la sortie de la cheminée), les pertes de la carcasse vers le milieu extérieur et le rendement de la combustion de biomasse inférieur à 100%.

Le rendement de la chaudière peut être défini comme:

$$\eta_c = \frac{Q_{Out}}{Q_{In}} = \frac{m_e(C_p\Delta T)_{Simulation}}{m_e(C_p\Delta T)_{Conception}} = \frac{(C_p\Delta T)_{Simulation}}{(C_p\Delta T)_{Conception}}$$

Ce qui nous donne un rendement pour la chaudière selon les résultats de la simulation de:

$$\eta_c = 0.5162 = 51.62 \%$$

Ce rendement n'inclut pas la consommation des auxiliaires (résistance, ventilateur et moteur).

Dans cette simulation on a omis de mentionner la distribution de pression et de vitesse, car la combustion de biomasse n'engendre pas de grandes pressions. La vitesse des écoulements est tout aussi petite à cause de la taille de la chaudière réalisée dans ce travail.

Parmi les pistes à suivre pour augmenter le rendement c'est :

- D'utiliser les gaz d'échappements pour préchauffer l'air d'entrée ce qui permet d'augmenter le rendement de combustion et ainsi celui de la chaudière.
- D'utiliser un système d'alimentation de biomasse de type *Underfeed stokers* (alimentation par le dessous) ce qui se répercute sur l'homogénéité de la distribution de température.
- D'ajouter des obstacles dans le serpentin pour guider les gaz de combustion, ce qui permet un meilleur échange de chaleur.

6 Conclusion générale:

Ce projet de fin d'étude est une première tentative d'aborder la technologie des chaudières à biomasse. Le prototype réalisé n'est aucunement un produit fini ou compétitif, c'est un modèle de base qui peut servir pour de futures améliorations et optimisations.

Aujourd'hui, le faible coût des énergies fossiles et le coût élevé de production des chaudières à biomasse ne permettent pas à celles-ci d'être compétitives, mais elles peuvent aussi être l'objet d'une législation favorable pour un produit qui s'inscrit dans le développement durable.

La théorie qui décrit les phénomènes dans la chaudière à biomasse est très complexe, c'est pour cela que les ingénieurs ont recours aux CFD pour résoudre les problèmes liés à la dynamique des fluides, échange de chaleur, combustion et écoulement multiphasique.

Nous avons utilisé le logiciel Ansys Fluent pour résoudre le problème. Il offre une large panoplie d'outils pour faciliter la lecture des résultats et met à disposition aussi un help très riche qui permet une prise en main rapide.

Ce travail nous a introduit en tant que futurs ingénieurs dans un domaine des énergies renouvelables très peu plébiscité qui est la conversion de l'énergie de biomasse. Cette piste énergétique n'est pas suivie dans notre pays, ce qui laisse un champ libre pour nos ingénieurs d'entreprendre des projets de valorisation de la biomasse qui est présente sous plusieurs formes dans notre pays.

L'étude nous a donné l'occasion d'appliquer nos connaissances dans le domaine de l'énergétique, connaissances qu'il a fallu approfondir pour procéder à des modélisations de la chaudière afin de comprendre les mécanismes d'interaction qui s'y déroulent. Nous avons pu constater qu'une réalisation d'un simple prototype était un défi logistique et humain qu'on ne pouvait pas rencontrer dans les travaux théoriques.

Ce travail nous a permis également de comprendre que si la pratique industrielle est nécessaire à l'ingénieur pour l'acquisition de l'expérience, c'est la maîtrise des connaissances théoriques qui nous rend les choses plus claires et compréhensibles.

Enfin, le prototype que nous avons réalisé ouvre une nouvelle perspective énergétique. Celle-ci peut être suivie par des projets d'optimisation de la chaudière réalisée. Nous recommandons des améliorations dans le système d'alimentation en biomasse ainsi que dans les systèmes de régulations.

Bibliographie

Bibliographie:

- [1]: **Sumer B. Dirbude**: Biomass Technology. An Experimental Analysis, Biomass & Bioenergy, Vol. 21, pp. 61-72, 2001
- [2]: **Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie** Les émissions atmosphériques de la combustion de biomasse. 2007
- [3]: **International Energy Agency**: Energy statistics for 2014.
- [4]: **Amadou Mamadou** : PFE Département Génie Mécanique; Etude d'un chauffage domestique utilisant comme combustible le grignon d'olive. 2001
- [5]: **H. EL Hajouji** : Evolution des caractéristiques physico-chimiques, spectroscopiques et écotoxicologiques des effluents d'huileries d'olive au cours de traitements biologique et chimique. Thèse de doctorat , INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE 2007.
- [6]: **Institute of Chemical Engineering, Fuel and Environmental Technology**; The **BIOBIB** database for biomass fuels.
- [7]: **Vladimir Strezov Tim J. Evans**: Biomass Processing Technologies CRC Press Book 2014.
- [8]: **Norbert Peters** : Combustion Theory. Combustion lectures Princeton 2010.
- [9]: **Samy Sadaka, Donald M. Johnson**: Biomass Combustion. University of Arkansas Division of Agriculture 2007.
- [10]: **Sjaak van Loo and Jaap Koppeja**: The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing.
- [11]: **Thomas Nussbaumer**: Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. 2003
- [12]: **T. Stocker** : Introduction to climate Modeling, *University of Bern*. 2014
- [13]: **André Bakker**: Applied Computational Fluid Dynamics. Dartmouth College 2006.
- [14]: **Cindy Merlin**: Simulation numérique de la combustion turbulente : Méthode de frontières immergées pour les écoulements compressibles, application à la combustion en aval d'une cavité. Thèse de doctorat INSA de Rouen, 2011.
- [15]: **Rudolf Žitný**: Combustion, multiphase flows. CTU PRAGUE Faculty of mechanical engineering. 2014

Bibliographie

[16]: **ANSYS Fluent Theory guide.**

[17]: **Abdelbaki Mameri:** Etude numérique de la combustion turbulente du pré mélange pauvre méthane/air enrichi a l'hydrogène. Thèses de doctorat Université d'Orléans, 2009

[18]: **S. A. Morsi and A. J. Alexander:** An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems. *Flow Systems. J. Fluid Mech.* 55(2). 193–208. 1972

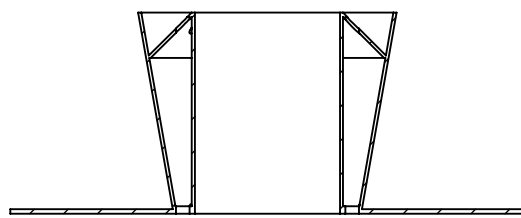
[19]: **A. Haider and O. Levenspiel:** Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles. *Powder Technology.* 58. 63–70. 1989

[20]: **AntónioBiscaia da Silva:** Review of devolatilisation models and their application to pulverised fuel combustion simulation. Mechanical Engineering Department, Instituto Superior Técnico,

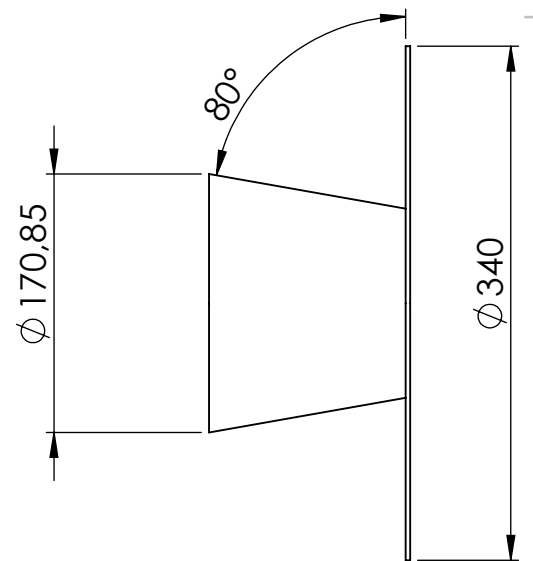
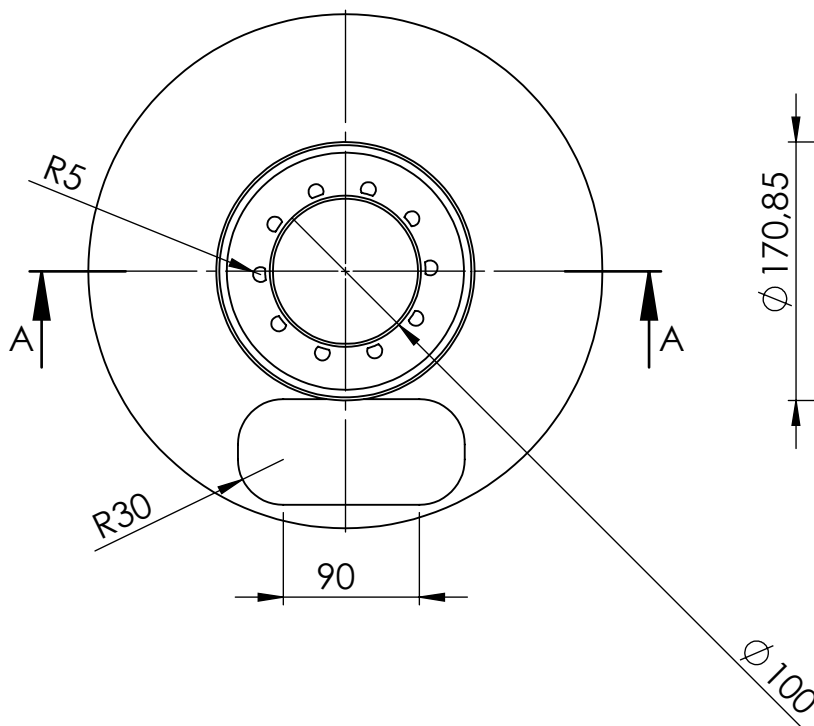
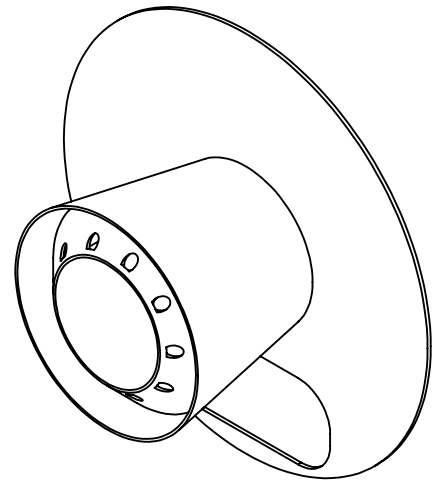
[21]: **H. Kobayashi, J. B. Howard, and A. F. Sarofim:** Coal Devolatilization at High Temperatures. *In 16th Symp on Combustion.* The Combustion Institute. 1976.

Annexe

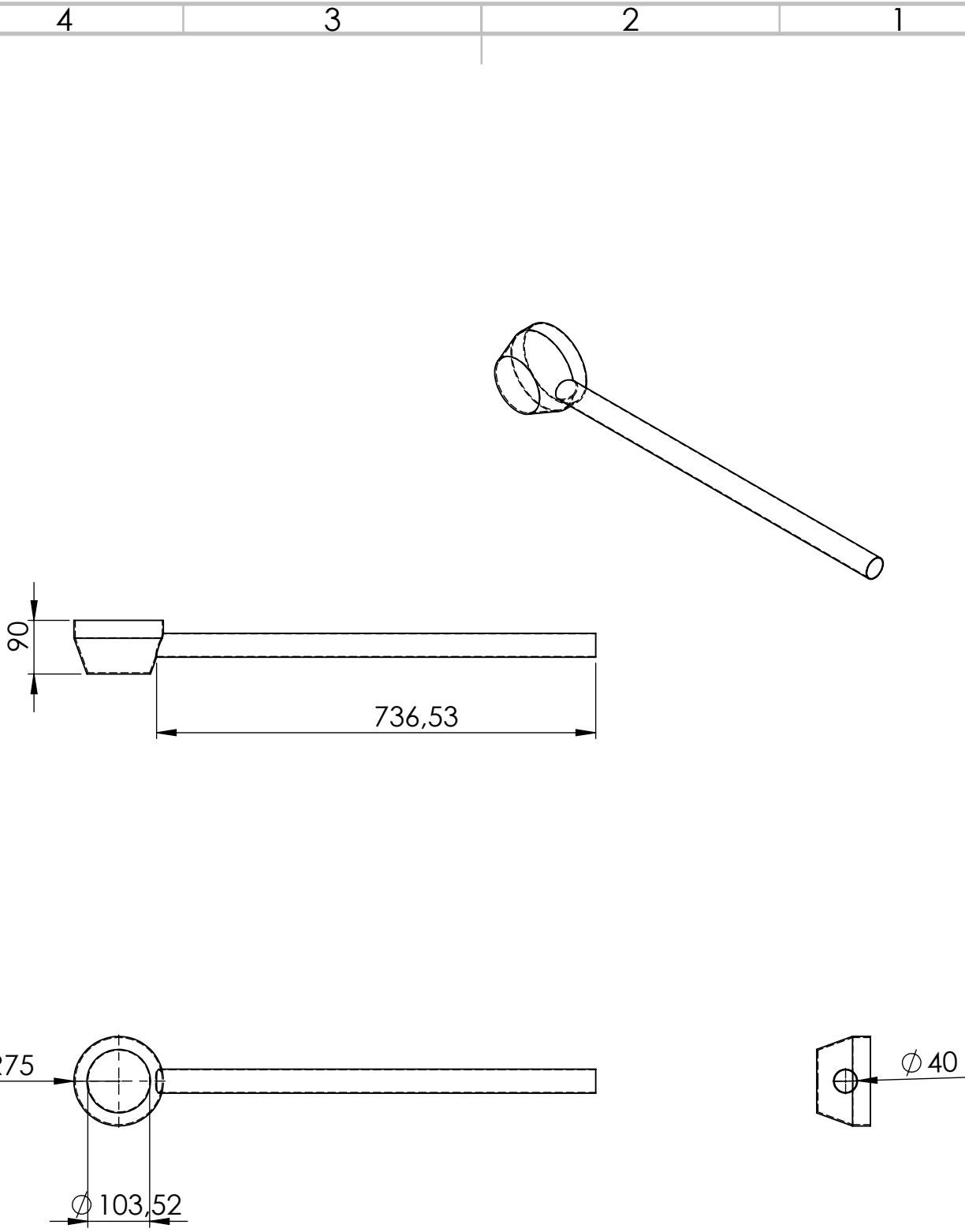
Annexe A



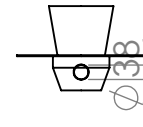
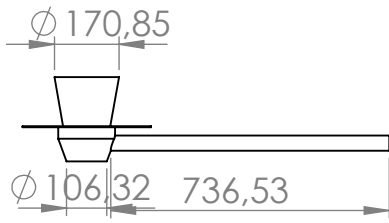
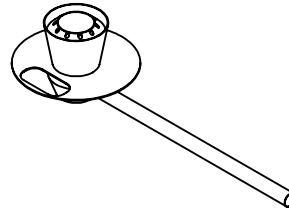
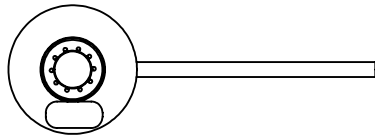
COUPE A-A



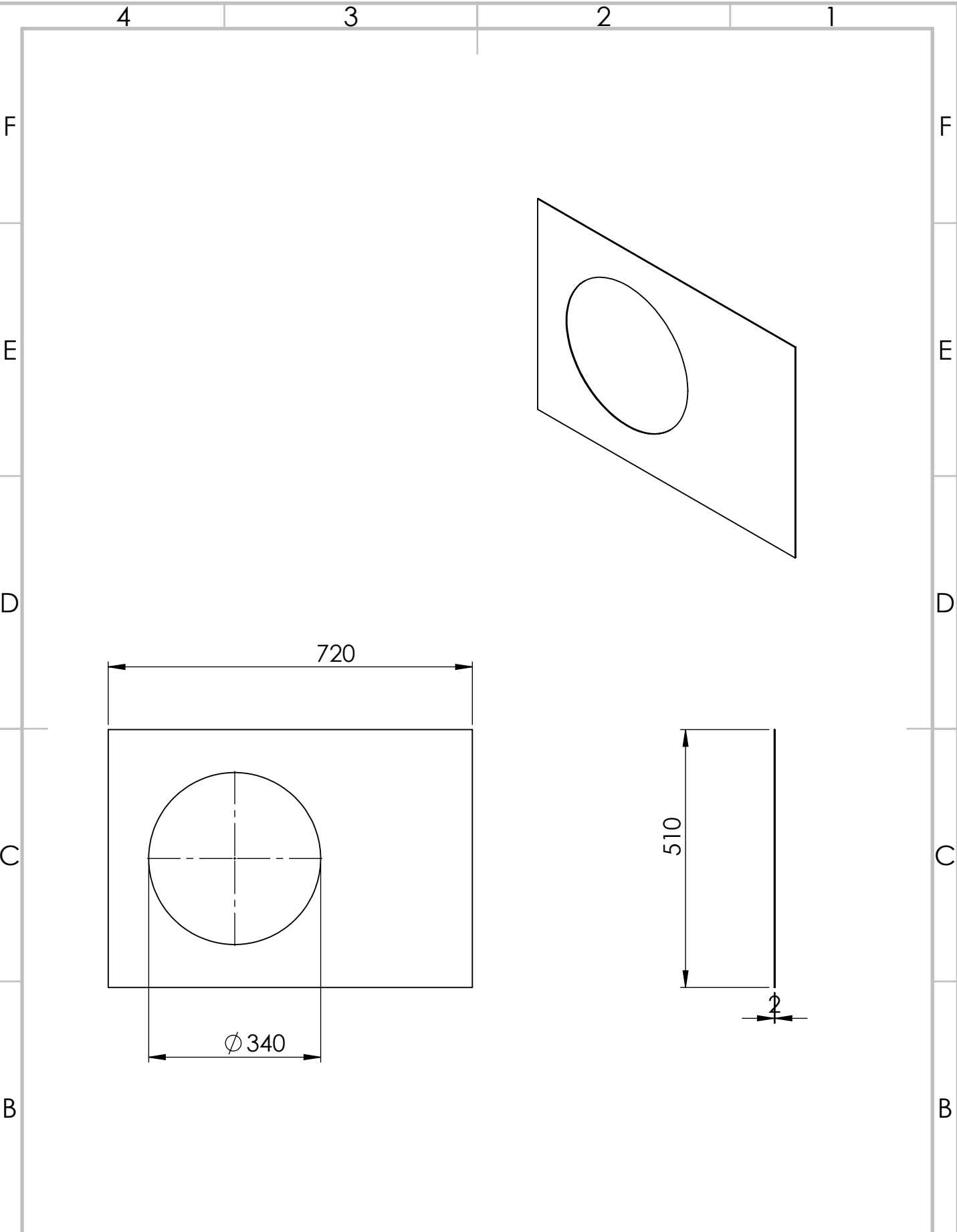
AUTEUR		NOM	PRENOM	DATE	TITRE:		
A	LEBBAL	Smail	13	06 17	Cendrier		
	SIHALI	Imad				Materieau : Fonte	A4
					ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1	



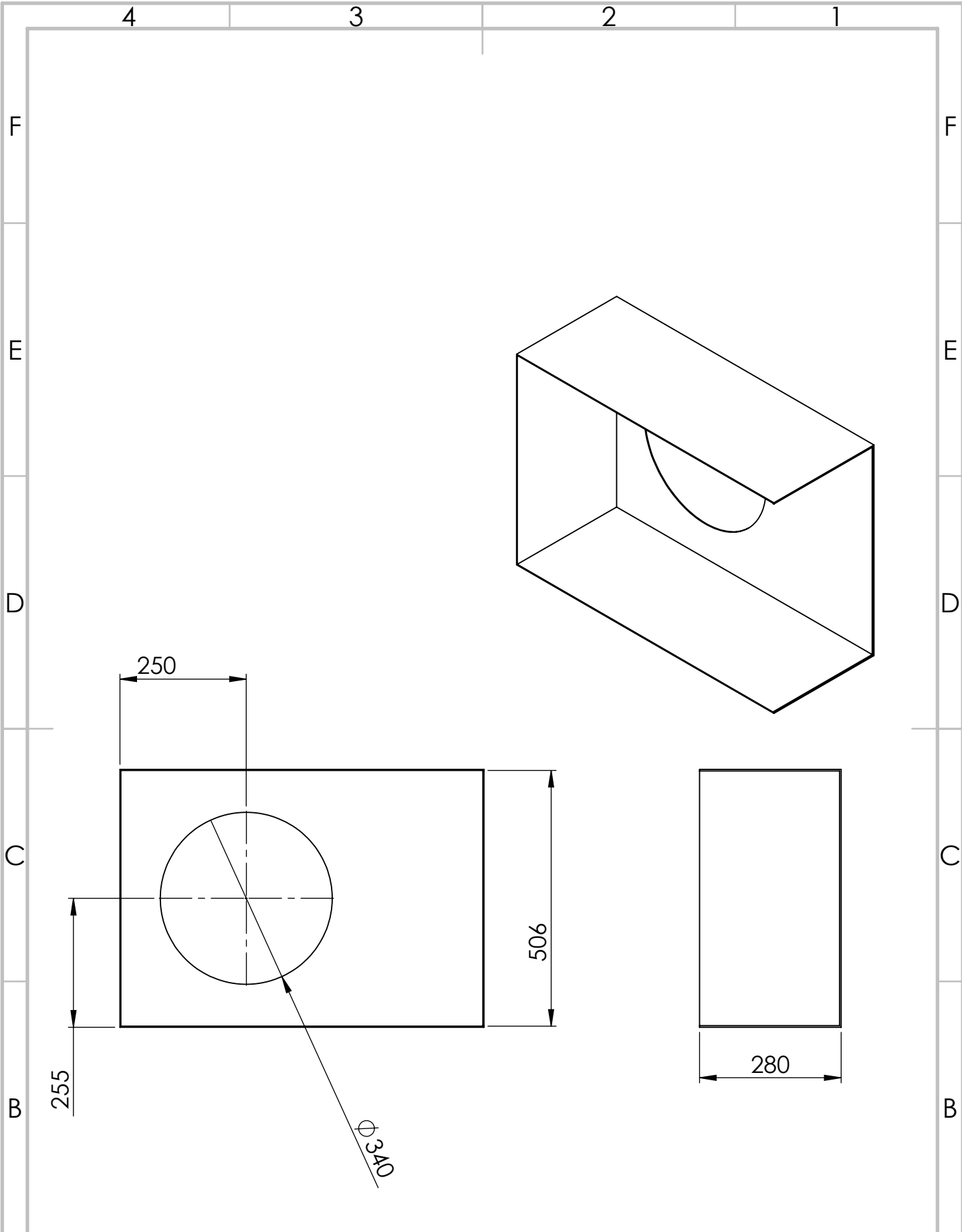
	NOM	PRENOM	DATE	TITRE:		
A	LEBBAL	Smail	13 06 17	Conduite du Diffuseur		
	SIHALI	Imad				
				Materieau	Materieau : Acier Inoxydable	A4
				ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 SUR 1	



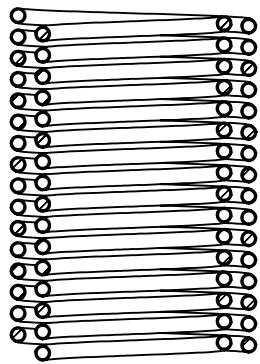
	NOM	PRENOM	DATE	TITRE:
A	LEBBAL	Smail	13 06 17	Sous Assemblage diffuseur
	SIHALI	Imad		
				No. DE PLAN
				ECHELLE:1:20
				FEUILLE 1 SUR 1



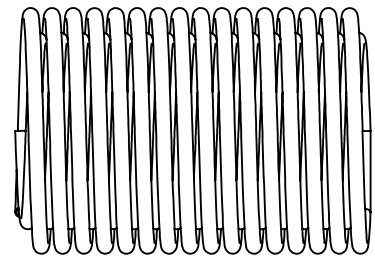
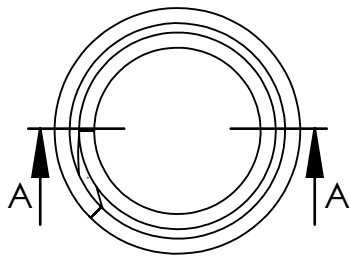
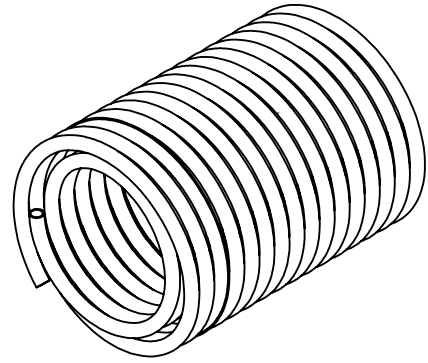
		NOM	PRENOM	DATE	TITRE:		
A	AUTEUR	LEBBAL	Smail	13	Tôle chambre de combustion		
		SIHALI	Imad	06 17			
		Materieau		Materieau : Fonte		A4	
		ECHELLE:1:10		FEUILLE 1 SUR 1			
4		3		2		1	122



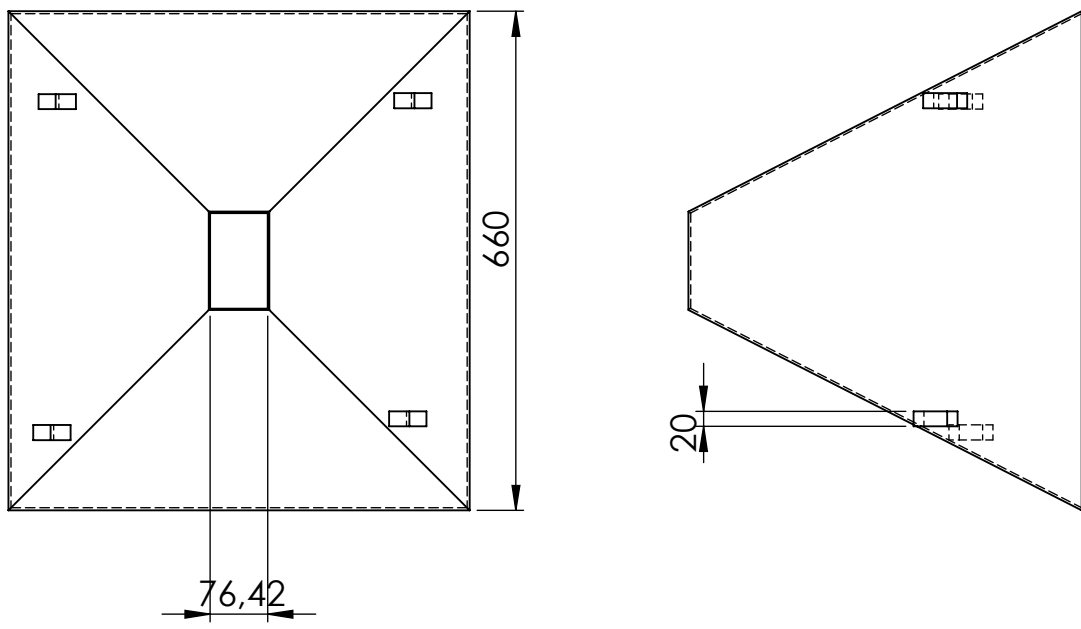
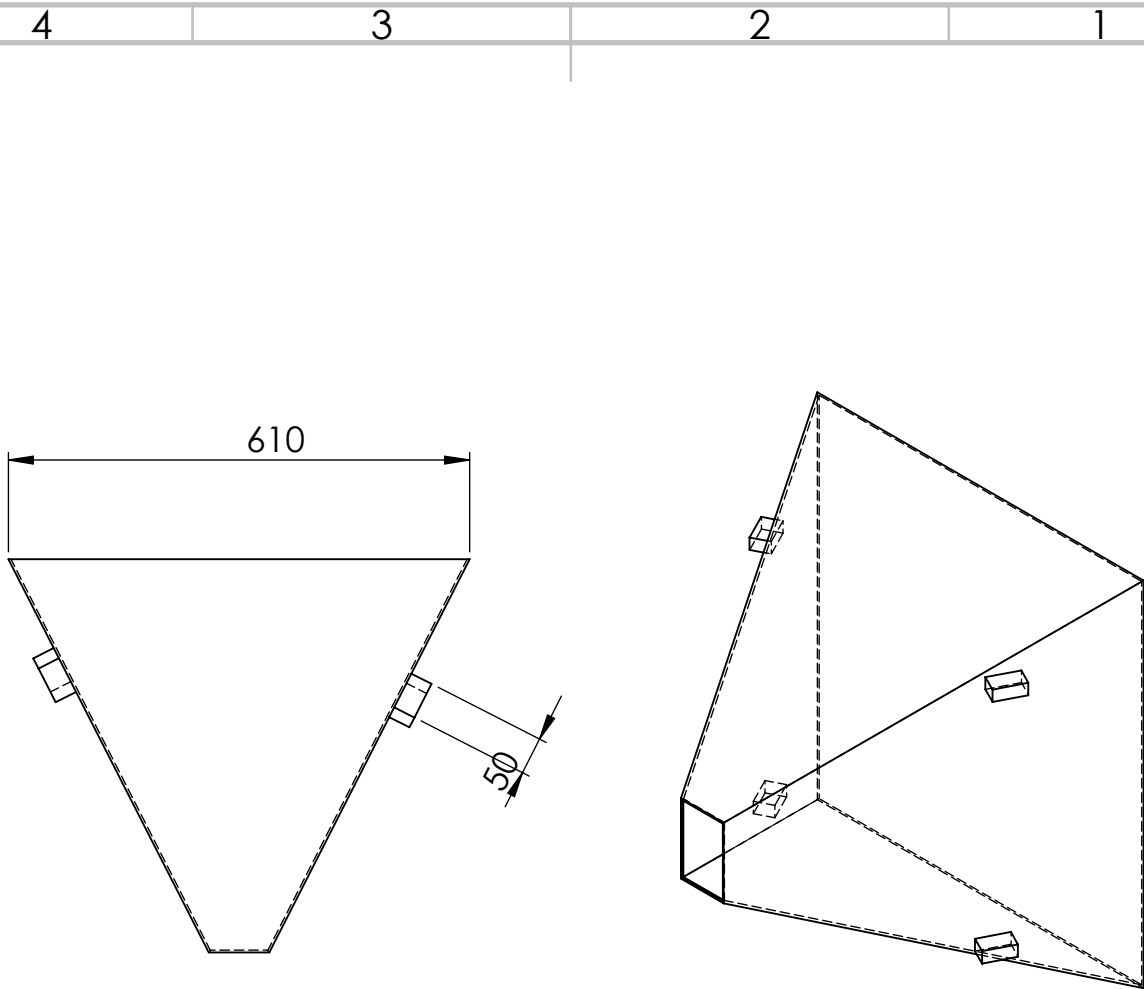
	NOM	PRENOM	DATE		
A	LEBBAL	Smail	13 06 17	Tôle chambre de combustion	
	SIHALI	Imad			
				Materieau : Fonte	A4
				ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 SUR 1
	4	3	2	1	123



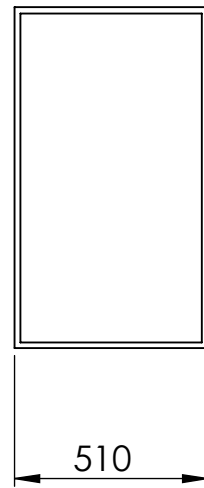
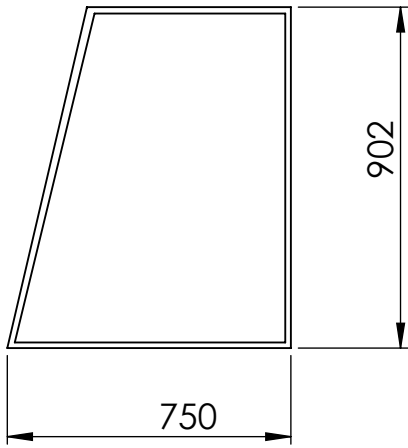
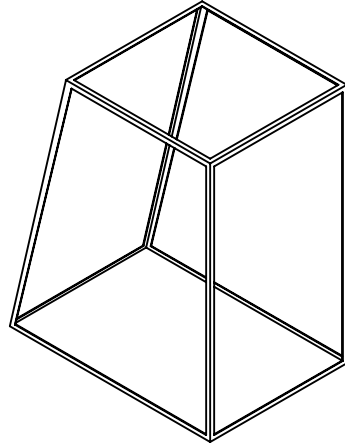
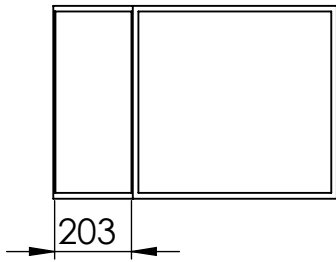
COUPE A-A



		NOM	PRENOM	DATE	TITRE:
A	AUTEUR	LEBBAL	Smail	13 06	Echangeur serpentin
		SIHALI	Imad	17	
					A4
					ECHELLE:1:10
					FEUILLE 1 SUR 1



		NOM	PRENOM	DATE	TITRE:		
A	AUTEUR	LEBBAL	Smail	13	Bac de stockage		
		SIHALI	Imad	06 17			
		Materieau		Materieau : Acier Moulé		A4	
		ECHELLE:1:10		FEUILLE 1 SUR 1			
4	3	2	1	125			



	NOM	PRENOM	DATE	TITRE:			
A	LEBBAL	Smail	13 06 17	Ensature			
	SIHALI	Imad				Materieau : Acier	A4
						ECHELLE:1:20	FEUILLE 1 SUR 1
	4	3	2	1	126		

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

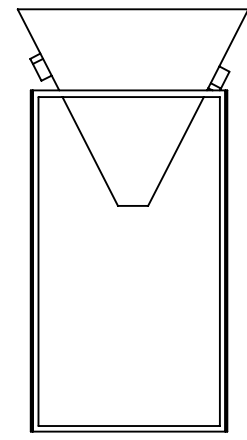
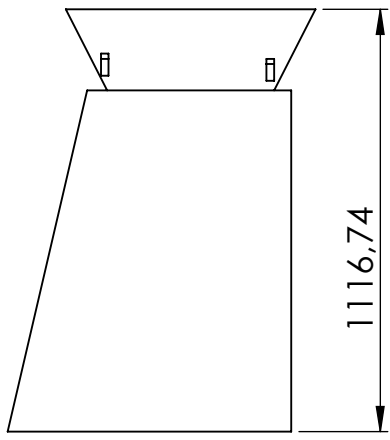
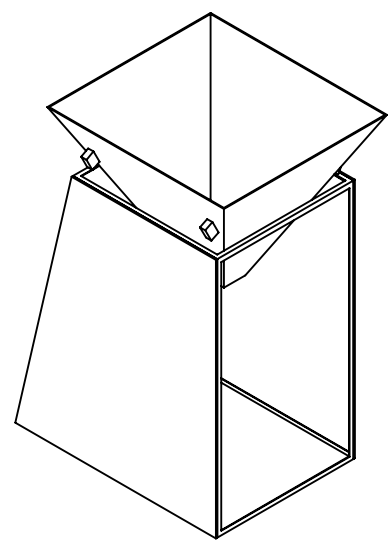
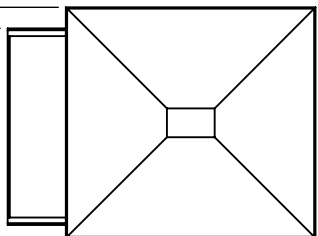
C

C

B

B

55,61



1116,74

A

A

	NOM	PRENOM	DATE	TITRE:
AUTEUR	LEBBAL	Smail	13 06 17	Systeme d'alimentation en comburant
	SIHALI	Imad		
				A4
				ECHELLE:1:20
				FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1 127

4 3 2 1

F

F

E

E

D

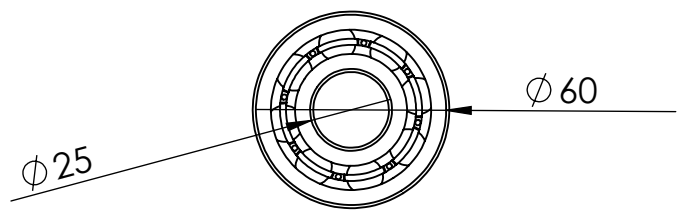
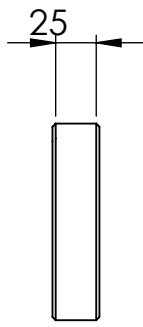
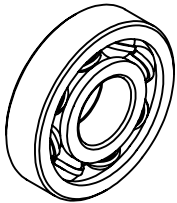
D

C

C

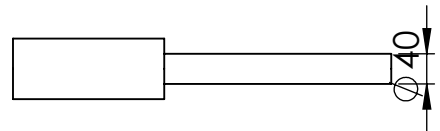
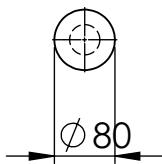
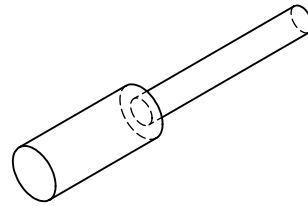
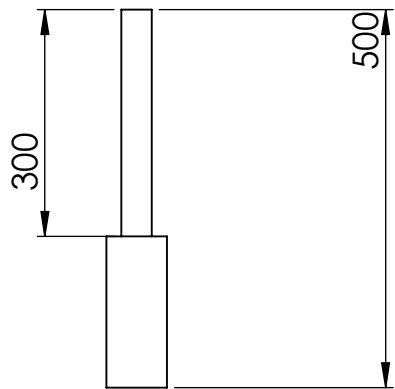
B

B



	NOM	PRENOM	DATE	TITRE:	
A	LEBBAL	Smail	13 06 17	Roulement visse sans fin	
	SIHALI	Imad			
	Materieau			A4	
			ECHELLE:1:5		FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1 128



AUTEUR		NOM	PRENOM	DATE	TITRE:		
A	LEBBAL	Smail	13	support visse sans fin			A4
	SIHALI	Imad	06 17				
	Materieau		Materieau : Acier			FEUILLE 1 SUR 1	
		ECHELLE:1:10					129

4 3 2 1

F

F

E

E

D

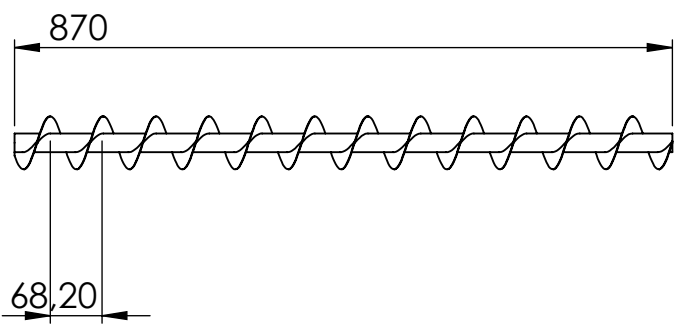
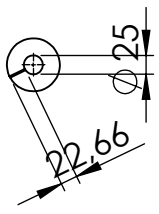
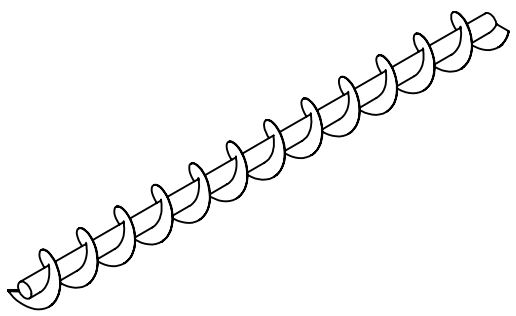
D

C

C

B

B

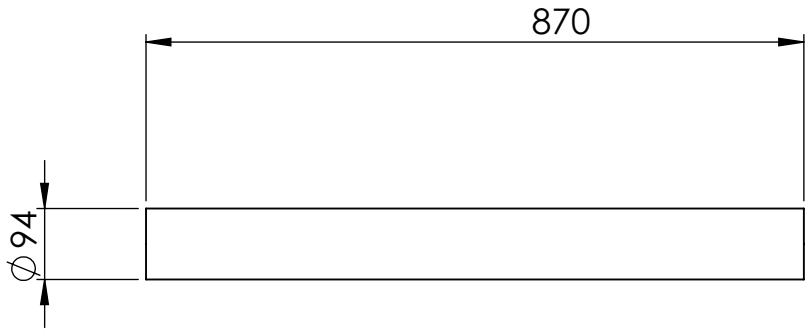
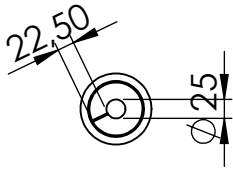
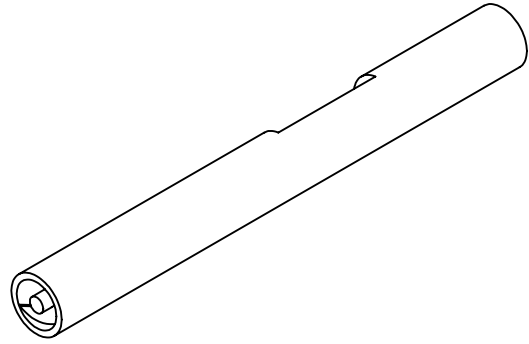
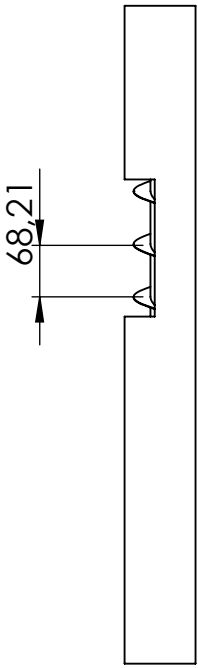


A

A

	NOM	PRENOM	DATE	TITRE:	
AUTEUR	LEBBAL	Smail	13 06 17	Visse sans fin	
	SIHALI	Imad			
				Materieau : acier inoxydable	A4
				ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1 130



	NOM	PRENOM	DATE	TITRE:
AUTEUR	LEBBAL	Smail	13 06 17	Visse sans fin
	SIHALI	Imad		
				No. DE PLAN
				A4
				ECHELLE:1:10
				FEUILLE 1 SUR 1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

A

A

4

3

2

1

131

4 3 2 1

F

F

E

E

D

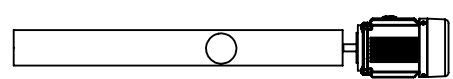
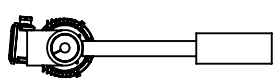
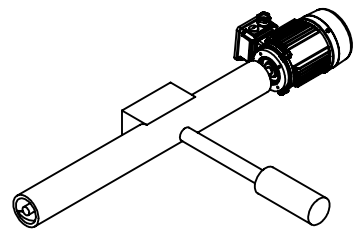
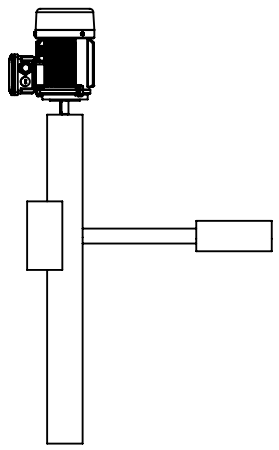
D

C

C

B

B

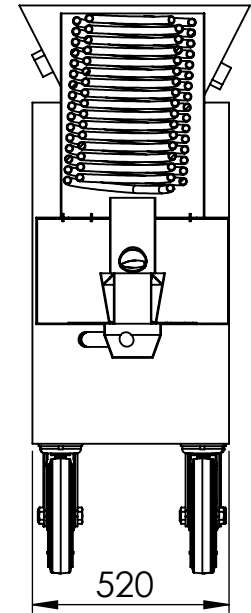
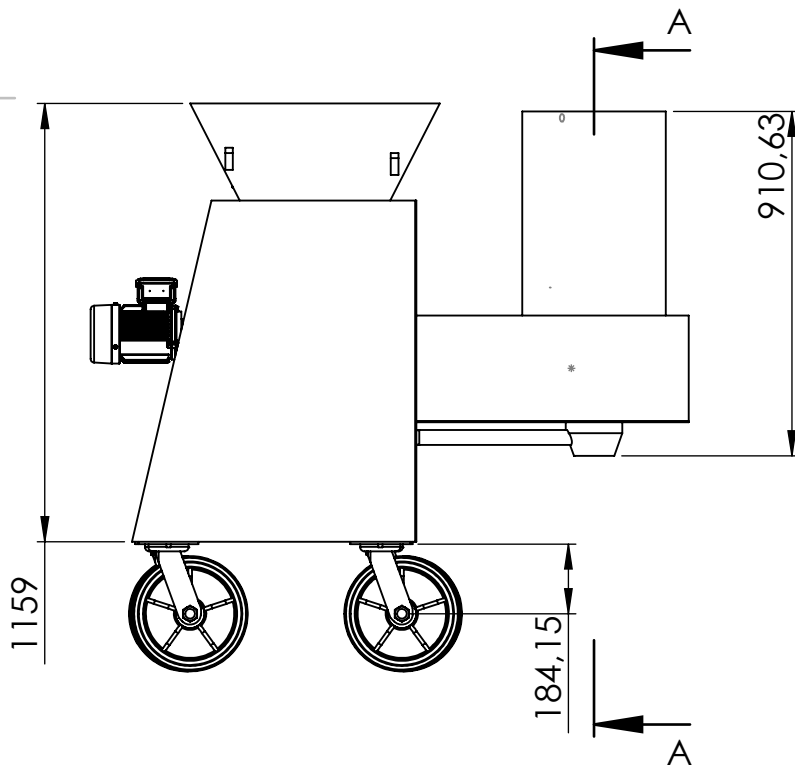
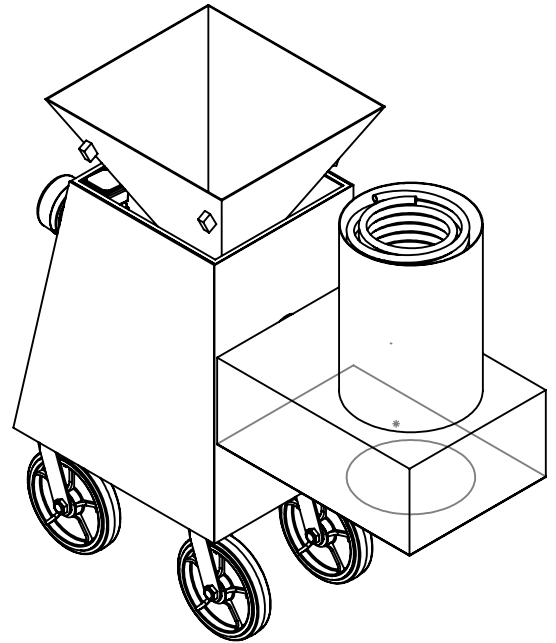
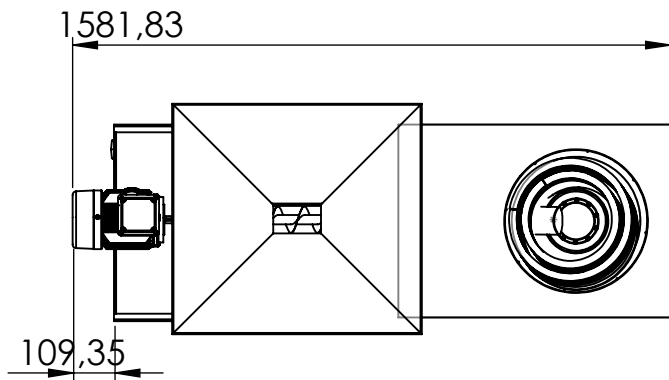


A

A

	NOM	PRENOM	DATE	TITRE:
AUTEUR	LEBBAL	Smail	13 06	Systeme d'alimentation en comburant
	SIHALI	Imad	17	
				A4
				ECHELLE:1:20
				FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1 132



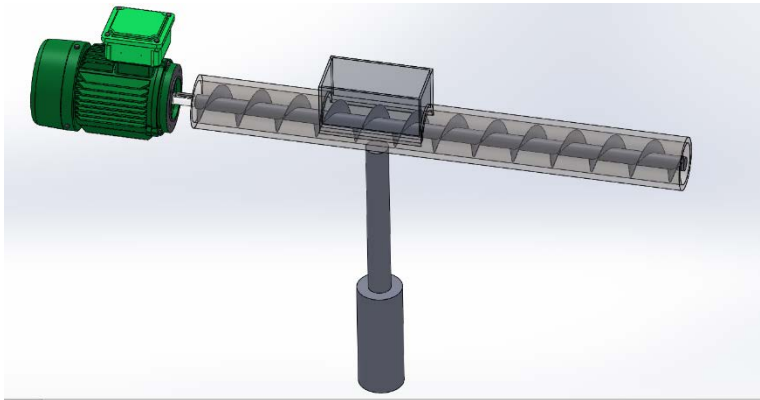
COUPE A-A

NOM		PRENOM	DATE	TITRE:	
A	LEBBAL	Smail	13 06 17	Assemblage	
	SIHALI	Imad			
				No. DE PLAN	A4
				ECHELLE:1:20	FEUILLE 1 SUR 1

Annexe B

La régulation :

Afin de commencer le processus de chauffage, le grignon d'olive a besoin d'une énergie pour le premier allumage (l'amorçage). Pour cela une résistante électrique chauffante est placée sur la grille sur laquelle se pose la biomasse. Mais dès que la première flamme apparaît il faut que la résistance chauffante s'éteigne (pour économiser de l'énergie), donc on rajoute un détecteur de flamme.



Après qu'une quantité de 500 g de la biomasse prend feu, la visse sans fin alimente la chambre de combustion en biomasse à débit constant de 2 g/s. A partir des calculs et du type de moteur articulant la visse sans fin, le moteur est réglé pour marcher 0.16 s et s'arrêter pour 10 s.

Le souffleur qui assure un débit d'air constant réglable au démarrage manuellement on agissant sur la surface d'aspiration, et mis en marche dès le premier allumage de la machine et ne s'arrête qu'on cas d'arrêt total de la machine.



Enfin pour contrôler la température de l'eau, une pompe est reliée à un afficheur et régulateur de température, qui grâce à un thermostat (sonde type J), permet de contrôler la température est de fermé le circuit électrique si la température atteint la valeur voulue pour activer la pompe qui évacuera l'eau vers le circuit de chauffage (ou bien une enceinte qui servira comme un cumulus).

Si la température requise n'est pas atteinte l'eau restera bloquée dans la chambre de combustion.

Organigramme de la régulation :

