

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT MECANIQUE



# MEMOIRE DE MASTER

En vue de l'obtention du Diplôme

Master II en Génie Mécanique

Option : Modélisation et simulation en Mécanique

---

## *Thème*

***CONCEPTION ET REALISATION D'UNE CHAUDIÈRE  
À BIOMASSE.***

---

Réalisé par :

ALIOUANE Abdelkader

Encadré par :

Pr : K. MOHAMMEDI

M<sup>r</sup> : D. KARI

Devant le jury composé de :

Mr. BOUZIANE

Pr. MOHAMMEDI. K

Mr. KARI. D

Mr. ZEBBOUDJ.M

Président

Promoteur

Promoteur

Examineur

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, pour leur sacrifices  
durant tout ces années d'études.

A ma chère femme qui a toujours été à mes côtés.

A mon fils « Mohamed Awab ».

A mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants.

A ma chère grande famille.

A tout mes collègues d'études ( MMSM15).

A tout mes amis proche ou loin .

A tous ceux qui me sont chers, et qu'ils trouvent  
Leur place dans mon cœur.

*Abdelkader*

# Remerciements

*Tout d'abord un grand hommage aux enseignants de l'université MB – FSI qui nous a accueilli, bras ouverts pendant notre cycle d'étude supérieur.*

*Nous tenons à remercier en premier lieu notre promoteur : Mr. Pr: K.MOHAMMEDI pour sa sincérité, son assiduité dans le travail et sans oublier Mr KARI .D et Mr ZEBBOUDJ .M*

*Et tout le groupe MESO*

*Nous remercions aussi tous les enseignants du génie mécanique et sans oublier le personnel de la bibliothèque.*

*Aussi, nous remercions tous ceux qui ont contribué de proche ou de loin à la réalisation de ce projet.*

*Merci*

## Liste des figures

---

Figure 01. Classifications des chaudières.

Figure 02. Rôle de la chaudière.

Figure 03: Processus de combustion d'une particule de biomasse.

Figure 04: Analyse thermogravimétrique de quatre échantillons de bois.

Figure05: Réduction des émissions et un rendement élevé adapté de chaudière.

Figure06: Température de flamme adiabatique en fonction de l'excès d'air pour différentes températures d'entrée d'air.

Figure 07: Taux de conversion de  $CH_4$  en fonction de la température pour des temps de résidence différents et pour un excès d'air.

Figure 08: Mécanismes de formation des cendres.

Figure 09 : Contre courant, Co-courant, Courant transversal.

Figure 10: Principe technologique d'une grille de déplacement.

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

Figure 12: Grilles mobiles inclinées.

Figure 13: Four à grille moderne avec système de contrôle infrarouge, grille séparée par section et contrôle d'air primaire.

Figure 14: Diagramme d'un four à grille mobile horizontal.

Figure 15: Grille vibrante alimentée par des épandeurs.

Figure 16: Brûleurs à cigares.

Figures 17: Grille rotative alimentée par le bas.

Figure 18: Four alimenté par le dessous (Underfeed Stoker).

Figure 19: Chambre postcombustion avec un écoulement vortex imposé.

Figure 20: Four LFB.

Figure 21: Four LFC.

Figure 21 :a)Brûleur cyclone à deux étages, b) Four à combustible pulvérisé en combinaison avec une chaudière à tube d'eau.

Figure 22: Points d'impact environnemental (EIP) pour différentes évaluations de l'effet de serre.

Figure 23: Combustion Conventiennelle, Combustion par étage.

Figure 24: Les émissions de particules en fonction de l'excès d'air.

## Liste des figures

---

Figure 25: 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.

Figure 26: Schéma de principe du contrôle ( $CO / \lambda$ ) et contrôle de charge.

Figure 27: Schéma de principe du modèle de contrôle prédictif.

Figure 28. Production d'énergie dans le monde. [3]

Figure 29. Production d'énergie au Brésil. [3]

Figure 30. Production d'énergie en Algérie. [3]

Figure 31. Section transversale et composition de l'olive. [4]

Figure 32. Procédés d'extraction d'huile par pression. [5]

Figure 33. Procédés d'extraction d'huile d'olive par centrifugation, a) trois phases; b) deux phases. [5]

Figure 34. Silo d'alimentation.

Figure 35. Système d'alimentation en air.

Figure 36. L'échangeur de chaleur.

Figure 37. a) Cendrier b) Grille fixe.

Figure 38. Moteur électrique.

Figure 39. Chambre de combustion.

Figure 40. Fenêtre Principale de projet (ANSYS WORKBENCH).

Figure 41. Fenêtre principale d'ANSYS FLUENT.

Figure 42. Menu Models Dans ANSYS FLUENT.

Figure 43. Fenêtres du modèle Non-Premixed Combustion.

Figure 44. Fenêtres du modèle Discrete Phase.

Figure 45 Fenêtres Properties du menu Materials

Figure 46 : Distribution de température sur un plan médian.

Figure 47: Distribution de température dans la chambre de combustion.

Figure 48. Éléments de chaudière à biomasse.

Liste des figures.

## **Introduction générale.**

Introduction générale .....2

## **Chapitre I. Généralité sur les chaudières biomasse**

Introduction.....3

1. Classification des chaudières.....3

2. Différents types de chaudières .....4

a. Chaudière traditionnelle.....4

b. Chaudière à condensation .....4

c. Chaudière à basse température .....4

3. Le fonctionnement d'une chaudière .....4

4. Rôle de la chaudière.....5

Conclusion.....6

## **Chapitre II. Technologie des chaudières à biomasse.**

Introduction.....7

1. Combustion.....7

1.1. Description du processus de combustion des biomasses.....7

• Séchage.....8

• Dé volatilisation.....8

• Combustion des volatiles.....10

• Combustion du charbon.....10

1.2. Variables affectant le processus de combustion... ..11

• Stockage de chaleur.....11

• Isolation.....12

• Préchauffage d'air.....12

• Excès d'air.....12

• Type et charge du carburant.....13

• Humidité du combustible.....13

• Temps de résidence.....13

• Design et matériaux.....14

• Distribution d'air.....14

• Bouclier anti-rayonnement.....15

• Régulation.....15

1.3. Mécanismes de formation des cendres.....15

2. Technologies de combustion de biomasse pour les systèmes de chauffage.....17

2.1. Combustion à lit fixe.....17

2.1.1. Four à grille.....17

# Sommaire

MMSM 15

2.1.1.1. Four à grille de déplacement.....	18
2.1.1.2. Fours à grilles mobiles inclinées et horizontales.....	21
2.1.1.3. Fours à grilles vibrantes.....	23
2.1.2. Bruleurs à cigares.....	24
2.1.3. Grille rotative alimentée par le bas.....	25
2.1.4. Four alimenté par le dessous (Underfeed stokers).....	26
2.2. Combustion à lit fluidisé.....	28
2.2.1. Lit fluidisé à bulles (LFB).....	29
2.2.2. Lit fluidisé circulant (LFC).....	30
2.3. Combustion de carburant pulvérisé.....	31
2.4. Réduction des émissions.....	33
2.4.1. Combustion étagée.....	33
2.4.2. Polluants non brûlés.....	34
2.4.3. Émissions des NO <sub>x</sub> .....	35
2.4.4. Émissions de particules.....	36
2.4.5. Émissions de SO <sub>2</sub> .....	37
2.5. Systèmes de contrôle de processus pour installations de combustion à biomasse.....	38
2.5.1. Dynamique des processus.....	39
2.5.2. Etat de l'art des contrôles de processus.....	41
2.5.2.1. Contrôle de processus avancé.....	42
2.5.2.2. Modèle de contrôle prédictif.....	42
2.5.2.3. Capteur de détection avancé.....	44
Conclusion.....	44
<b>Chapitre III. Introduction à la bioénergie.</b>	
Introduction.....	45
1. La biomasse.....	45
2. Situation actuelle de la bioénergie.....	46
3. Grignon d'olive.....	48
3.1. Composition physique des olives.....	48
3.2. Procédé d'extraction d'huile d'olive.....	49
3.2.1. Procédés discontinus ou systèmes à presses.....	49

# Sommaire

MMSM 15

3.2.2. Procédé continu à trois phases.....	50
3.2.3. Procédé continu à deux phases.....	51
3.2.4. Concentrations et pertinence de C, H, O, N et S dans le grignon d'olive.....	52
3.3. Concentrations et pertinence du contenu en cendres du grignon d'olive.....	53
Conclusion .....	53

## **Chapitre IV : Conception et dimensionnement d'une chaudière à biomasse.**

Introduction.....	54
1. Architecture générale.....	54
2. Constituants principaux.....	54
3. Chaudronnerie.....	54
4. Eléments constituant la chaudière.....	54
4.1. Système d'alimentation en biomasse.....	54
4.2. Système d'alimentation en air.....	55
4.3. Echangeur de chaleur.....	56
4.4. Grille et cendrier.....	57
4.5. Vis sans fin.....	57
4.6. Moteur électrique.....	58
4.7. Système d'isolation du corps de combustion.....	58
5. Dimensionnement thermique de la chaudière.....	59
5.1. Evaluation des caractéristiques de la chaudière.....	59
5.1.1. Puissance thermique de chauffage.....	60
5.1.2. Débits du combustible et d'air.....	60
• Débits du combustible.....	60
• Débits d'air.....	60
6. Modélisation d'une chaudière à biomasse avec ANSYS FLUENT 15.....	61
6.1. Procédure.....	61
6.2. Résultats.....	66
7. Rendement d'une chaudière bois.....	68
7.1. Rendement de combustion.....	68
7.2. Rendement utile ou de production.....	68
Conclusion.....	68

## **Chapitre V : Principe de fonctionnement de la chaudière à biomasse.**

Introduction.....	69
1. L'énergie renouvelable.....	69
Définition.....	69
2. L'énergie renouvelable la plus utilisée : l'énergie biomasse.....	70
2.1. Le bois comme les grignons d'olive est une énergie renouvelable.....	70
2.2. PCI du bois.....	71
2.3. Emission de CO <sub>2</sub> évitées.....	71
3. Principe de fonctionnement d'une chaudière biomasse.....	72
3.1. Chaudière biomasse.....	75
4. Rendement d'une chaudière biomasse.....	75
4.1. Rendement de combustion.....	75
4.2. Rendement utile ou de production.....	76
4.3. Rendement global.....	76

# Sommaire

The logo consists of three concentric circles in shades of blue, with the text 'MMSM 15' in red centered within the innermost circle.

MMSM 15

5. Equation de la réaction de combustion du grignon d'olive.....	77
Conclusion.....	77
<b>Conclusion générale</b> .....	78
Nomenclature.	
Référence bibliographique.	
Annexe.	

## Résumé

---

### ملخص :

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

### 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.

### Résumé:

Vu la situation actuelle que ce soit au niveau local ou mondial, concernant les énergies et l'écologie, ça nous pousse à varier nos source 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 réalisée.

# **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 3<sup>ème</sup> 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 m<sup>3</sup> de biogaz.

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude intitulé "Conception et 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 MJ 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 forme de Cinq chapitres.

Dans le chapitre 1 intitulé " **Généralité sur les chaudières à biomasse** ", on a étudié les classifications des chaudières à biomasse, puis on présente les différents types de chaudières et enfin on a présenté le rôle de la chaudière.

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.

Dans le chapitre 3 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 4 intitulé " **Conception et dimensionnement d'une chaudière à biomasse** " présente les constituants principaux de la chaudière réalisée, puis on a présenté Dimensionnement thermique de la chaudière et enfin on a présenté brièvement le prototype puis la procédure à suivre sur le logiciel Fluent pour en fin conclure avec l'interprétation des résultats.

Dans Le chapitre 5 intitulé " **Principe de fonctionnement de la chaudière à biomasse**" on va commencer de discuter sur les énergies renouvelables en générale, puis on a discuté sur la biomasse (grignon d'olive) comme énergie des pauvres. Enfin présente les étapes du principe de fonctionnement de la chaudière à biomasse réalisée.

# Chapitre I :

## **Généralité sur les chaudières à biomasse.**

### Introduction :

La chaudière est un équipement au cœur du système de chauffage central. Son rôle est de générer de l'eau chaude et de la redistribuer dans le réseau de chauffage (via les canalisations et les radiateurs) pour réchauffer la maison mais aussi produire de l'eau chaude sanitaire. On distingue 5 catégories de chaudières, à **gaz**, au **fioul**, à **bois**, **électriques** ou les chaudières **mixtes** qui associent deux énergies. Elle peut aussi relever de différentes technologies, classiques, à basse température ou à condensation.

### 1. Classification des chaudières :

C'est un gageur que de vouloir établir une classification des chaudières industrielles, celle-ci faisant intervenir trop de critères non significatifs lorsqu'ils sont pris isolément, trop de variantes et trop de combinaisons possibles.

Il est évident que chaque modèle de chaudière possède de par sa conception et ses dimensions en générale, une limitation en capacité de production de vapeur mais : mais il est bien rare de buter sur tous les caractères de limitation en même temps et il suffit souvent de changer un paramètre pour étendre sensiblement la plage d'utilisation. Donc une description de chaudière se fait par classification :

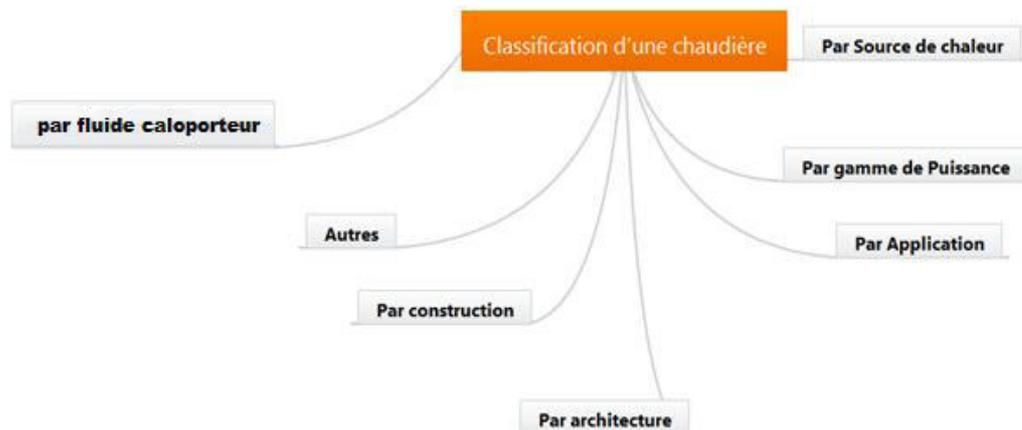


Figure 1. Classification des chaudières

### 2. Différents types de chaudières :

#### a. Chaudière traditionnelle :

- Gamme de températures : départ  $T < 95^{\circ}\text{C}$  et retour  $T > 55^{\circ}\text{C}$
- Rendements : de l'ordre de 92% - mini règle: 88 %
- Avantage : technologie « simple ».

#### b. Chaudière à condensation :

- Gamme de températures : départ  $T < 95^{\circ}\text{C}$  et retour  $T \gg 30^{\circ}\text{C}$
- Rendements : jusqu'à 110% - mini règle: 92 %
- Avantage : économies d'énergie importantes.

#### c. Chaudière à basse température :

- Gamme de températures : départ  $T < 95^{\circ}\text{C}$  et retour  $T \gg 35/50^{\circ}\text{C}$
- Rendements : jusqu'à 95% - mini règle. 90 %
- Avantage : limite les pertes de chaleur (chaudière, «en ligne»).

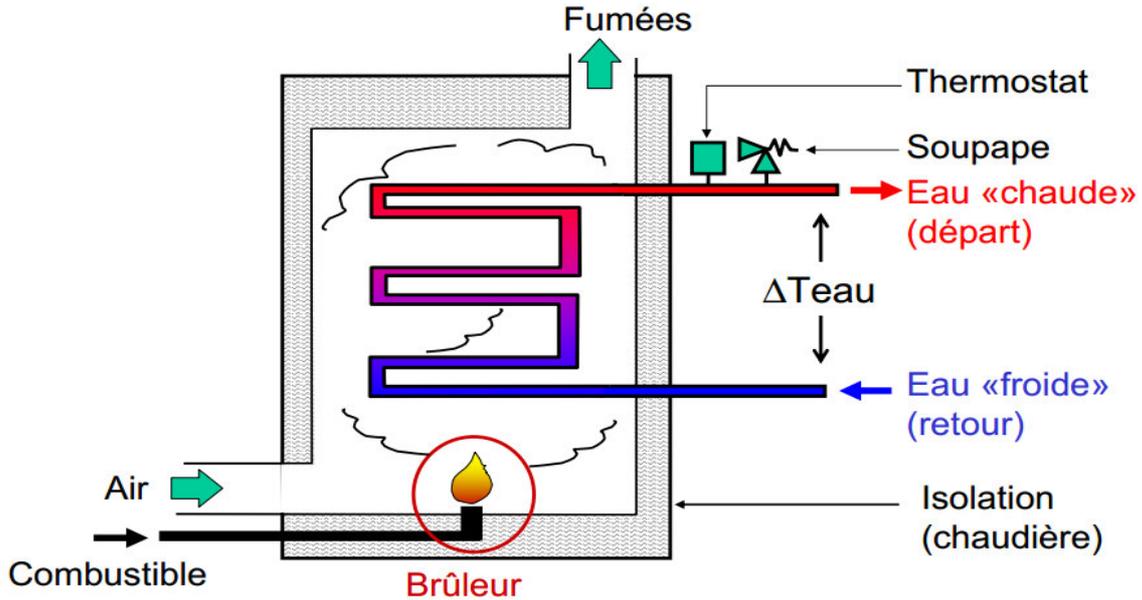
### 3. Le fonctionnement d'une chaudière :

Quel que soit le modèle que vous avez, le principe de fonctionnement d'une chaudière repose sur des éléments qui varient peu :

- Une chaudière a besoin d'un carburant, d'une source d'énergie : bois, fioul, gaz, électricité, ou plus récemment, air.
- Pour les chaudières à combustion, le carburant est brûlé, et c'est cette action qui produit de la chaleur.
- Pour les modèles électriques ou thermodynamiques, il n'y a pas de combustion, mais l'utilisation d'une source d'énergie "invisible".
- Dans tous les cas, l'énergie utilisée ou dégagée par la combustion sert à produire de la chaleur, qui se transmet ensuite à des circuits reliés à des émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants) et/ou au dispositif d'alimentation en eau chaude.
- Les vapeurs dégagées et résidus de combustion sont évacués, sauf dans les modèles à condensation, dans lesquels la vapeur est réutilisée en circuit interne.

4. Rôle de la chaudière :

Transmettre à l'eau la chaleur libérée par une combustion



**- rendement de chaudière**

• c'est le rendement *de l'appareil*

$$\eta_{\text{Chaudière}} = \frac{Q_{\text{Chaudière}}}{\dot{m}_{\text{gaz}} \cdot \text{PCI}}$$

avec :

$$Q_{\text{chaudière}} = \dot{m}_{\text{eau}} \cdot C_p \cdot \Delta T_{\text{eau}}$$

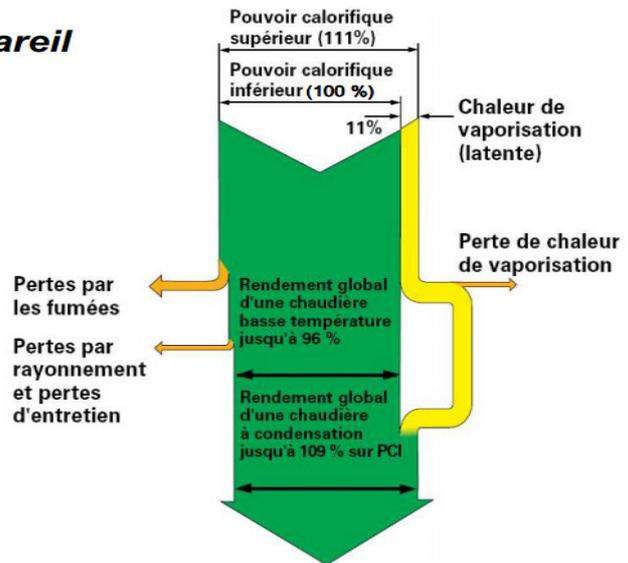


Figure 2. Rôle de la chaudière

### **Conclusion :**

Grace à cette étude on a pu avoir une idée ou une vue globale sur différent types de chaudières pour qu'a la fin faire notre propre classification qui se divise en trois types de chaudières utilisant de l'eau, des chaudières utilisant une vapeur saturé et enfin celles qui utilisent de la vapeur surchauffé tout ça en fonction de la vapeur final désirée.

# **Chapitre II :**

## **Technologie des chaudières à biomasse.**

### Introduction:

La biomasse peut être transformée en énergie utile (chaleur ou électricité) ou en énergie (charbon de bois, bio fuels 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.

### 1. Combustion:

#### 1.1. Description du processus de combustion des biomasses:

Le processus de combustion de la biomasse comporte un certain nombre d'aspects physico-chimiques complexe. 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, dé volatilsation, 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 et le dé volatilsation 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 03 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.

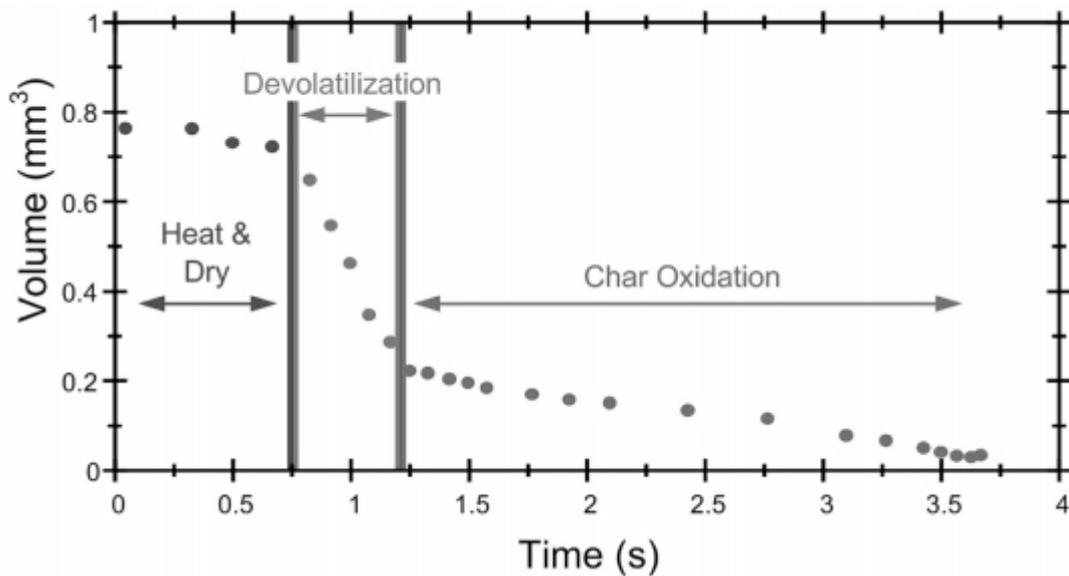


Figure 03: Processus de combustion d'une particule de biomasse. [7]

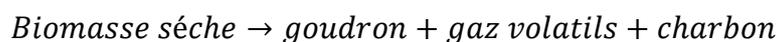
- **Séchage:**

L'humidité s'évapore à basse température (<100 ° 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.

- **Dé volatilisation:**

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 CO<sub>2</sub> peuvent être formés en quantités considérables, en particulier à partir de combustibles riches en oxygène tels que la biomasse comme suit:

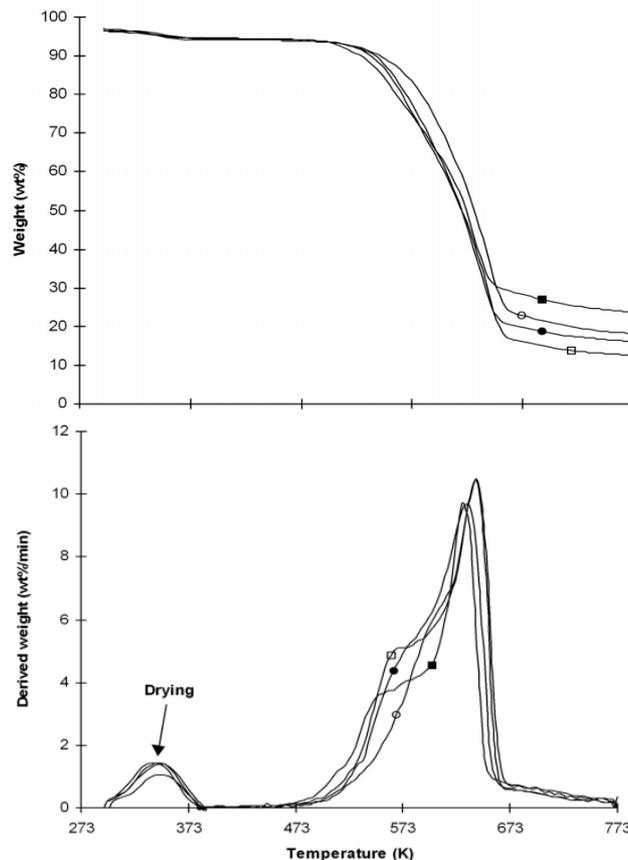


Le type de carburant, la température, la pression, le taux de chauffage et le temps de réaction sont toutes des variables qui affectent les quantités et les propriétés des produits formés.

Dans la figure 4, 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, le dé volatilisation commence et le taux de dé volatilisation augmente à mesure que la température augmente.

Le pic de température inférieur (530-610 K) représente la décomposition de l'hémicellulose et le pic de température plus élevée (630-620 K) représente la décomposition de la cellulose.

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



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

**Figure 04: Analyse thermogravimétrique de quatre échantillons de bois. [7]**

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.

Le dé volatilisation 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 dé volatilisation, 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 dé volatilisation et de combustion des charbons. Les composés volatils émis, principalement des oxyde-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 le dé volatilisation, on forme du charbon qui réagit ensuite avec de l'oxygène dans l'air avec la réaction de combustion suivante:



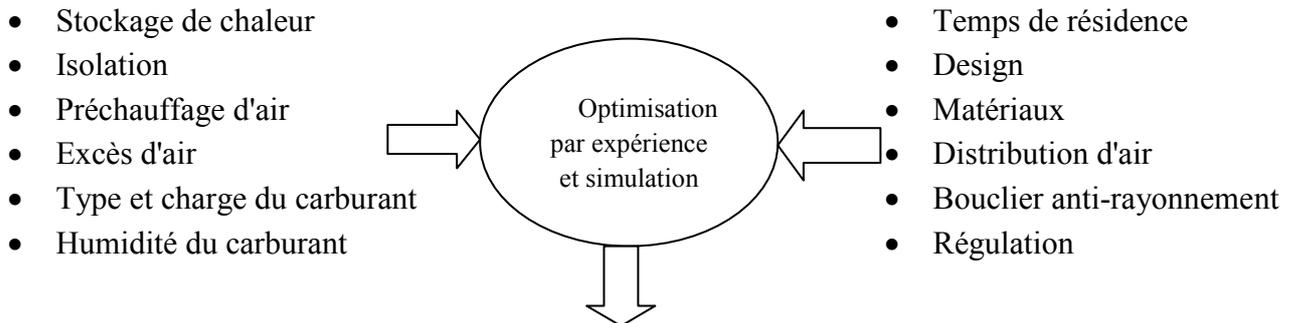
La combustion du charbon a lieu en même temps que la combustion des matières volatiles, apparaissant sous la forme d'une combustion incandescente derrière le front en flammes.

Pendant le processus d'oxydation du charbon, les molécules d'oxygène traversent le front en 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 char 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, du dé volatilisation 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 4). Néanmoins, lors du déclenchement 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.

### 1.2. Variables affectant le processus de combustion:

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



*Figure05: Réduction des émissions et un rendement élevé adapté de chaudière. [9]*

#### • **Stockage de chaleur:**

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

- **Isolation:**

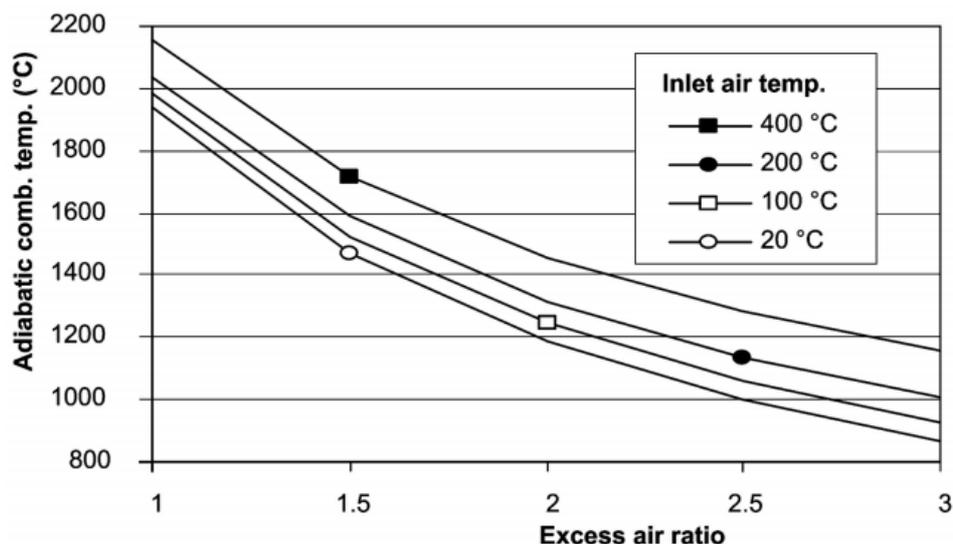
Concrètement, en améliorant l'isolation de la chambre de combustion, une température de chambre de combustion plus élevée peut être obtenue. L'isolation peut être améliorée en augmentant l'épaisseur de la paroi ou en utilisant un matériau qui isole mieux.

- **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 un, 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 06, 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.



*Figure06: Température de flamme adiabatique en fonction de l'excès d'air pour différentes températures d'entrée d'air. [7]*

- **Type et charge du carburant:**

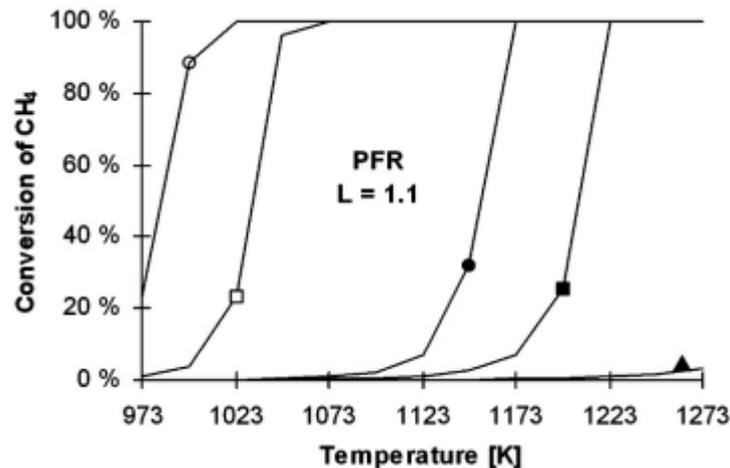
Le type de carburant influence le processus de combustion à travers diverses caractéristiques des différents types de carburant, principalement en ce qui concerne la composition du carburant, le contenu volatil / charbon, le comportement thermique, la densité, la porosité et la taille. La biomasse contient généralement une teneur élevée en matières volatiles et une faible teneur en charbon par rapport au charbon actifs, 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 dé volatilsation. 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. L'homogénéité du carburant est également importante ; l'homogénéité croissante, qui s'améliore avec la diminution de la taille du carburant, permet une meilleure maîtrise des processus.

- **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 dé volatilsation, 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 11 montre les résultats de la modélisation de la cinétique chimique de la combustion du méthane dans un réacteur à écoulement idéal(PFR).



*Figure 07: Taux de conversion de  $CH_4$  en fonction de la température pour des temps de résidence différents et pour un excès d'air. [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 et la zone de flamme, 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 volatiles. Il en résulte un mélange amélioré du gaz combustible et de l'air de combustion 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.

### 1.3.Mécanismes de formation des cendres :

Les éléments de formation de cendres sont présents dans la biomasse en tant que sels, liés dans la structure du carbone (cendres inhérentes) ou sont présents comme particules minérales provenant de la saleté et de l'argile introduites dans le combustible de biomasse lors de la récolte ou du transport (cendres entraînées). Les composés dans les cendres inhérentes sont dispersés de manière homogène dans le carburant et sont beaucoup plus mobiles que les composés dans les cendres entraînées et, par conséquent, sont facilement volatiles et disponibles pour les réactions dans la combustion du charbon.

Pendant la combustion, une fraction des composés formant des cendres dans le carburant est volatilisée et libérée en phase gazeuse. La fraction volatilisée dépend des caractéristiques du carburant, de l'atmosphère du gaz et de la technologie de combustion utilisée.

Dans les conditions réductrices et les températures élevées à l'intérieur et à la surface du charbon brûlant, même une petite fraction présente comme oxydes réfractaires, tels que  $SiO_2$ ,  $CaO$  et  $MgO$ , peut se transformer en  $SiO$ ,  $Ca$  et  $Mg$  et se volatiliser. Lorsqu'ils sont libérés du charbon en tant que vapeurs, ces éléments forment de très petites particules primaires dans la couche limite des particules de charbon en feu en raison de la ré-oxydation et de la nucléation subséquente. Ce mécanisme est induit lorsque les composés volatilisés sont transportés à partir de l'atmosphère réductrice à la surface de la particule charbon en combustion à travers la couche limite dans les conditions environnantes de gaz oxydant dans le four.

Les particules primaires formées par la vaporisation et la nucléation subséquente dans la couche limite sont de taille très petite, d'environ 5 à 10 nm, mais en passant dans les gaz de combustion, elles se développent par coagulation, agglomération et condensation. Ces particules forment la base du mode fin des cendres volantes, caractérisé par une taille de particule inférieure à 1  $\mu$  m.

Les composés de cendres non volatiles restant dans le charbon peuvent fondre et se mélanger à l'intérieur et à la surface du charbon, en fonction de la température et de la composition chimique des particules.

Il en résulte des particules de cendres résiduelles avec une large gamme de compositions, de formes et de tailles, liées à la caractéristique des particules minérales parentales. Selon la densité et la taille des particules de cendres résiduelles, la technologie de combustion et la vitesse des gaz de combustion, une fraction des cendres résiduelles sera entraînée avec les gaz de combustion et formeront la partie grossière des cendres volantes, tandis que l'autre fraction restera dans la grille et formera des cendres de fond. Contrairement aux particules fines de cendres volantes provenant de composés de cendres volatilisés, les particules de cendres volantes grossières sont plus grandes, dépassant généralement  $5\ \mu\text{m}$ .

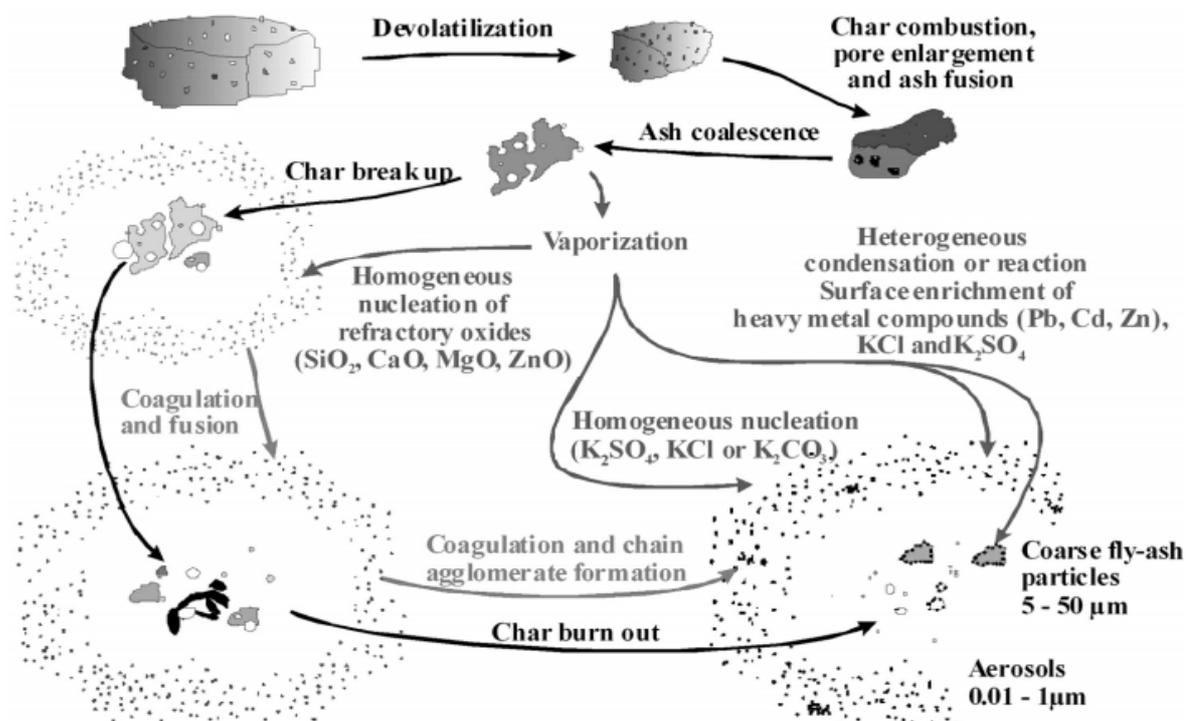


Figure 08: Mécanismes de formation des cendres. [10]

### 2. 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.

#### 2.1. Combustion à lit fixe:

Les systèmes de combustion à lit fixe comprennent des fours à grille. 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.

##### 2.1.1 Four à grille :

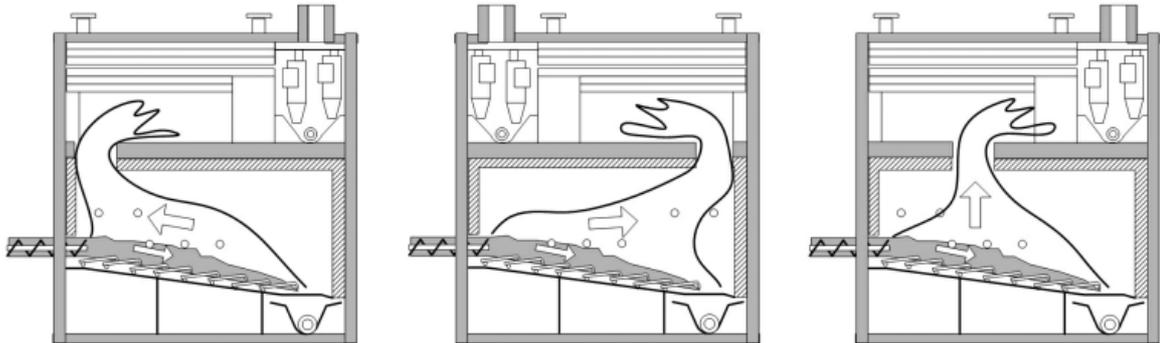
Une grille bien conçue et bien contrôlée garantit une répartition homogène du carburant et du lit de braises sur toute la surface de grille. Ceci est très important pour garantir une alimentation en air primaire égale sur les différentes zones de la grille. L'apport d'air inhomogène peut mener à des 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.

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 pour une combustion complète 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. D'autres moyens d'obtenir un bon mélange de gaz de combustion et d'air secondaire sont des chambres de combustion avec un écoulement de vortex ou un écoulement de cyclone.

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 09** : *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).

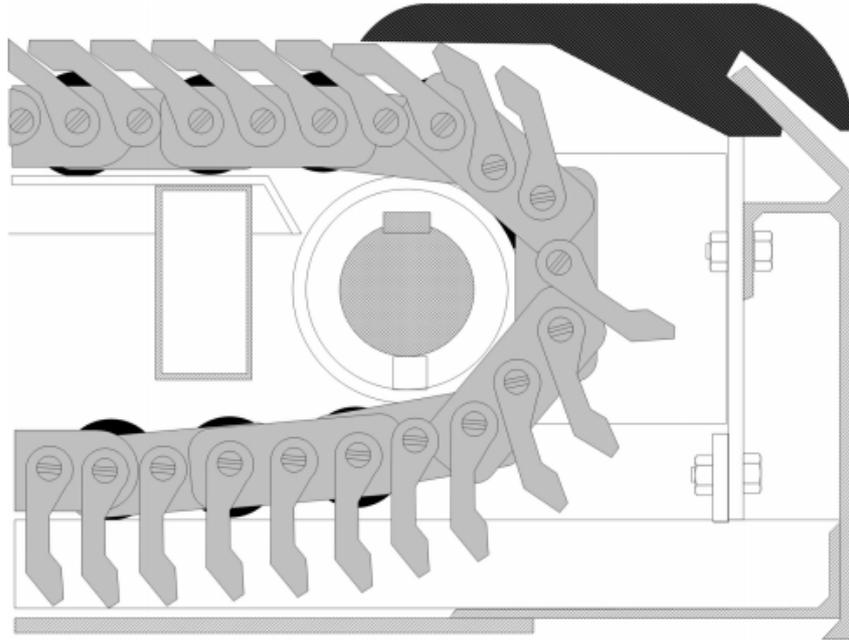
La combustion à Co-courant est appliquée pour les combustibles secs ou dans les systèmes où l'air primaire est préchauffé. Ce système augmente le temps de séjour des gaz non brûlés libérés du carburant et peut améliorer la réduction des  $NO_x$ .

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.

### 2.1.1.1 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 10). Le carburant est fourni à une extrémité de la chambre de combustion sur la grille.

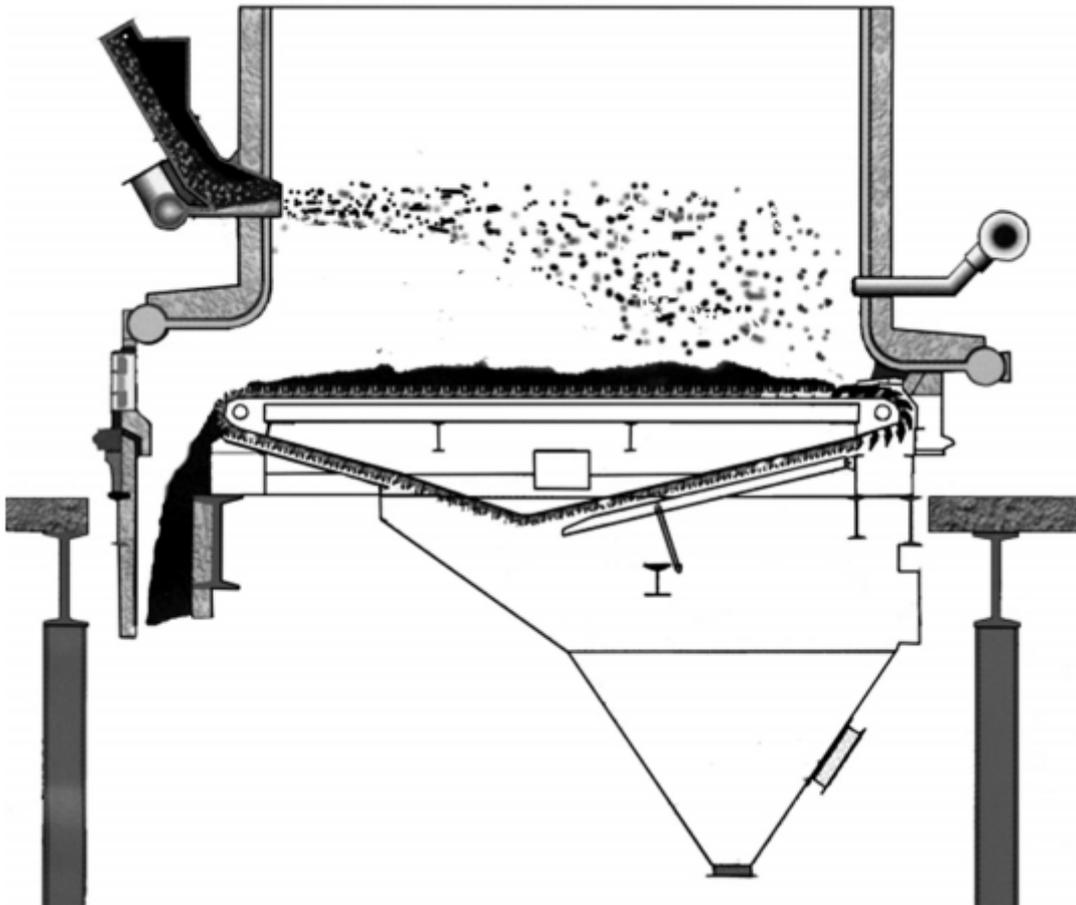
Le lit de carburant lui-même ne bouge pas, mais il est transporté par la chambre de combustion par la grille.



*Figure 10: Principe technologique d'une grille de déplacement. [11]*

À la fin de la chambre de combustion, la grille est nettoyée de cendre et de saleté 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.

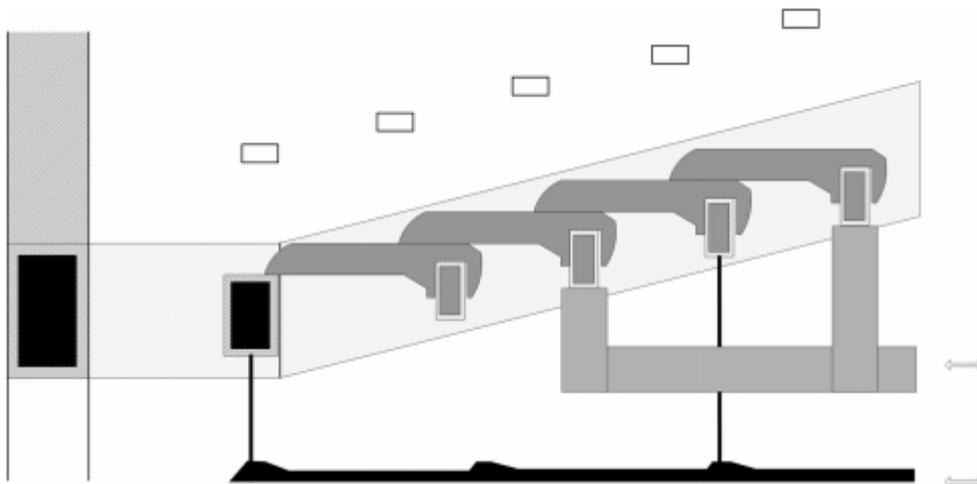
Les avantages des systèmes de grille de déplacement sont des conditions de combustion uniformes, en raison du lit stable et presque immobile de braises. En outre, la maintenance ou le remplacement des barres de grille est facile à manipuler. Par rapport aux fours de grille mobiles, cependant, le fait que le lit de braises n'est pas alimenté entraîne un temps d'épuisement plus long. Une entrée d'air primaire plus élevée est nécessaire pour une combustion complète. De plus, 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 11: Four à grille de déplacement alimenté par des épandeurs. [11]*

### 2.1.1.2 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 12). 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 18). 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. Ils sont équipés de petits canaux dans leurs parois latérales pour l'alimentation en air primaire et devraient être aussi étroits que possible afin de distribuer l'air primaire sur le lit de carburant aussi bien que possible.

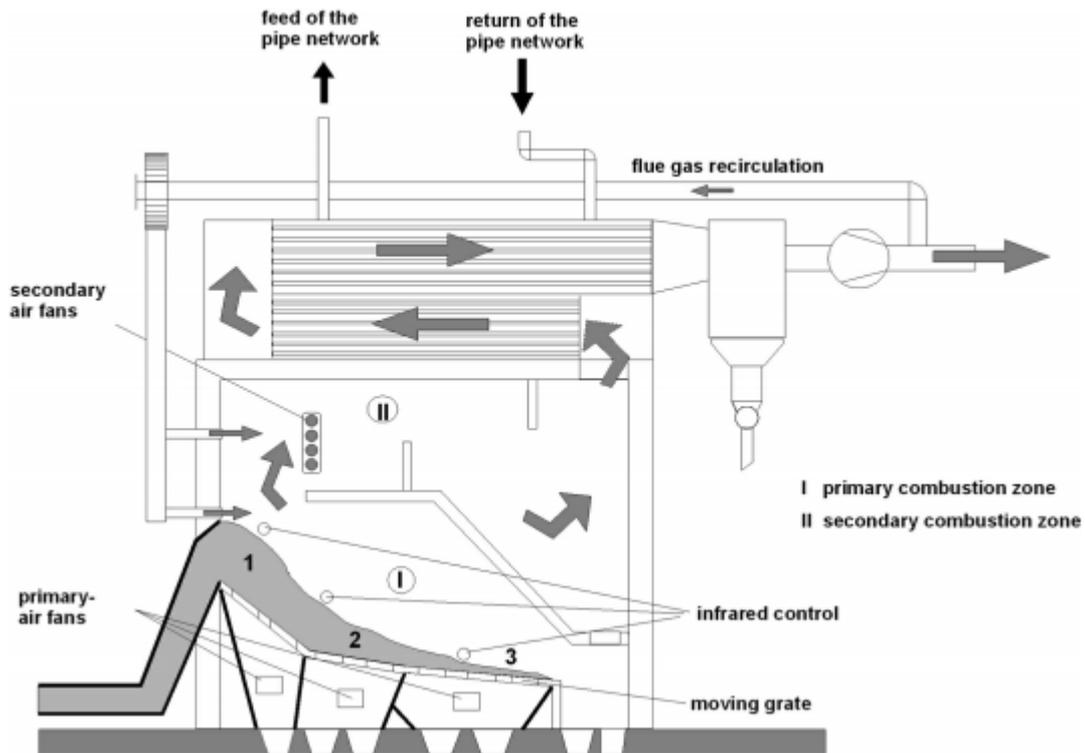


*Figure 12: Grilles mobiles inclinées. [11]*

Dans les fours à grille mobiles, une grande variété de carburants à biomasse peut être brûlée. Les fours à grille 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 grille 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 ou une couverture

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

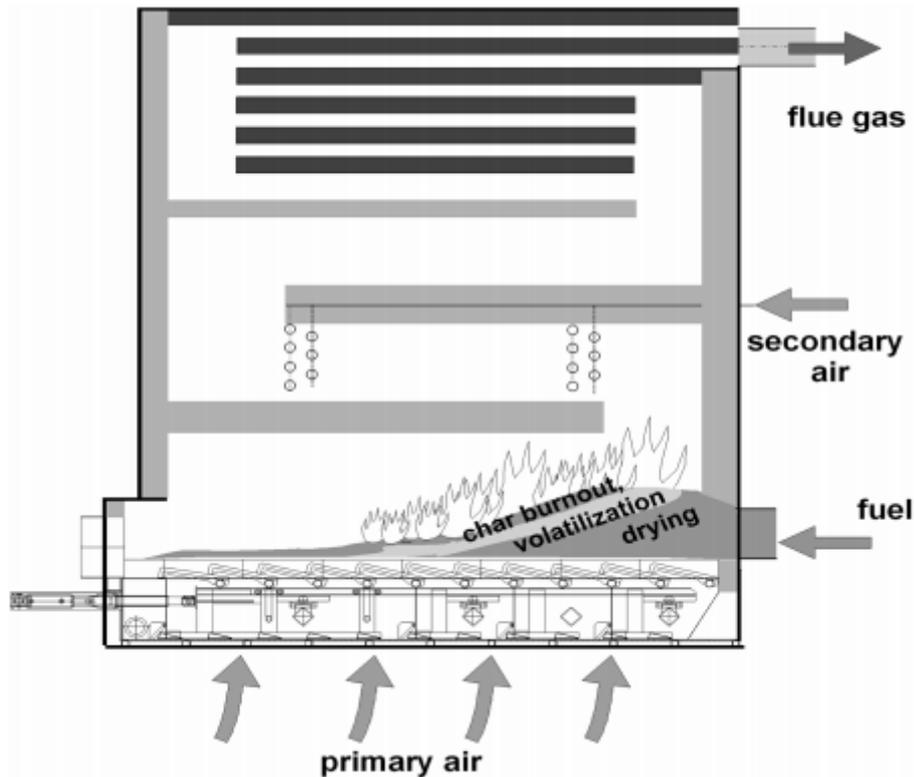
L'enlèvement des cendres se fait sous la grille sous forme sèche ou humide. Le fonctionnement entièrement automatique de l'ensemble du système est courant.



**Figure 13: Four à grille moderne avec système de contrôle infrarouge, grille séparée par section et contrôle d'air primaire. [11]**

**1:Séchage, 2: Dé volatilisation, 3:Combustion du charbon.**

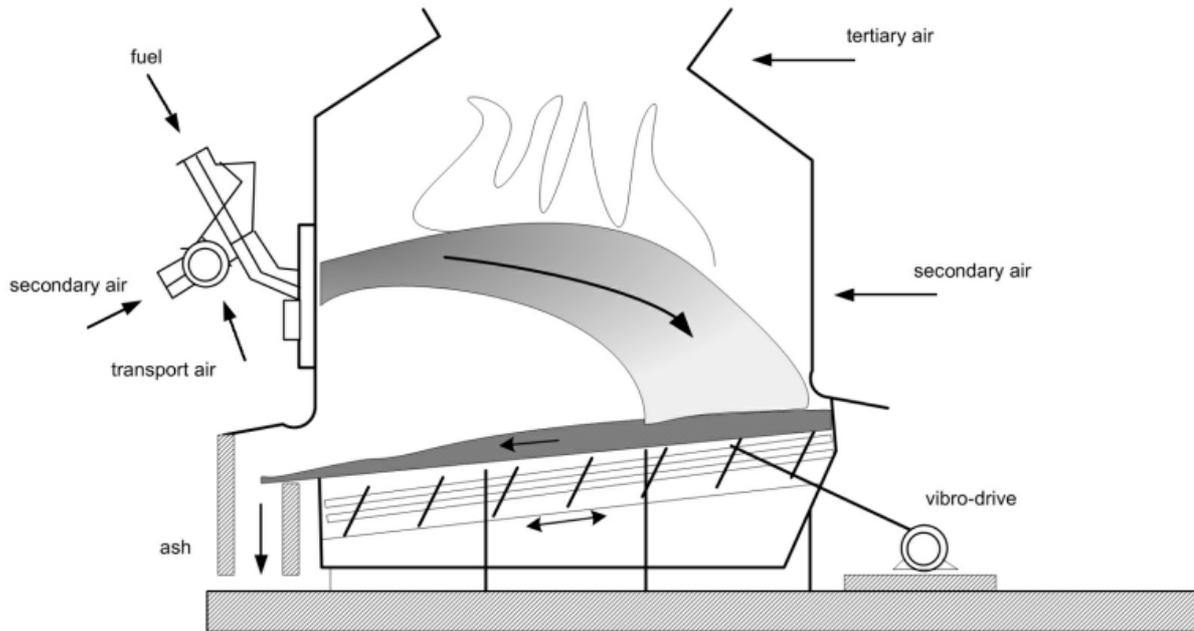
Les grilles mobiles horizontales ont un lit de carburant complètement horizontal. Ceci est obtenu par la position diagonale des barres de grille (figure 14). Les avantages de cette technologie sont le fait que les mouvements de carburant incontrôlés sur la grille par gravité sont entravés et que l'effet d'assèchement par les mouvements de grille augmente, conduisant ainsi à une répartition plus homogène de la biomasse sur la surface de la grille et entravant la formation de zones de points chauds. Un avantage supplémentaire de la grille mobile horizontale est que la hauteur peut être réduite. Afin d'éviter que les particules de cendres et de carburant ne tombent dans les barres de grille, elles doivent être pré chargées de sorte qu'il n'y ait pas d'espace libre entre les barres.



*Figure 14: Diagramme d'un four à grille mobile horizontale. [11]*

### 2.1.1.3 Fours à grilles vibrantes:

Les fours à grille vibrantes se composent d'un mur à tube à ailettes inclinées placé sur des ressorts (figure 15). Le carburant est alimenté dans la chambre de combustion par des épandeurs, des convoyeurs à vis ou des mangeoires hydrauliques. 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 alimenté à travers le lit de carburant par le bas à travers des trous situés dans les côtes des 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 15: Grille vibrante alimentée par des épandeurs. [11]*

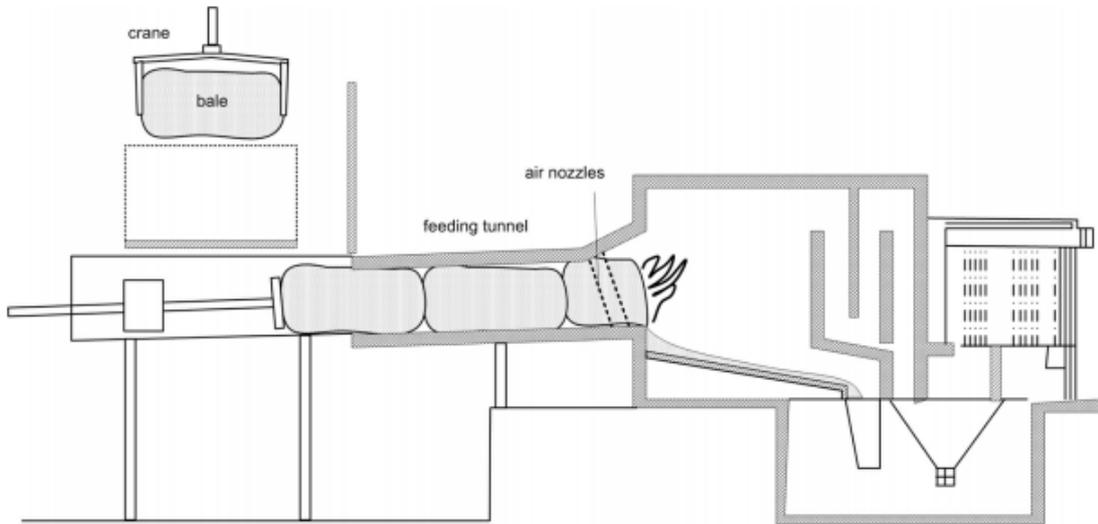
### 2.1.2 Brûleurs à cigares:

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 le matériau non brûlé est déplacé 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 leur faible taux de frittage et de fusion et 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  $900^{\circ}\text{C}$  pour un fonctionnement normal.

En outre, dans la combustion de la paille et des céréales, des particules de cendres volantes très fines et légères ainsi que des aérosols sont formés à partir de vapeurs alcalines condensées. Un système de nettoyage automatique de l'échangeur de chaleur est nécessaire pour empêcher la formation des gisements de cendres et la corrosion. Des systèmes de paille

déchiquetés ou coupés existent également et fonctionnent de manière similaire à la technologie décrite, seule la préparation et l'alimentation en carburant sont différentes.



*Figure 16: Brûleurs à cigares. [11]*

### 2.1.3 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 17). 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.

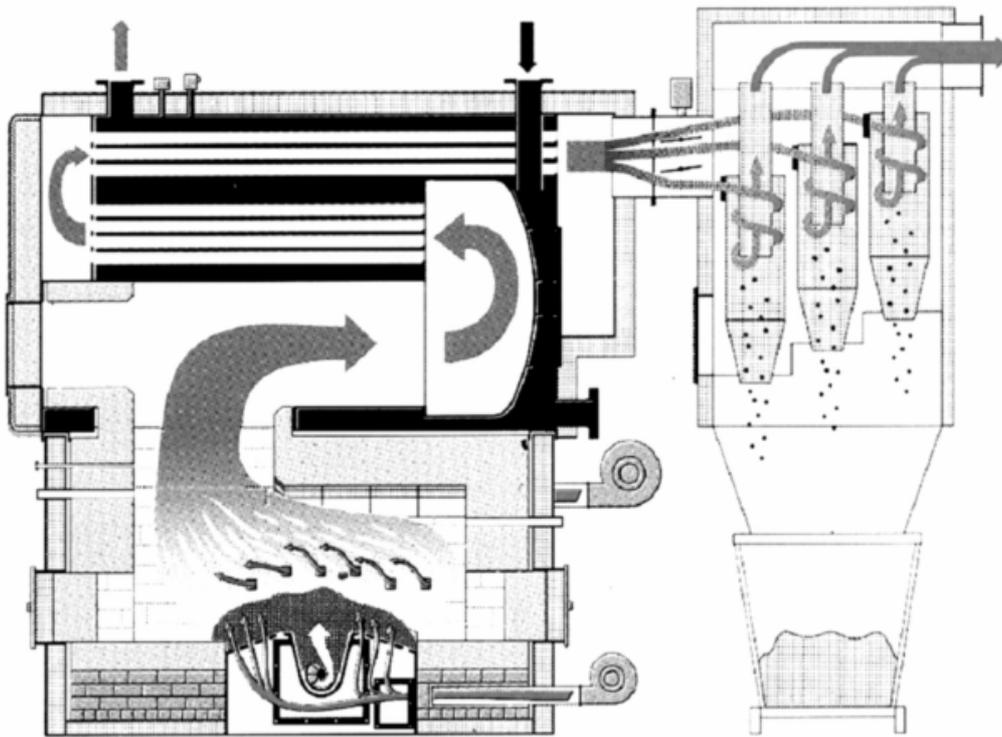
Les installations de combustion à grille tournante sont également capables de brûler des mélanges de combustibles en bois massif et de boues biologiques. Le système est contrôlé par ordinateur et permet un fonctionnement entièrement automatique.



*Figures 17: Grille rotative alimentée par le bas. [11]*

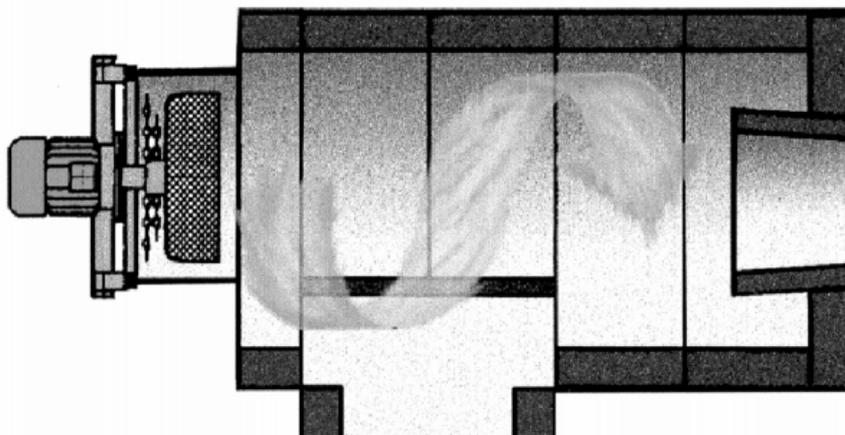
### **2.1.4 Four alimenté par le dessous (Underfeed stokers) :**

Les fours alimentés par le bas (figure18) 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 de dessous 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 18: 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 équipé d'une chaîne rotative (figure 19).



*Figure 19: 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 tels que l'écorce, la paille et les céréales ont besoin de systèmes d'élimination des cendres plus efficaces. De plus, les particules de cendre frittées ou fondues qui recouvrent la surface supérieure du lit de carburant peuvent causer des problèmes, en raison de conditions de combustion instables lorsque le carburant et l'air traversent la surface couverte de cendres. Un bon comportement des charges partielles et leur simple contrôle de la charge sont un avantage. 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.

### 2.2. 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 technologie 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. Cela peut être réalisé par les technologies de combustion internes pour les systèmes de chauffage industriel, les échangeurs de chaleur, la recirculation des gaz de combustion, l'injection d'eau ou le fonctionnement du lit sous-stœchiométrique (dans les installations de combustion à lit fixe, les températures de combustion sont habituellement de 100 à 200 ° C plus élevées que dans les Unités CLF).

En raison du bon mélange obtenu, les plantes CLF peuvent traiter de manière flexible avec divers mélanges de carburant (par exemple, des mélanges de différents types de combustibles de biomasse ligneux 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 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.

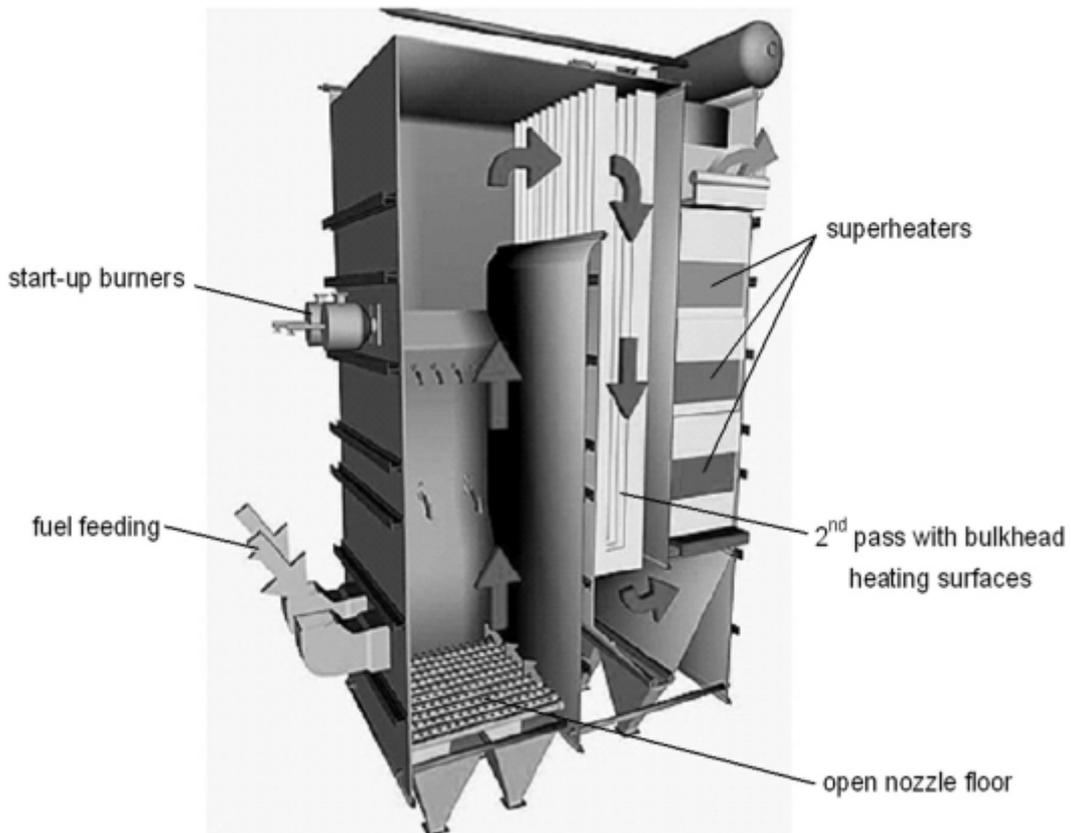
Un autre inconvénient des unités CLF est posé par les poussières élevées entraînées avec les gaz de combustion, ce qui rend nécessaires des précipitateurs de poussière efficaces et des systèmes de nettoyage de chaudières. Le matériau du lit est également perdu avec la cendre, ce qui oblige à ajouter 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.

### 2.2.1 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 (figure20), le matériau du lit se trouve dans la partie inférieure du four. L'air primaire est fourni sur une plaque de distributeur de buse 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. Le carburant ne représente que 1-2 pour cent du matériau du lit et le lit doit être chauffé (à l'intérieur ou à l'extérieur) avant l'introduction du carburant.

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.

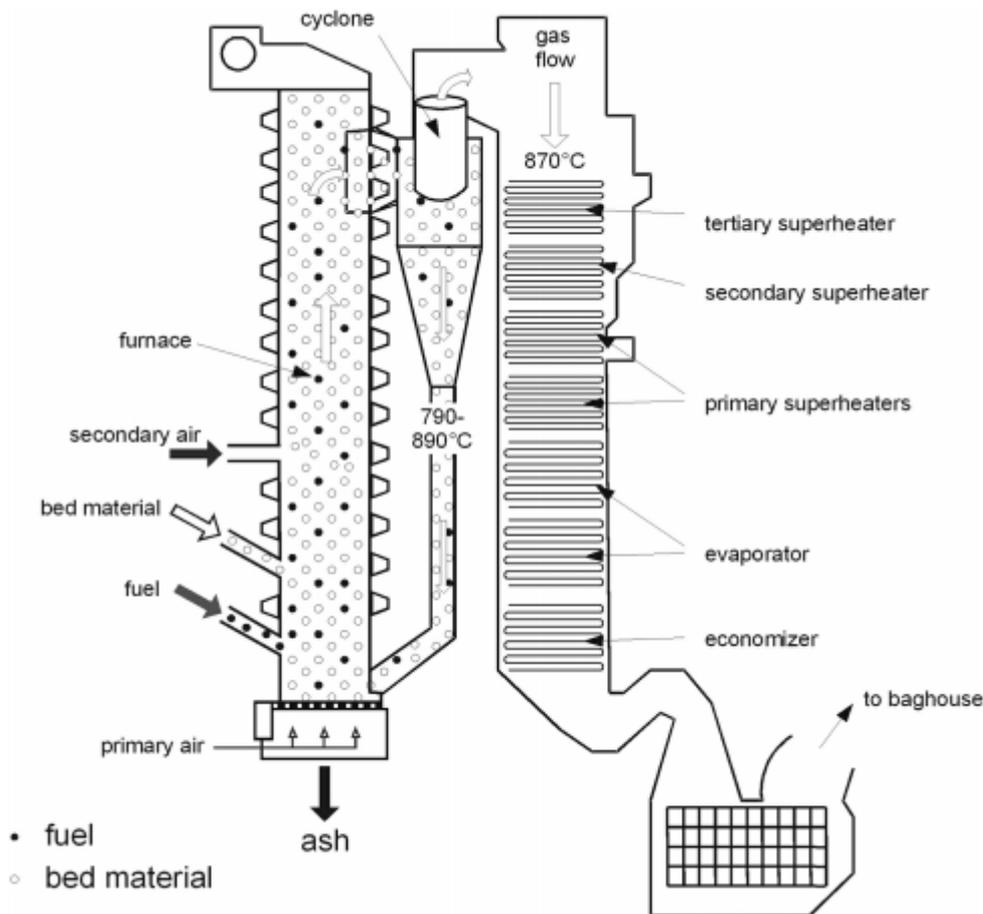
Dans les fours LFB modernes, une opération de lit sous-stœchiométrique (environ 0,35) est possible, ce qui permet de contrôler la température du lit dans la gamme de 650-850 ° C. Par conséquent, les carburants à faible température de fusion des cendres peuvent également être brûlés. Les problèmes de 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 20: Four LFB. [11]*

### 2.2.2 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 (figure21). 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 que dans les systèmes LFB 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 21: Four LFC. [11]*

### 2.3. Combustion de carburant pulvérisé :

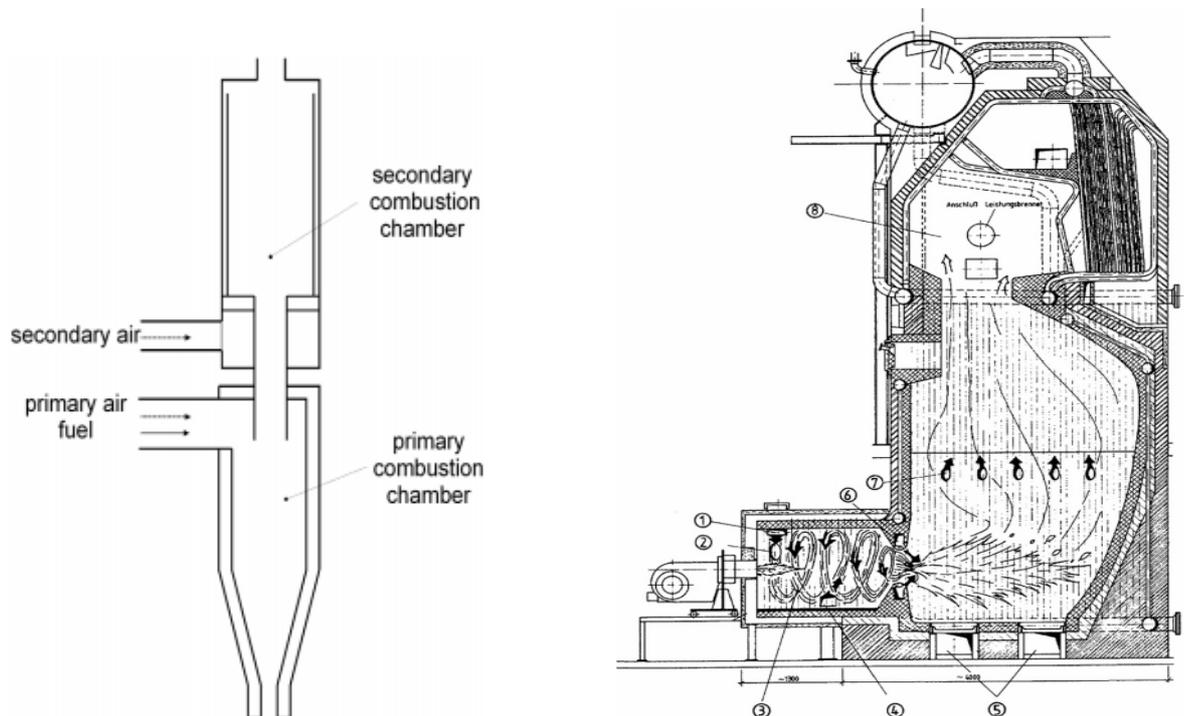
Dans les systèmes de combustion à combustible pulvérisé, les carburants sont injectés pneumatiquement dans le four. L'air d'injection est utilisé comme air primaire. Le démarrage du four est réalisé par un brûleur auxiliaire.

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).

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 21.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 21.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 21 :a)Brûleur cyclone à deux étages, b) Four à combustible pulvérisé en combinaison avec une chaudière à tube d'eau. [11]**

### 2.4. Réduction des émissions :

Les fours à biomasse présentent des émissions relativement élevées de  $\text{NO}_x$  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 ( $\text{O}_3$ ) et au  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_x$ , 36,5% à PM 10, seulement 2% à  $\text{CO}_2$  et 22,9% à tous les autres polluants ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  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 22). 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  $\text{CO}_2$  des trois combustibles.

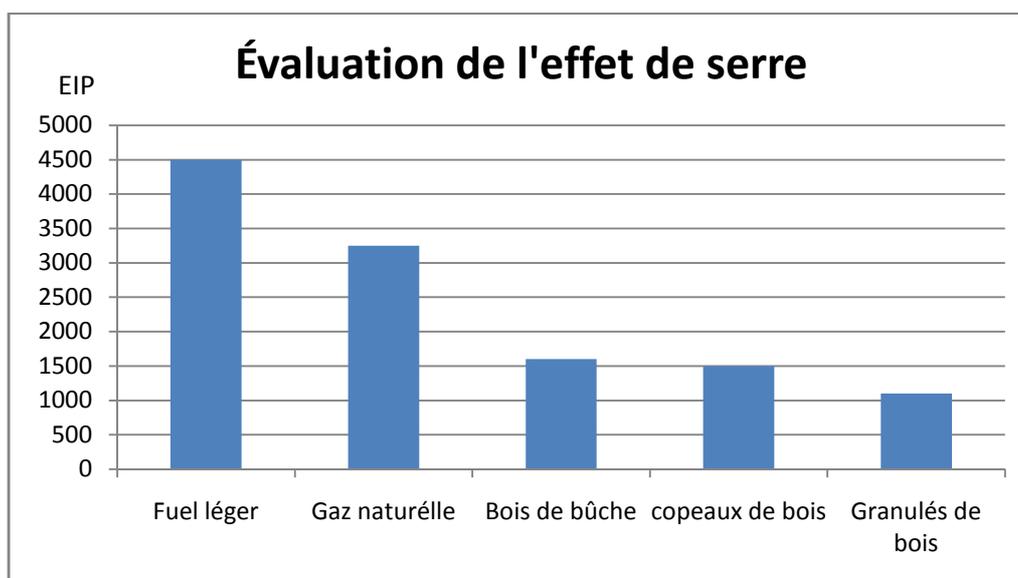


Figure 22: Points d'impact environnemental (EIP) pour différentes évaluations de l'effet de serre. [12]

#### 2.4.1 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 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  $\lambda$  (contrôleur CO /  $\lambda$ ) 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 ( $\lambda$  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.

### 2.4.2 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.

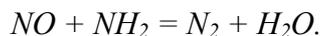
En outre, la chimie de réaction en phase gazeuse peut être mise en œuvre dans les codes CFD. Cependant, les réactions hétérogènes lors du séchage, du transport, de la dévolatilisation et de la gazéification de la biomasse solide avant d'entrer dans la combustion en phase gazeuse doivent également être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

### 2.4.3 Émissions des $\text{NO}_x$ :

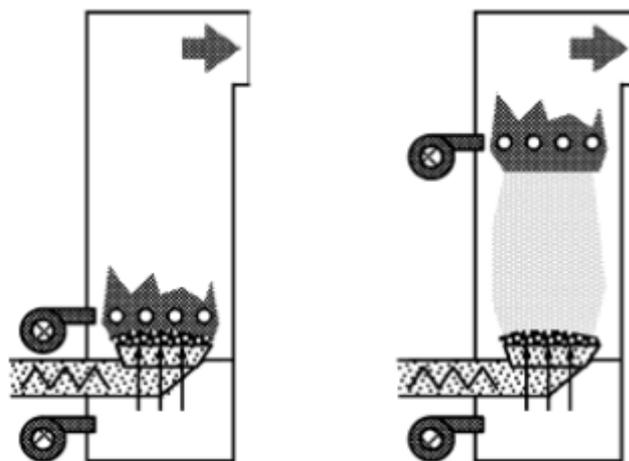
Dans les procédés de combustion, NO et  $\text{NO}_2$  (résumés comme  $\text{NO}_x$ ) peuvent être formés dans trois réactions différentes. Le  $\text{NO}_x$  thermique et le  $\text{NO}_x$  rapide sont formés à partir d'azote dans l'air à haute température et dans le cas d'un  $\text{NO}_x$  rapide en présence d'hydrocarbures. En outre, le  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$ , alors que les  $\text{NO}_x$  thermiques et rapides 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  $\text{NH}_i$  avec  $i = 0, 1, 2, 3$ . Ils peuvent être oxydés en  $\text{NO}_x$  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  $N_2$  dans des réactions telles que:

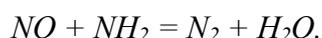


Au cours des 10 dernières années, les technologies de combustion mises en scène ont été développées comme une mesure primaire pour la réduction des  $NO_x$  internes des procédés basée sur ce concept, conduisant ainsi aux techniques décrites ci-dessus de mise en scène et de mise en marche du carburant (figure 23).



*Figure 23: Combustion Conventionnelle, Combustion par étage. [12]*

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  $NH_2$ . Le SNCR doit être appliqué dans une fenêtre de température étroite autour de  $820^\circ C$  à  $940^\circ C$ , 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  $250^\circ$  à  $450^\circ C$  et permet une réduction de  $NO_x$  supérieure à 95%.

Cependant, des concentrations pertinentes de produits secondaires indésirables tels que  $HNCO$ ,  $N_2O$ ,  $NH_3$ ,  $HCN$  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.

### 2.4.4 Émissions de particules :

La combustion de la biomasse conduit à des émissions relativement élevées de particules, c'est-à-dire bien supérieures à  $50 \text{ mg/m}^3$ . La majorité des particules sont inférieures à  $10 \mu\text{m}$  (PM 10) avec une forte proportion de particules submicroniques (inférieur à  $1 \mu\text{m}$  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 dé volatilisation. Si l'oxygène est disponible, la proportion élevée du potassium peut être oxydée. Comme les oxydes de potassium ont des températures de dé volatilisation 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 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  $160\text{-}195 \text{ mg/m}^3$  à  $20\text{-}45 \text{ mg/m}^3$  (13% de volume  $\text{O}_2$ ) (figure 24). Avec la plupart des combustibles étudiés, des émissions de particules inférieures à  $50 \text{ mg/m}^3$  (qui est la limite définie par la réglementation pour les émissions de particules) ont été obtenues.

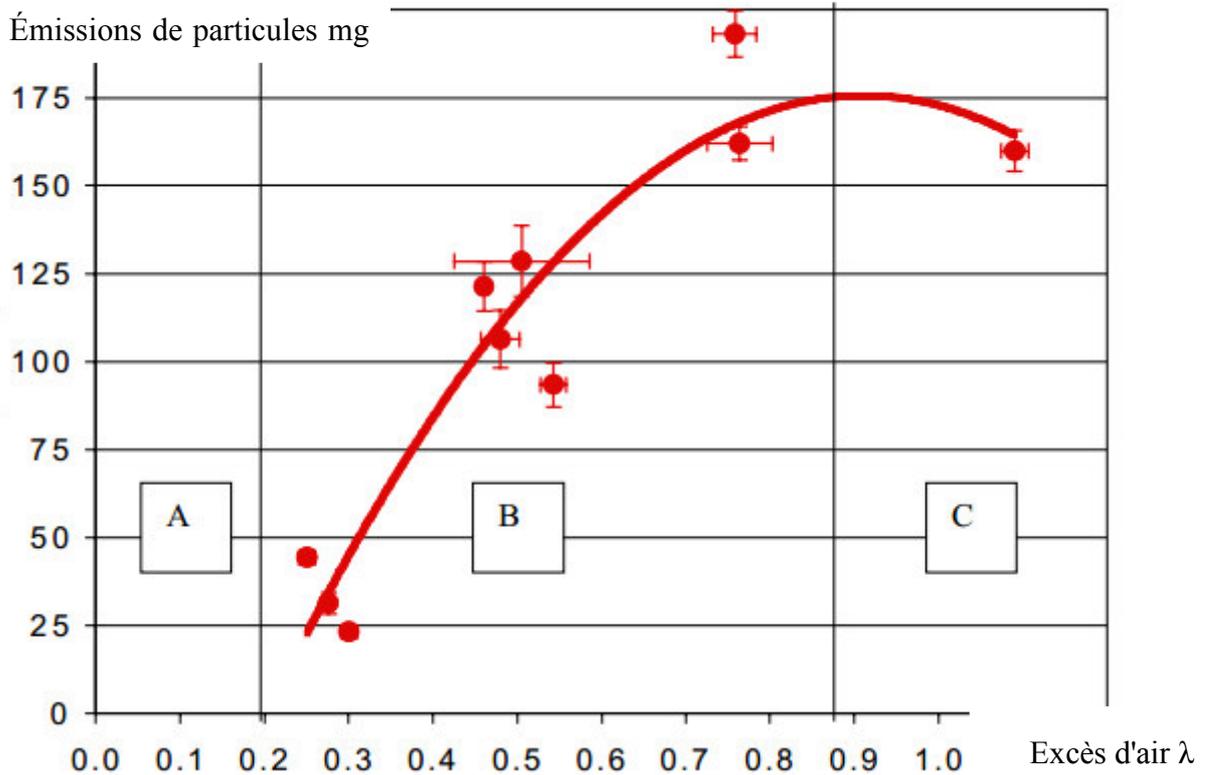
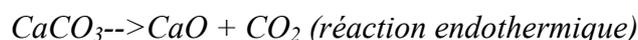


Figure 24: Les émissions de particules en fonction de l'excès d'air. [12]

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.

#### 2.4.5 Émissions de SO<sub>2</sub> :

La capture de soufre est réalisée en ajoutant du calcaire. Le calcaire est normalement dans la forme de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) avec des impuretés de carbonate de magnésium (MgCO<sub>3</sub>). Lorsque le calcaire est ajouté dans le lit du carburant circulant à haute température (843 à 899 ° C), le CaCO<sub>3</sub> subit des réactions endothermiques pour devenir CaO et CO<sub>2</sub>. Le soufre du carburant s'oxyde pour devenir SO<sub>2</sub>. En présence d'oxygène, le CaO réagit de manière exothermique avec SO<sub>2</sub> pour former CaSO<sub>4</sub> (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 / soufre, la réactivité calcaire, la température du four, le temps de séjour des gaz et des solides et la taille des particules de calcaire.

### 2.5. 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.

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).

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 peut 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:

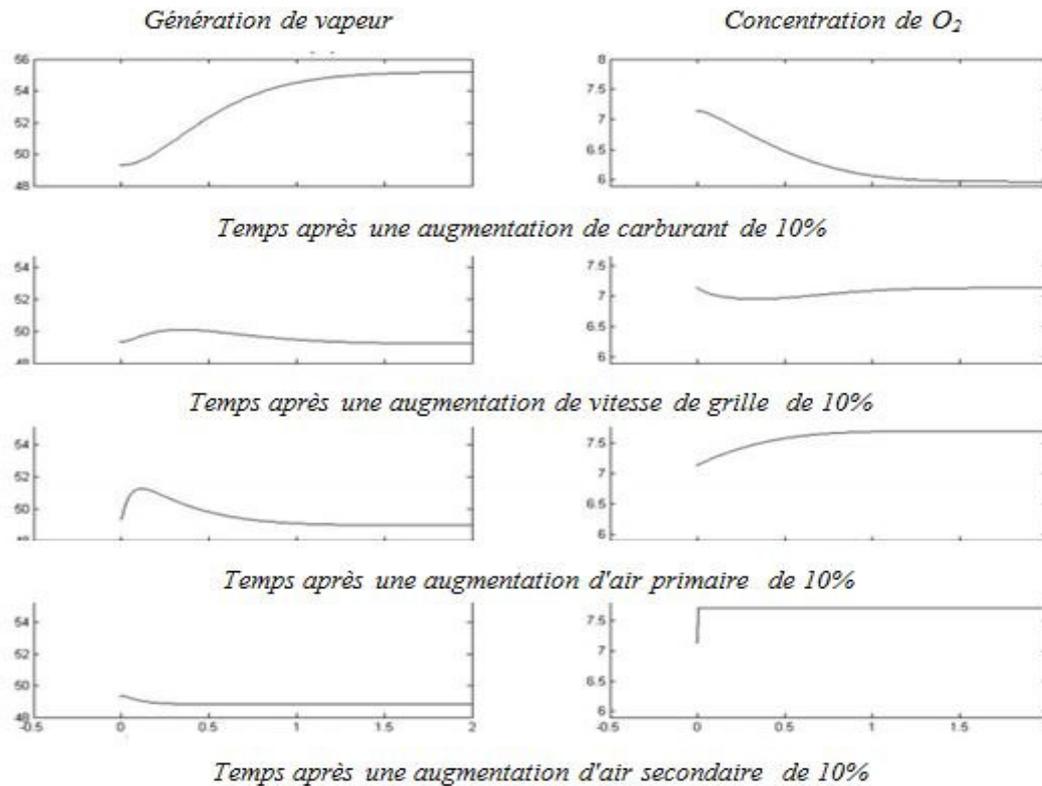
- Limites supérieures ou inférieures sur certaines variables en raison de restrictions environnementales ou de sécurité (par exemple, la pression maximale de vapeur dans le tambour à vapeur ou la concentration / température minimale d'oxygène dans les gaz de combustion pour éviter l'émission de CO ou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

### 2.5.1 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 25 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.



**Figure 25: 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. [11]**

La première rangée de la figure 25 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 env. 45 minutes correspondent 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 31 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 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.

### 2.5.2 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 ( $\lambda$ ), 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.

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.

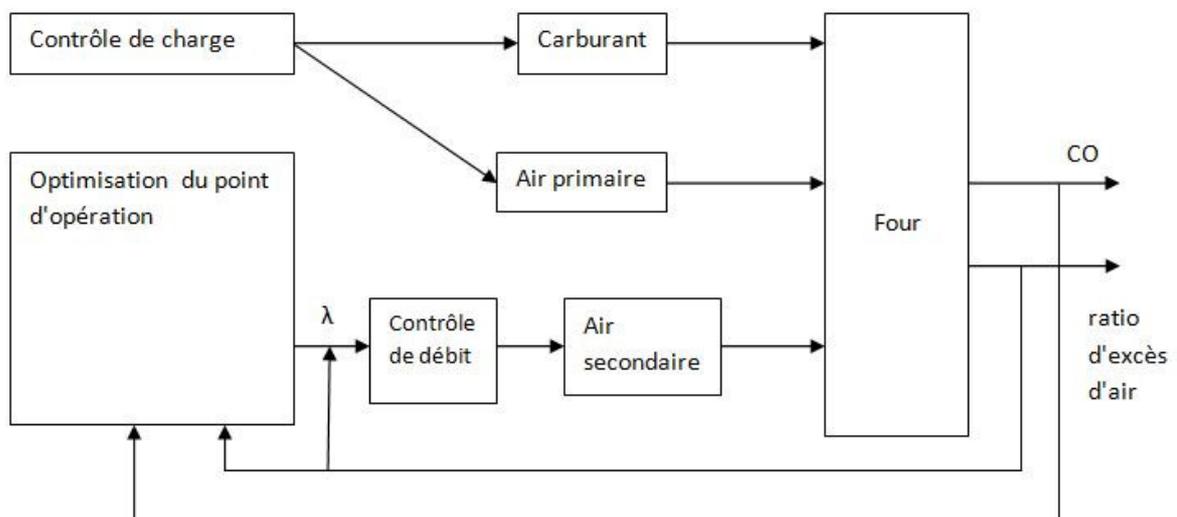


Figure 26: Schéma de principe du contrôle ( $CO / \lambda$ ) et contrôle de charge. [11]

Par conséquent, un contrôle combiné  $CO/\lambda$  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 ( $CO/\lambda$ ) et d'un contrôle de charge est illustré à la figure 26. 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.

### 2.5.2.1 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 basé sur des systèmes tels que des 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.

### 2.5.2.2 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, par exemple, la fabrication du verre, les bénéfices découlent principalement du contrôle strict de la qualité du produit, de l'augmentation de la 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 27 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.

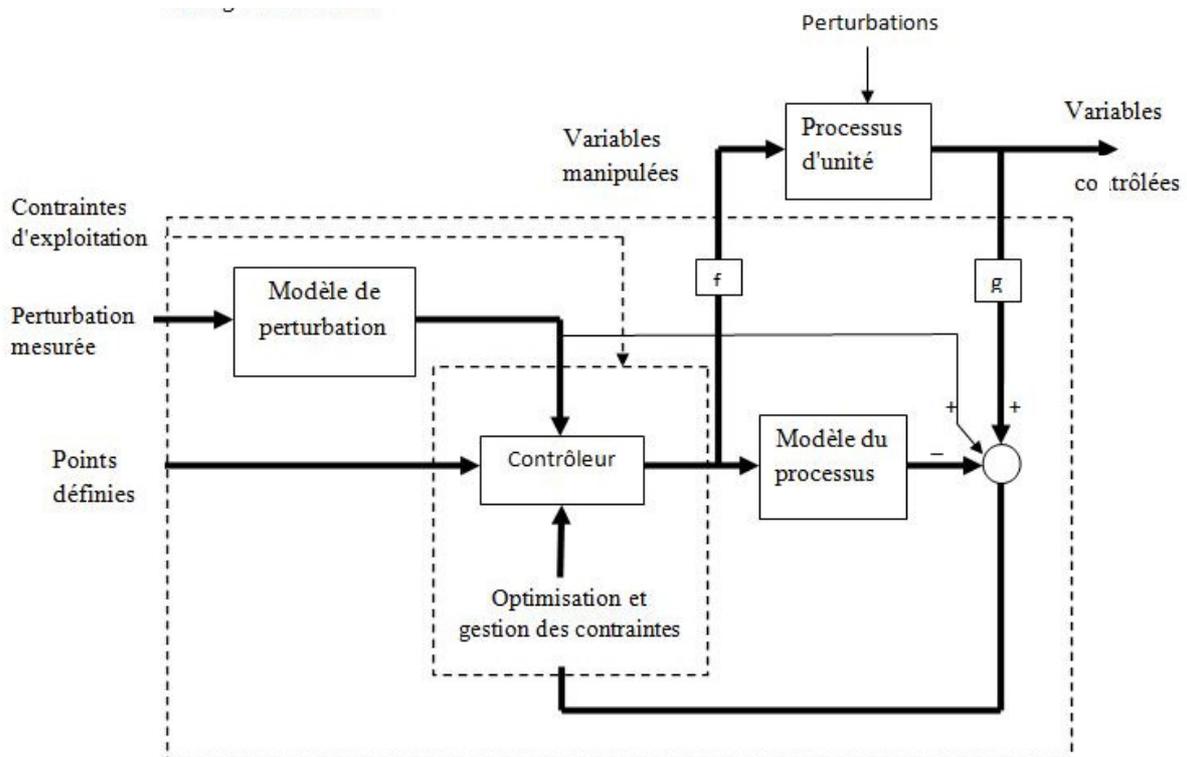


Figure 27: Schéma de principe du modèle de contrôle prédictif. [11]

De la figure 27, 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.

### 2.5.2.3 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.

### Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté 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.

# **Chapitre III :**

## **Introduction à la bioénergie.**

### Introduction:

La consommation d'énergie fossile qui a explosé au cours de ce siècle nous suggère qu'on est plus très loin d'épuisé les réserves de pétrole et de gaz naturelle. 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.

### 1. La biomasse :

La biomasse est l'ensemble des matières organiques de différentes origines (végétaux, les animaux ou encore les 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.

#### - **Avantage:**

- 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 CO<sub>2</sub> et de l'eau. Ce CO<sub>2</sub> et cette eau sont à nouveau disponibles pour la croissance des plantes et, par conséquent, le processus cyclique continu de faire de la biomasse, une source d'énergie renouvelable.
- 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. 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.

Les figures montrent 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].

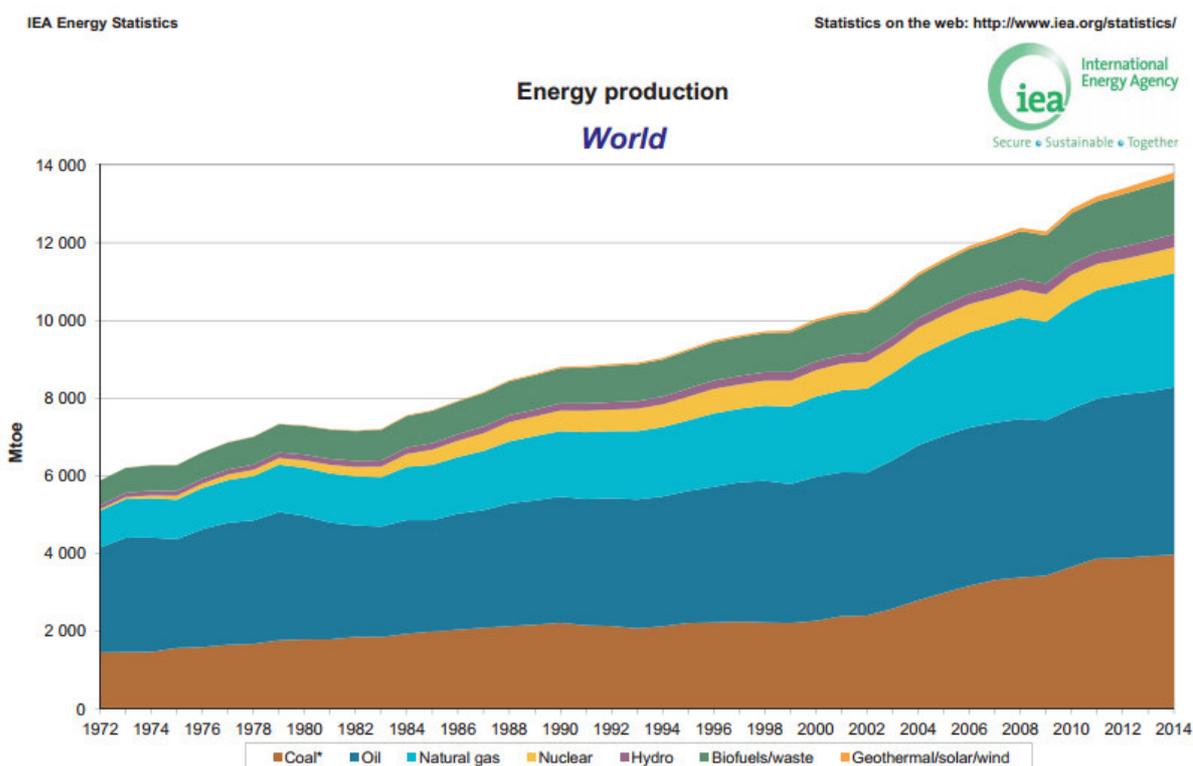
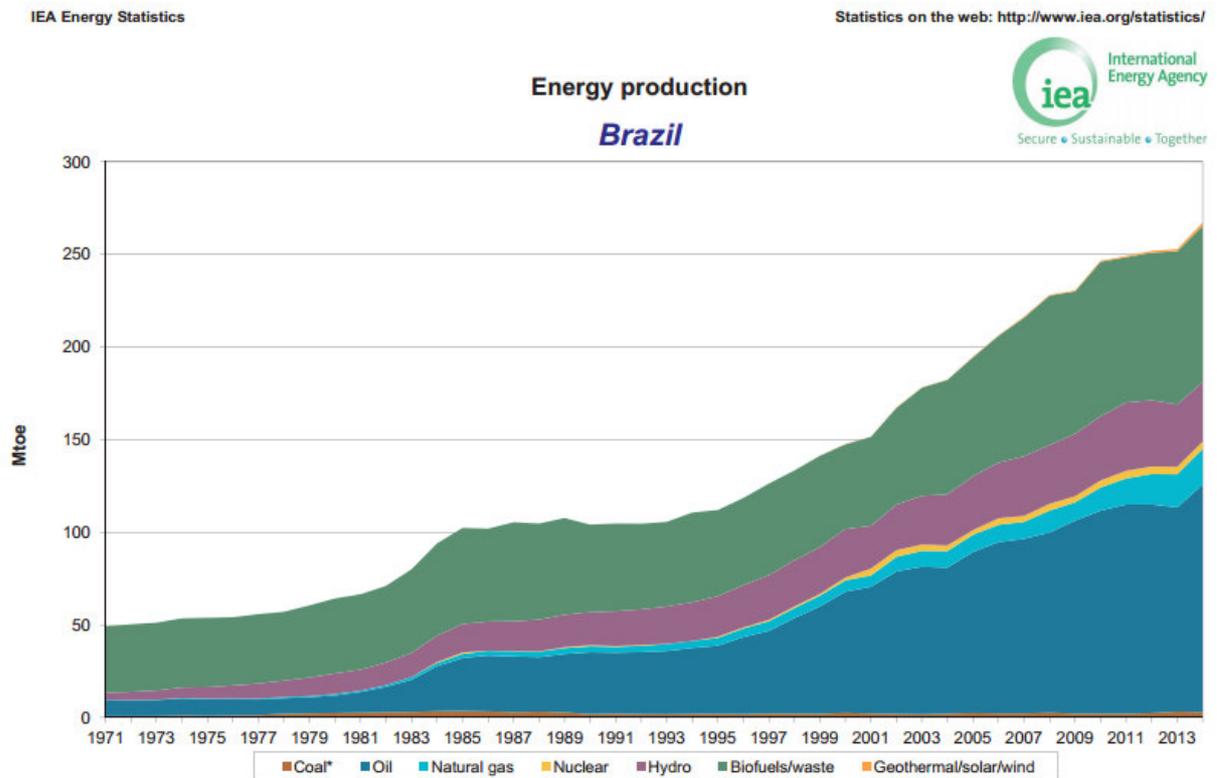


Figure 28. Production d'énergie dans le monde. [3]

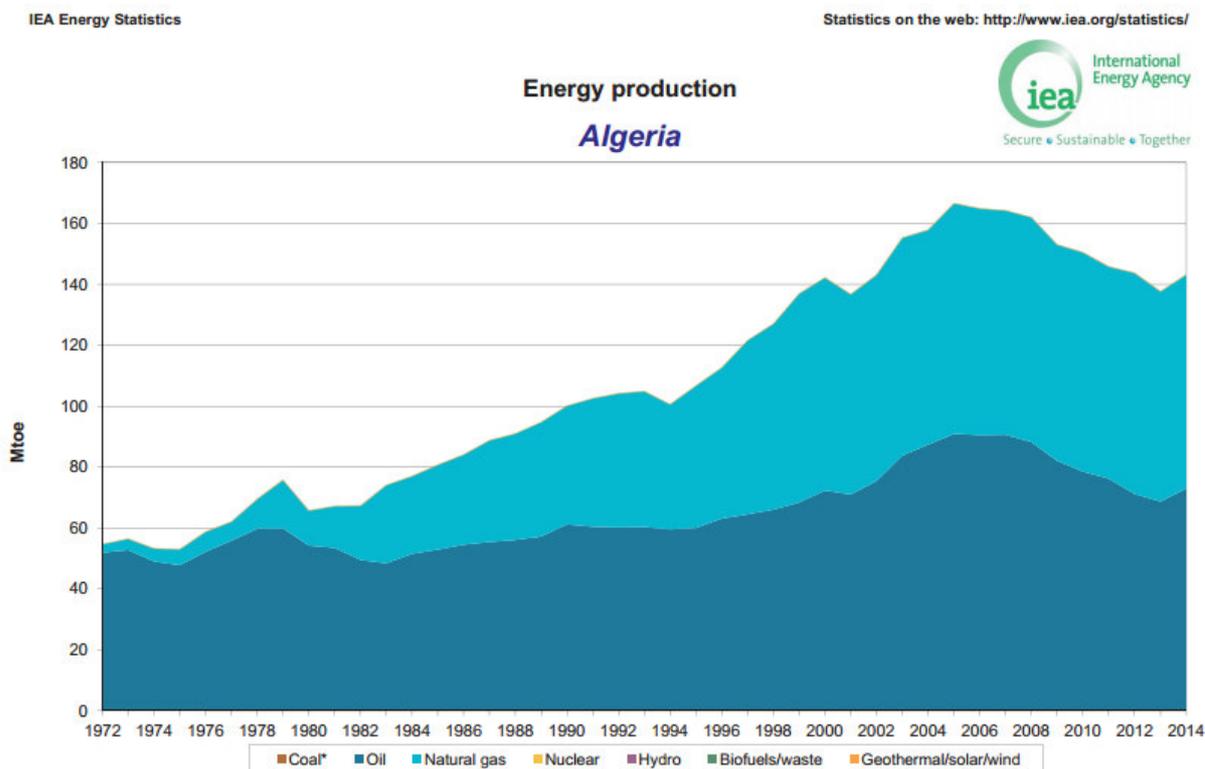
## Chapitre III : Introduction à la bioénergie

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



*Figure 29. 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 naturelle.



*Figure 30. Production d'énergie en Algérie. [3]*

### 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 produit: 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.

#### 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 constitué de cellule 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).

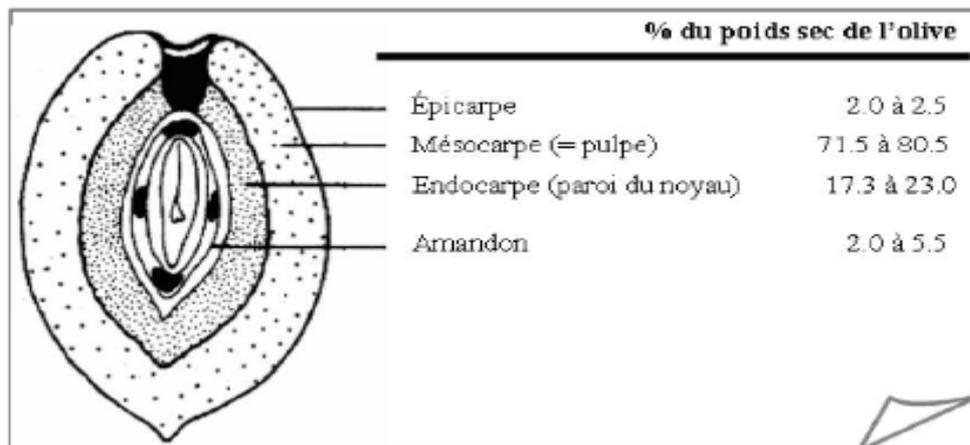


Figure 31. Section transversale et composition de l'olive.[4]

### 3.2. Procédé d'extraction d'huile d'olive :

#### 3.2.1. Procédés discontinus ou systèmes à presses :

Ce système, dont le processus d'extraction est illustré dans la figure 32, 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.

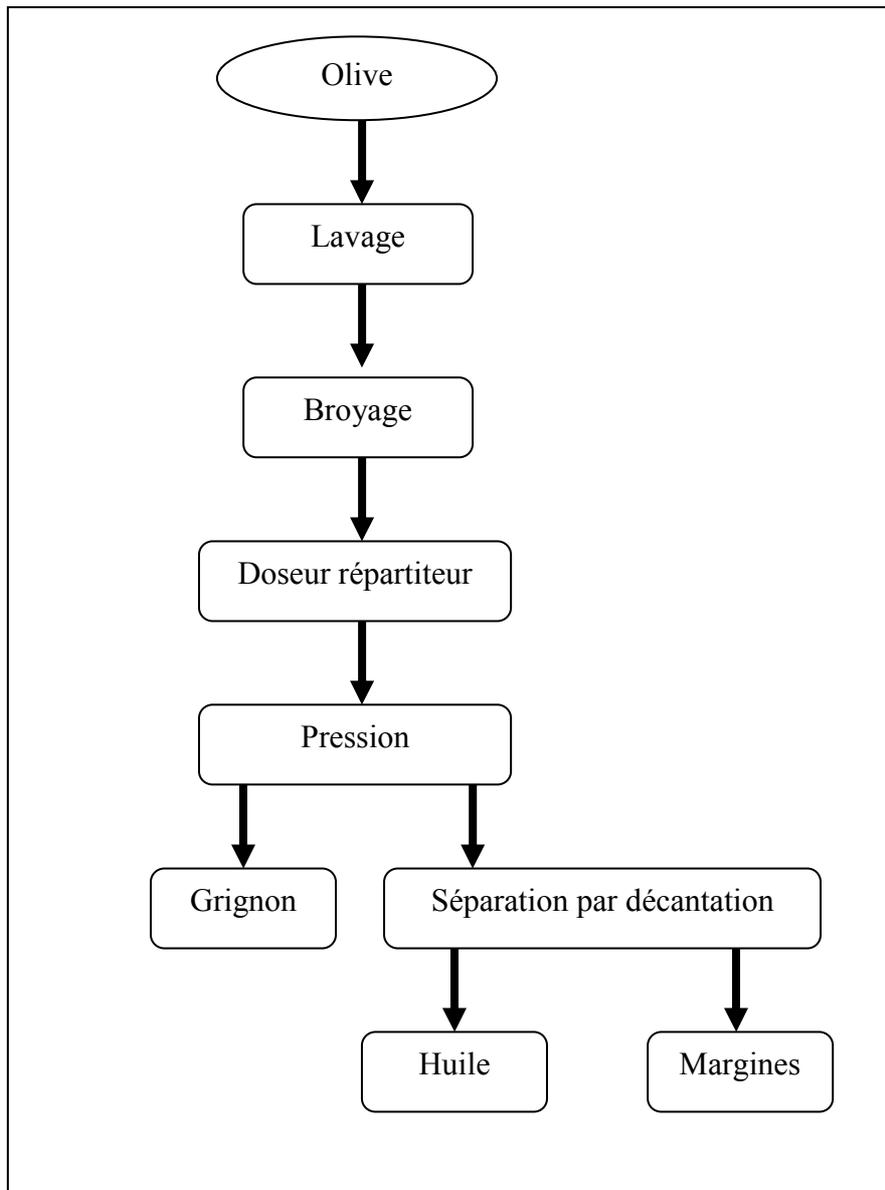


Figure 32. Procédés d'extraction d'huile par pression. [5]

### 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 33. a).

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 33 b).

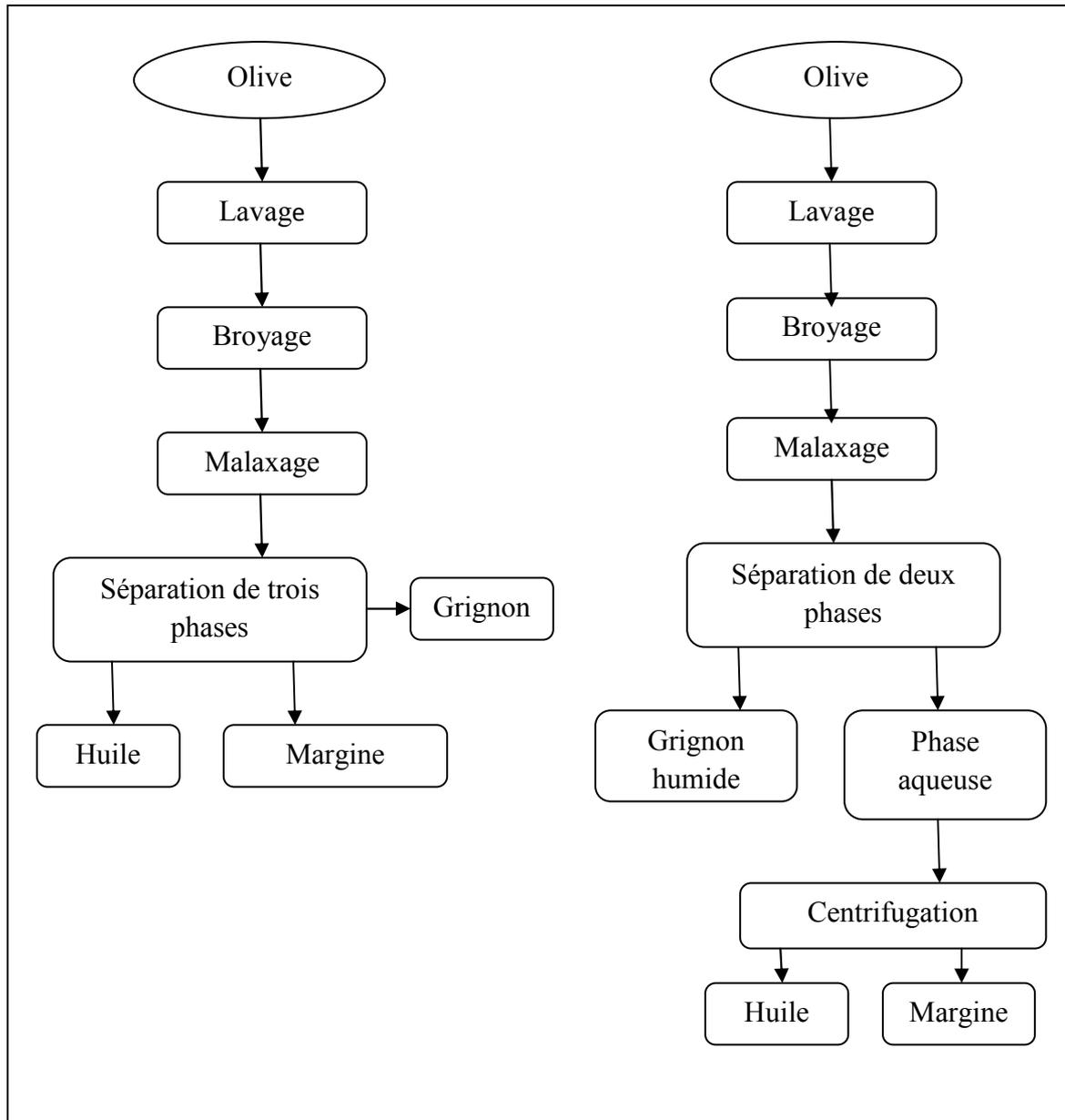


Figure 33. Procédés d'extraction d'huile d'olive par centrifugation, a) trois phases; b) deux phases. [5]

### 3.2.4. 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 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  $NOx$  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

*Tableau 1. Concentrations C, H, O, N et S dans le grignon d'olive en poids secs. [6]*

### 3.3. 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.

#### **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a 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.

# **Chapitre IV :**

## **Conception et dimensionnement d'une chaudière à biomasse.**

### **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.

#### **1. 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.

#### **2. Constituants principaux :**

- Corps chaudronné.
- Bruleur / ventilateur.
- Circuit d'alimentation en combustible.
- Circuit d'alimentation en liquide.

Sur chaque partie latérale se situe une ou deux ouvertures d'inspection.

Sur la partie latérale droite ou gauche suivant le sens de construction, se trouvent les indicateurs de niveau, le contrôle d'alimentation en eau et le contrôle de niveau.

En partie inférieure, se situent la trappe à suies, une ouverture d'inspection et la vidange du cendre.

#### **3. Chaudronnerie :**

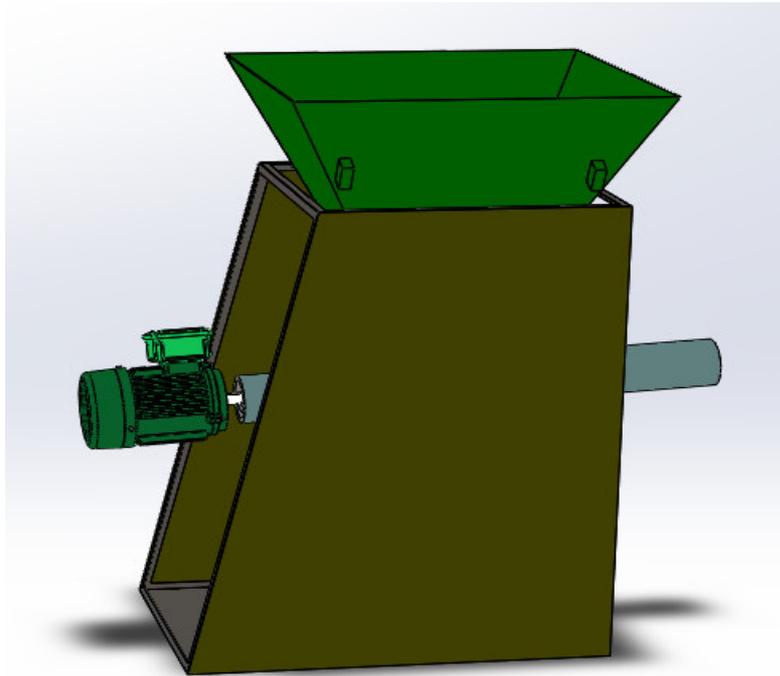
Le corps de la chaudière est réalisé en acier. Les éléments sont soudés par procédé automatique ou semi-automatique.

Il se présente sous la forme d'une enveloppe cylindrique.

#### **4. Eléments constituant la chaudière :**

##### **4.1. 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 rattaché 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.

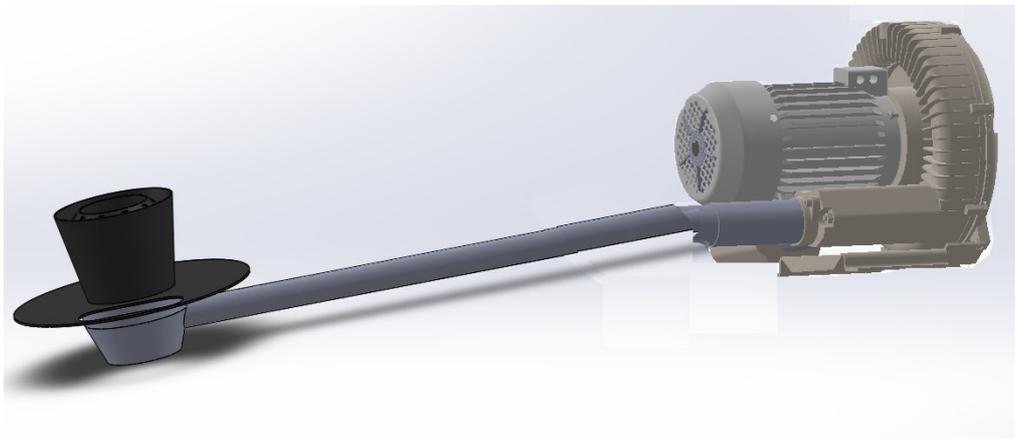


*Figure 34. Silo d'alimentation.*

#### **4.2. 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 définie dans la partie calcul préliminaires. Le circuit d'alimentation dans notre cas est un tuyau en Acier Inox 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.

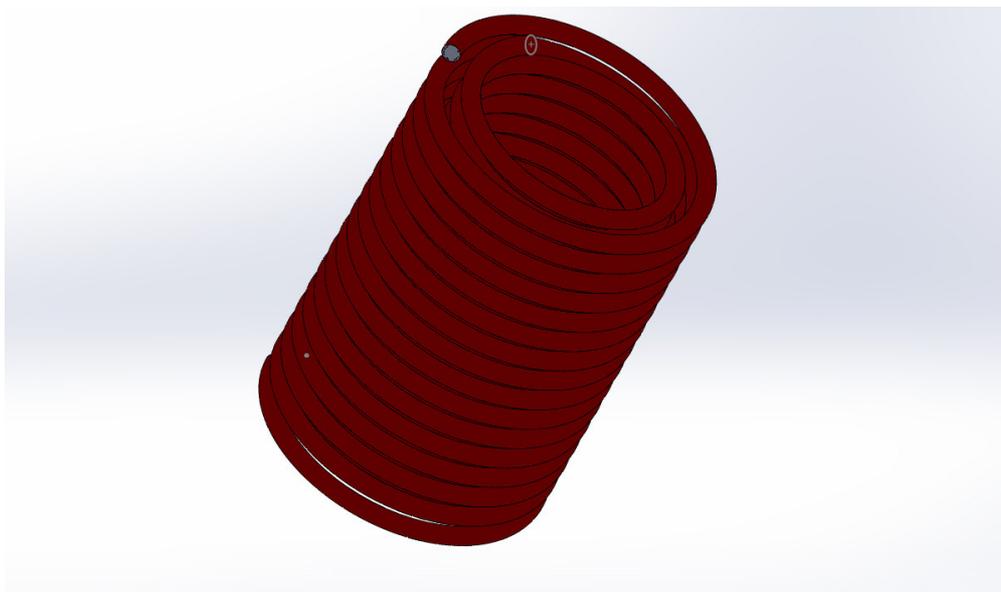
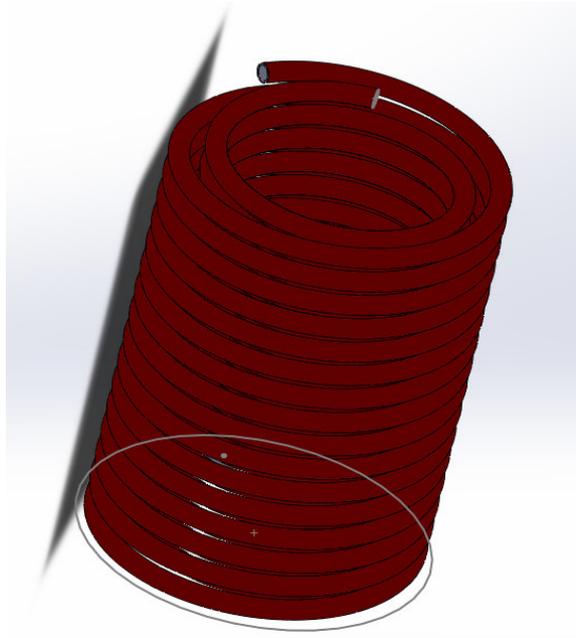


*Figure 35. Système d'alimentation en air.*

### 4.3. 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 choisie pour ce projet est un échangeur a tubes serpentine. Il est constitué de 16 révolutions, d'une hauteur de 500 mm et d'un diamètre des tubes de 15 mm.



*Figure 36. L'échangeur de chaleur.*

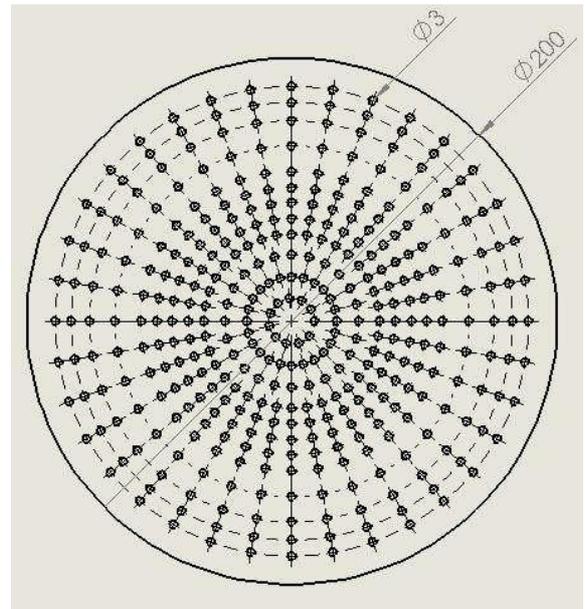
### 4.4. Grille et cendrier :

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 constituée d'une grille placée au dessus d'un cendrier pour évacuer les cendres, la figure montre le cendrier et la grille.



*Figure 37a) Cendrier.*



*b) Grille fixe.*

### 4.5. Vis sans fin :

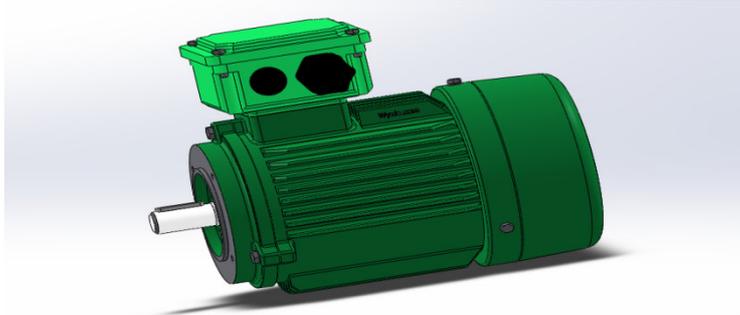
Cette sorte de vis est appelée vis d'Archimède et encore vis sans fin. Sa rotation entraîne les composantes de silo d'approvisionnement vers la chambre de combustion de la chaudière.

La vis est réalisée en matériaux mécano-soudé. Elle se compose d'un tube aux extrémités duquel sont soudés deux embouts.

La vis doit être tournée sur toute sa longueur afin que le profil extérieur soit bien cylindrique et s'ajuste correctement au diamètre intérieur du fourreau.

### 4.6. Moteur électrique :

Un moteur électrique est un dispositif qui permet la transformation d'une énergie électrique en travail ou énergie mécanique.



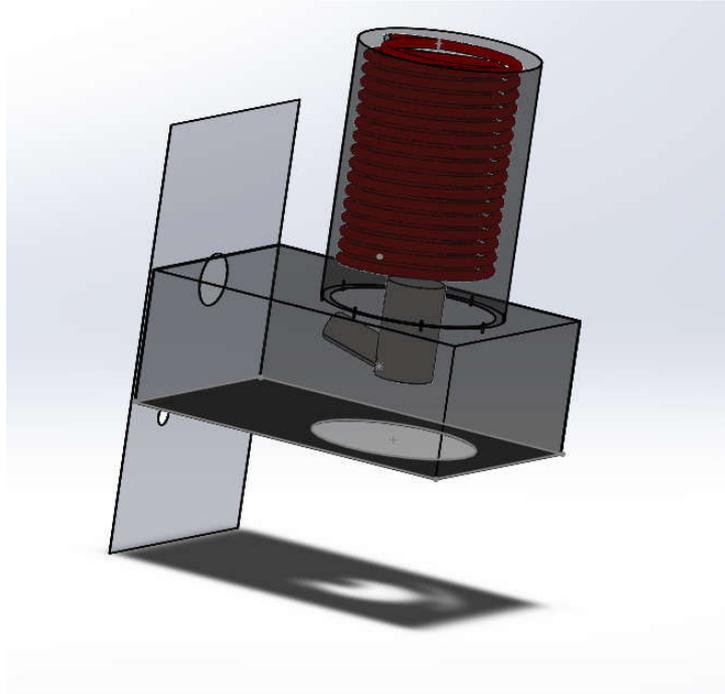
*Figure 38. Moteur électrique.*

La forme du courant, ses possibilités de tension et d'intensité seront les premières contraintes pour la détermination du choix d'un moteur.

Les sources de courant alimentant les moteurs sont le plus souvent de trois types : courant continue, courant alternatif monophasé et courant alternatif triphasé. Quand on peut compter sur un réseau solide de distribution multi-tensions alternatives (par ex : 380/220), toutes les solutions pourront être envisagées ; les progrès de la technologie permettent de transformer aisément du courant alternatif et d'en faire du courant continue.

### 4.7. 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 39 C'est le corps le plus exposé à la chaleur.



*Figure 39. 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, les pertes sont estimées à 3 kW.

Caractéristiques de la laine de verre :

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

### **5. Dimensionnement thermique de la chaudière :**

#### **5.1. 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.

Pour le calcul thermique de la chaudière, il y a lieu de calculer la surface d'échange, dimensionner le diamètre du foyer.

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.

### 5.1.1. Puissance thermique de chauffage :

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

$$PCI (h\%) = \left[ \frac{PCI (0\%) \times (100-h)}{100} \right] - 6 \times h \quad (\text{en KWh/t}).$$

Avec : PCI (0%) = conteneur énergétique moyen du bois sec, soit 5000 KWh/t.

-h = humidité relative (sur masse brute) du bois en pourcentage.

### 5.1.2. Débits du combustible et d'air :

- **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 négligeant 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.

- **Débits d'air :**

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

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

$$\dot{m} = n * \dot{m} = 0.7467 * \dot{m}$$

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

Température d'eau à l'entrée	= 20°
Température d'eau à la sortie	= 80°
Débit d'eau	$\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}$
Pouvoir calorifique inférieur	H = 12 J
Puissance calorifique	= 25087.2 W

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

### 6. Modélisation d'une chaudière à biomasse avec ANSYS FLUENT 15 :

#### 6.1. 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 Edit dans la partie configuration du projet.

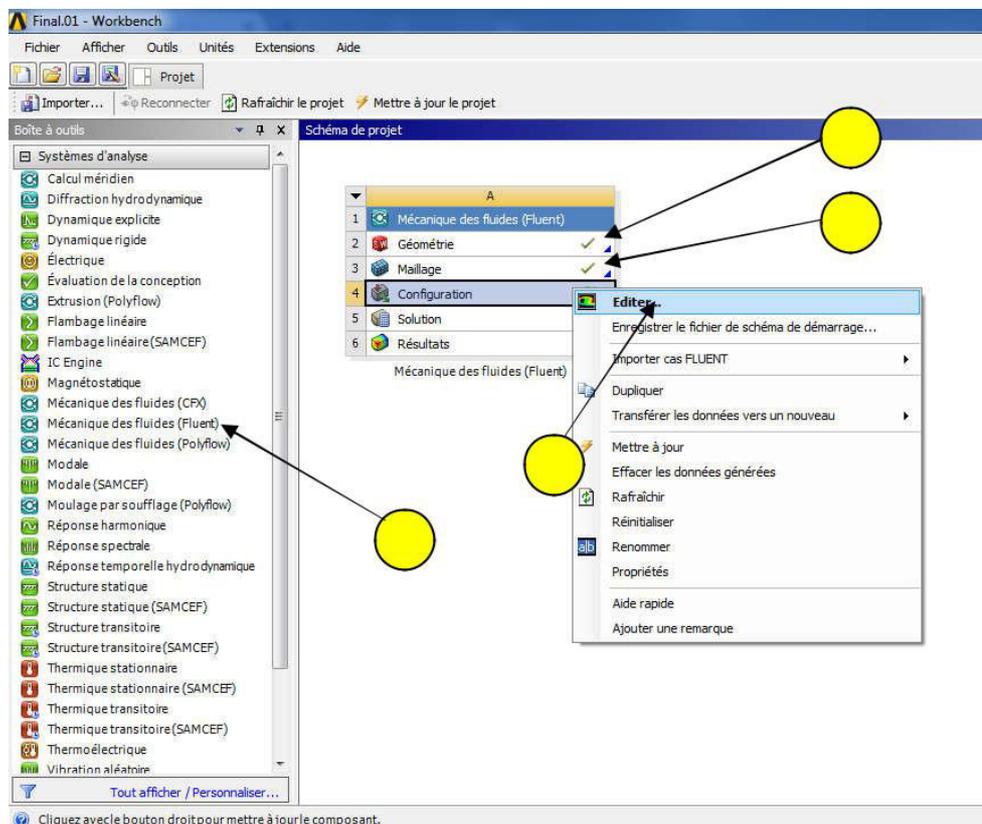
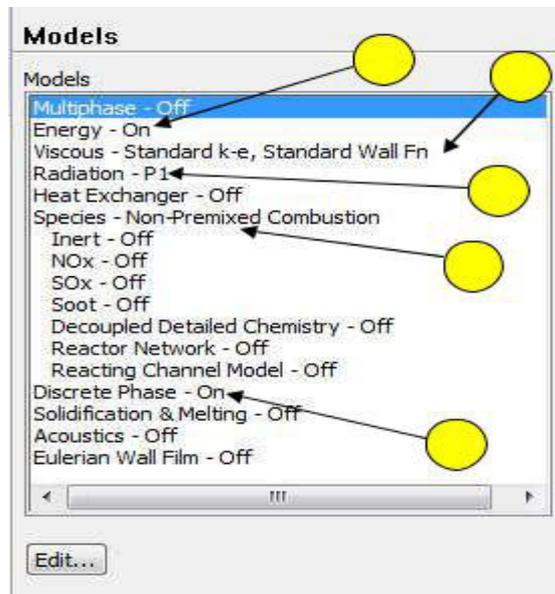


Figure 40: Fenêtre Principale de projet (ANSYS WORKBENCH).





**Figure 42: 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.

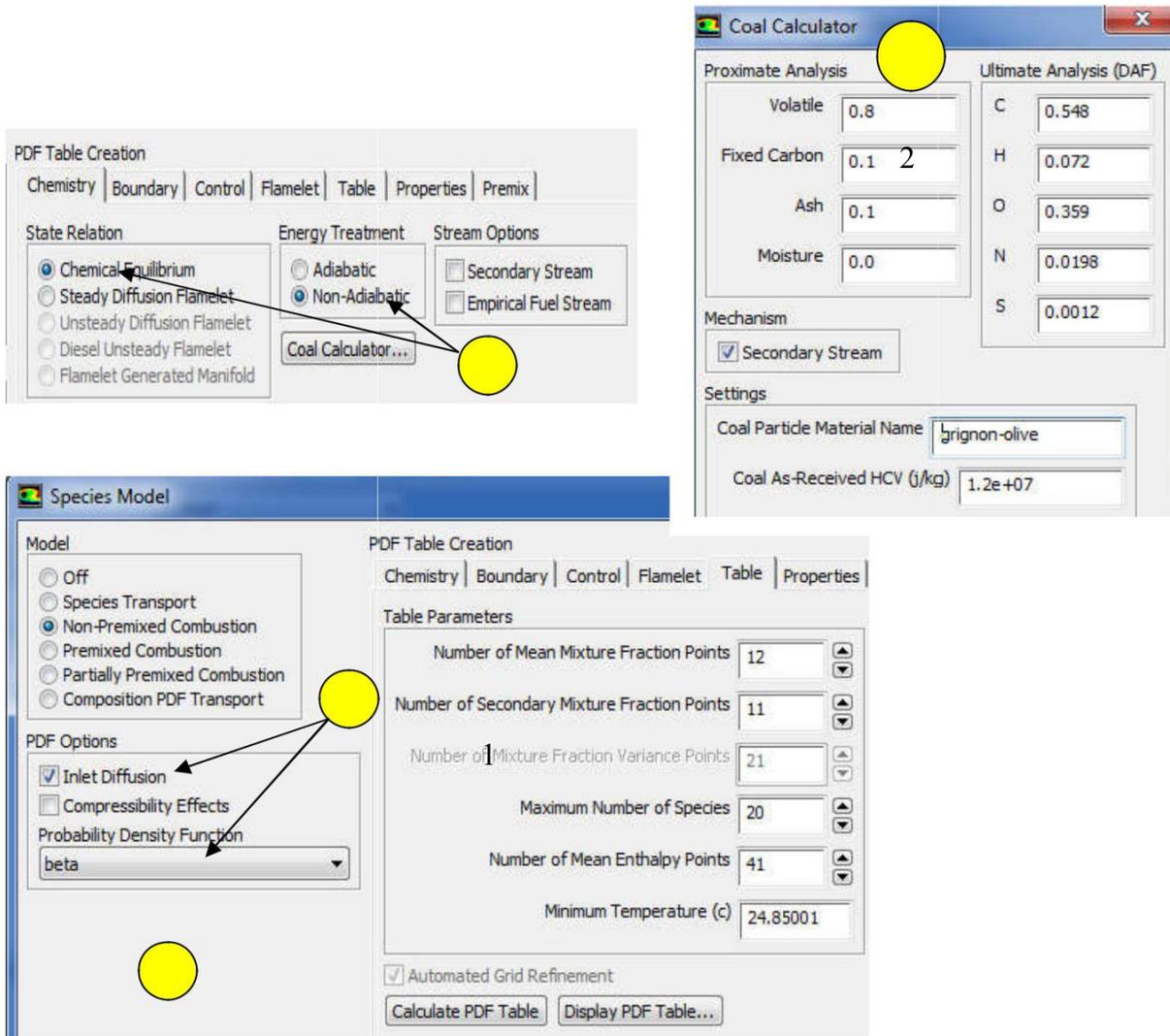


Figure 43: Fenêtres du modèle Non-Premixed Combustion.

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 Particale Radiation Interaction et Pressure gradient Force.
- Dans *Drag Parameters* choisir Spherical.
- Dans *Turbulent Dispersion* cocher Discrete Random Walk Model.

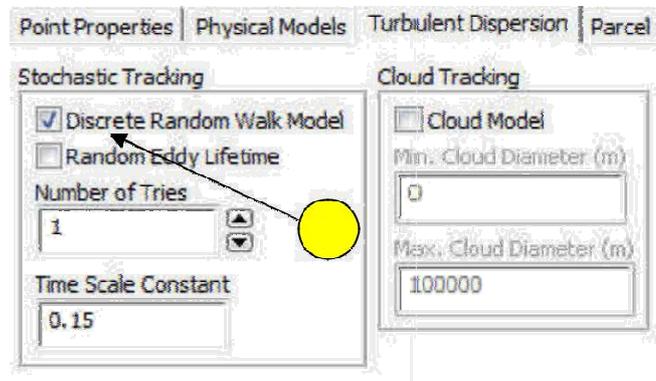
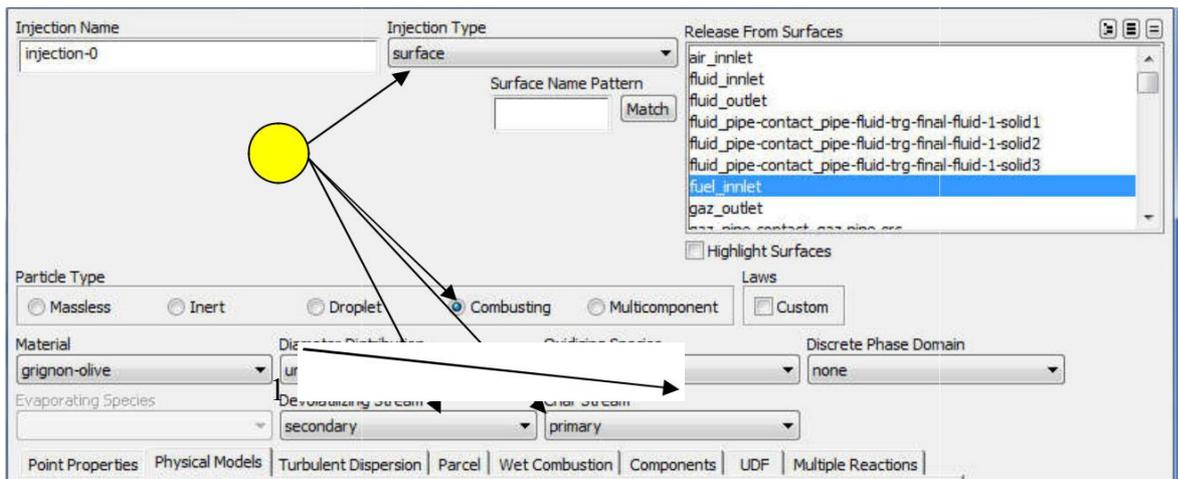
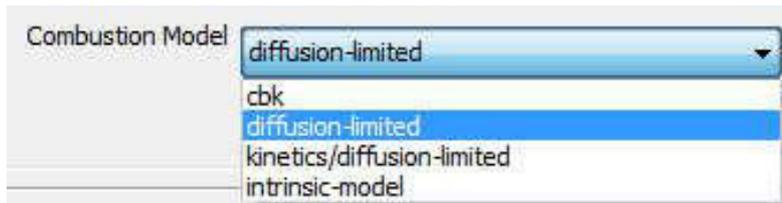


Figure 44: Fenêtres du modèle Discrete Phase.

Dans le menu Matériels:

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



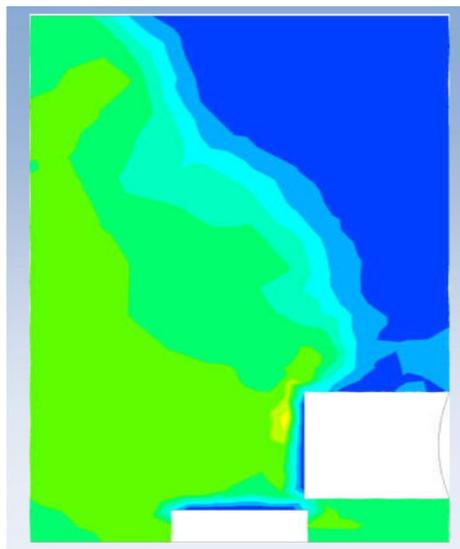
*Figure 45: Fenêtres Propriétés du menu Materials.*

### 6.2. Résultats :

ANSYS Fluent nous permet de récupérer les résultats des simulation 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.

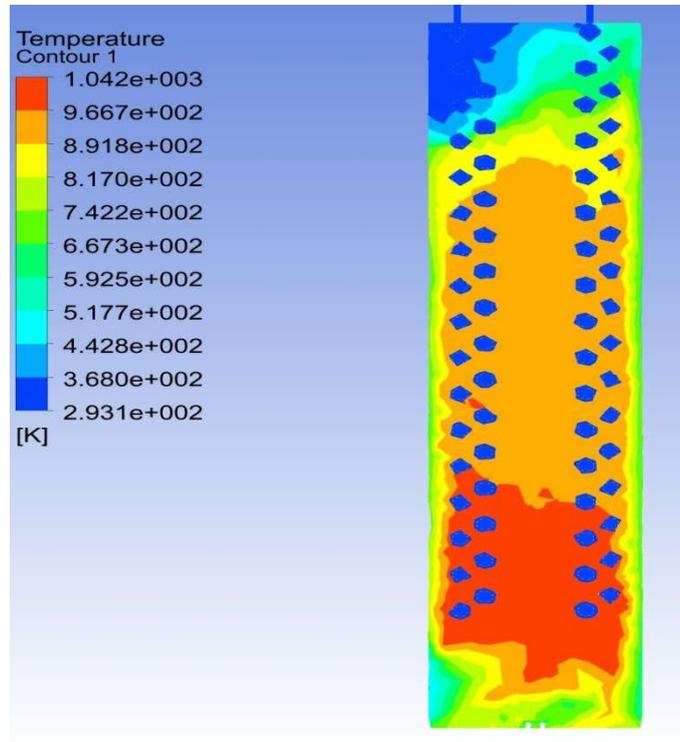
Pour récupérer les résultats sous forme graphique on lance dans WORKBENCH le module CFD-POST.

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 46 : Distribution de température sur un plan médian.*

La figure 47 montre la distribution de température dans la chaudière, le module CFD-POST indique plusieurs informations qui sont résumé dans la tableaux 02.



*Figure 47: Distribution de température dans la chambre de combustion.*

La surface d'échange fournie par le serpentín 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 rendement de la combustion de biomasse.

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.

### 7. Rendement d'une chaudière bois :

Deux types de rendement sont utilisés pour quantifier la performance de la chaudière :

#### 7.1. Rendement de combustion :

Le rendement de combustion est souvent exprimé par la formule suivante :

$$\text{Comb} = 100 - f \times (T_{\text{fumées}} - T_{\text{amb}}) / \% \text{CO}_2$$

- $T_{\text{fumées}}$  = la température des fumées à la de la chaudière [°C].

- $T_{\text{amb}}$  = température ambiante de la chaudière [°C].

- $f$  = facteur dépendent principalement du type de combustible.

#### 7.2. Rendement utile ou de production :

Ce rendement est établi pour une durée de fonctionnement déterminée, et défini comme le rapport entre l'énergie fournie en sortie de chaudière (mesurée par un compteur de calories) et l'énergie contenue dans le combustible :  $\text{utile} = P_u / P_a$  ou :

- $P_u$  = puissance utile de la chaudière ou puissance fournie à l'eau de chauffage.

- $P_a$  = puissance contenue dans le combustible = débit de combustible x son pouvoir calorifique PCI.

### Conclusion :

Dans ce chapitre on à présenter les constituants principaux de la chaudière réalisé, puis on à présenter Dimensionnement thermique de la chaudière et enfin on à présenter brièvement le prototype puis la procédure à suivre sur le logiciel Fluent pour en fin conclure avec l'interprétation des résultats.

# Chapitre V :

## **Principe de fonctionnement de la chaudière biomasse.**

### **Introduction :**

Les coûts d'énergie de plus en plus importants peuvent lourdement grever le budget des ménages, fermes, infrastructures (centres sportifs, écoles, autres bâtiments communaux) et entreprises. La recherche de sources d'énergies alternatives peut donc intéresser les particuliers, pouvoirs publics et acteurs économique prévis.

### **1. L'énergie renouvelable :**

#### **Définition :**

Les énergies sont dites « renouvelables » tant qu'elles dépendent du système écologique de la terre, de l'isolation et de l'énergie géométrique de la terre. En pratique, les sources énergétiques renouvelables font allusion à :

- La puissance hydraulique ;
- L'énergie biomasse ;
- L'énergie solaire ;
- L'énergie géothermique ;
- L'énergie de mer.

Dans le contexte, toutes les formes d'énergie renouvelable seront traitées mais nous ne ferons qu'esquisser très brièvement l'énergie de la mer et la géothermie parce qu'elles ne sont pas encore exploitées ou que le potentiel y est très faible.

La capacité de l'atmosphère à absorber sans danger de la substance toxique est depuis longtemps dépassée. L'utilisation de pétrole, de gaz naturel, de charbon et d'uranium comporte encore d'autres risques : ces ressources sont seulement disponibles en quantité limitée, leurs prix sont en forte augmentation et elles créent des dépendances politique et économique. Grace aux énergies renouvelables, nous disposons de sources d'énergie qui peuvent être utilisées sans qu'elles émettent de substances toxiques, et qui renouvellent constamment par des processus naturels si bien que, mesurée à l'échelle de la vie humaine, elles seront disponibles à l'infini.

Les pays qui entameront cette transition vers les énergies renouvelables de bonne heure devraient y gagner davantage par rapport aux retardataires en en matière d'énergie renouvelable. Donc, un jour le recours aux énergies renouvelable sera indispensable et ceci sera du davantage à des problèmes environnementaux qu'à l'épuisement du pétrole brut.

### 2. L'énergie renouvelable la plus utilisée : l'énergie biomasse.

Dans le domaine de l'énergie, le terme biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie.

La biomasse est une source renouvelable lorsqu'elle est utilisée et gérée de façon durable.

Elle permet de réduire la quantité de déchets envoyés aux sites d'enfouissement.

Grâce à la combustion de matières inutilisables telles l'écorce, les déchets de construction (non traités), on peut produire de l'énergie utile, et il est moins nécessaire d'élargir les sites d'enfouissement locaux. Elle peut apporter des solutions à l'enjeu du changement climatique.

En effet, la solution biomasse aide à la gestion des déchets solides. Chaque jour, des millions de tonnes de déchets solides sont produit, dont notamment les déchets biodégradables.

Lorsque les déchets sont utilisés comme biomasse, on répond à deux demandes : la baisse de la pollution et l'augmentation des ressources énergétiques.

L'utilisation de l'énergie biomasse n'augmente pas les émissions atmosphériques de dioxyde de carbone, une des principales sources de gaz à effet de serre, grâce aux cycles de repousse des plantes et des arbres. Elle peut également réduire les émissions de méthane, un autre gaz à effet de serre, qui provient de la décomposition de matière organique.

#### 2.1. Le bois comme les grignons d'olive est une énergie renouvelable :

Le bois est une source d'énergie locale, naturelle et renouvelable par photosynthèse. Le combustible bois est consommé par tous sur la planète et peut être considéré comme inépuisable. Sa consommation raisonnée n'entame pas le patrimoine des générations futures et permet d'économiser les énergies fossiles dont les stocks sont limités ( pétrole, gaz, charbon, uranium). La durée de reconstitution du bois est de loin la plus rapide en comparaison avec les autres énergies fossiles.

Energie	Durée de reconstitution
Bois	De 15 à 200 ans
Charbon	De 250 à 300 millions d'années
Pétrole	De 100 à 450 millions d'années

**Durée de reconstitution de différentes énergies.**

L'utilisation du bois-énergie contribue aussi fortement à la lutte contre le réchauffement climatique (effet de serre) puisque à la différence des énergies fossiles, elle recycle dans l'atmosphère le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) absorbé par les forêts.

Le bois-énergie constitue en outre une excellente valorisation des sous-produits et déchets de la filière bois.

Enfin, cette ressource participe à la gestion rationnelle de nos forêts et donc, à la qualité des paysages et au maintien des équilibres hydrauliques et climatique.

**2.2.PCI du bois :**

Le PCI du bois énergie varie essentiellement en fonction de son essence et de son taux d'humidité. La formule suivante donne le PCI moyen des feuillus durs en fonction du taux d'humidité :

Formule en KWh/t :

$$PCI (h\%) = \left[ \frac{PCI (0\%) \times (100-h)}{100} \right] - 6 \times h$$

Avec : -PCI (0%) = conteneur énergétique moyen du bois sec, soit 5000 KWh/t.

-h = humidité relative (sur masse brute) du bois en pourcentage.

<b>Humidité (%)</b>	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>PCI (KWh/t)</b>	5000	4720	4440	4160	3880	3600	3320	3040	2760	2480	2200	1920	1640

**PCI du bois (KWh/t) en fonction de l'humidité relative (%).**

**2.3.Emission de CO<sub>2</sub> évitées :**

Ci-dessous sont donnés les ratios d'émission de CO<sub>2</sub> évitées grâce à une chaufferie bois selon le combustible remplacé.

<b>Combustible</b>	<b>g CO<sub>2</sub>/ KWhu</b>
Gaz naturel	228
Fioul domestique	299
Fioul lourd	319
Charbon	427
Electricité	50

**Emission de CO<sub>2</sub> évitées.**

### 3. Principe de fonctionnement d'une chaudière biomasse :

Le bois, sous forme de plaquettes ou copeaux de quelque centimètre de long ou bien les grignons d'olive, arrive dans le foyer de la chaudière depuis un silo d'alimentation ou une trémie, par l'intermédiaire d'une vis sans fin, actionnée par un moteur électrique. La différence entre une trémie et un silo réside dans le fait que la première demande des chargements fréquents, car de faible capacité, parfois manuels. Le silo d'alimentation est à l'inverse de grande capacité et est installé à l'extérieur de la chaudière, ou dans local attenant à cette dernière. Les silos disposent de ressort-racleurs permettant de récupérer plus facilement les plaquettes.

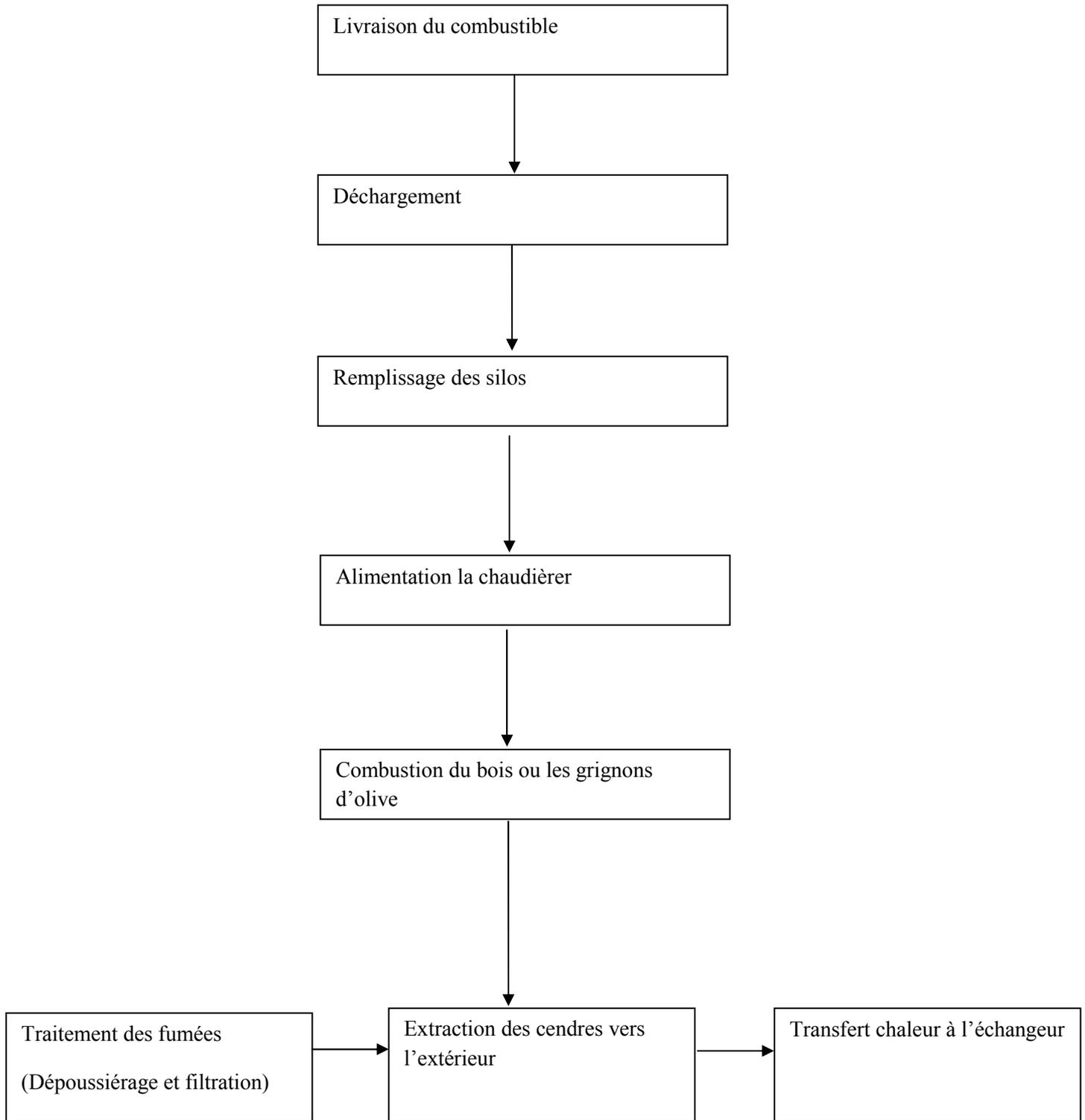
Depuis le silo d'alimentation jusqu'au foyer de la chaudière, l'automatisation est complète :

L'alimentation en combustible et en air régulée automatiquement ce qui permet une combustion optimale et une grande souplesse d'utilisation tout en minimisant l'émission de substances polluantes. La fourniture de chaleur est régulière.

La quantité de cendres produites est très faible (1 à 2 % du bois consommé) grâce au haut rendement de combustion de ces chaudières.

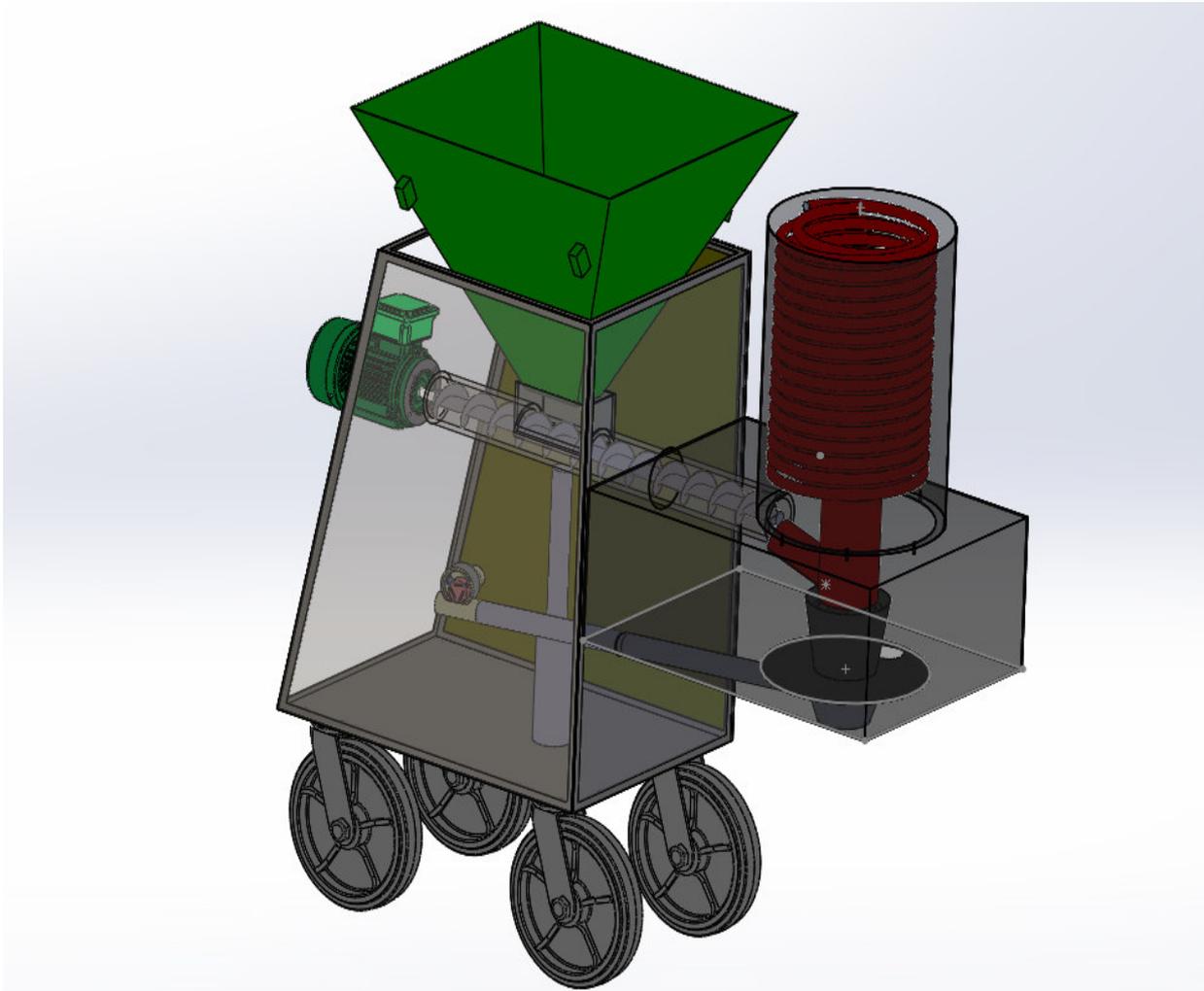
La qualité du combustible est importante ; Les plaquettes doivent être le plus homogène possible et ne pas comporter de « queues de déchiquetage », morceaux de bois difformes et très long, qui peuvent bloquer la vis sans fin. Le taux d'humidité doit être proche de 25 % taux obtenu après plusieurs mois de séchage des plaquettes ou des grignons d'olive, sous hangar.

Le principe de fonctionnement d'une chaudière biomasse peut s'expliquer à partir du logigramme suivant :



Logigramme du principe de fonctionnement d'une chaudière biomasse

La figure suivante présente les différents éléments d'un ensemble chaudière biomasse :



**Figure 48. Éléments de chaudière biomasse.**

### 3.1. Chaudière biomasse :

La chaudière (ou plus précisément le générateur de chaleur) est une enceinte dans laquelle la combustion se déroule : l'énergie contenue dans le combustion est libérée et transmise au fluide caloporteur (eau chaud principalement). Elle est généralement composée de deux éléments principaux : le foyer et l'échangeur de chaleur entre les fumées et les fluides caloporteurs.

La combustion du bois est une réaction chimique avec dégagement de chaleur s'effectuant en quatre phases :

- Le séchage.
- La pyrolyse (dégagement des gaz inflammables).
- L'oxydation des gaz.
- La combustion du résidu carbonneux.

Ces quatre vont se réaliser dans la chaudière de manière horizontale mais également verticale.

La réaction complète se résume de la manière suivante :

**Bois + Oxygène de l'air**  $\longrightarrow$  **Fumées (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) + Chaleur.**

### 4. Rendement d'une chaudière biomasse :

Deux types de rendement sont utilisés pour quantifier la performance de la chaudière :

#### 4.1. Rendement de combustion :

Le rendement de combustion est souvent exprimé par la formule suivante :

$$\text{Comb} = 100 - f \times (T \text{ fumées} - T_{\text{amb}}) / \% \text{ CO}_2$$

Ou :

-T<sub>fumées</sub> = la température des fumées à la de la chaudière [°C].

-T<sub>amb</sub> = température ambiante de la chaudière [°C].

-f = facteur dépendent principalement du type de combustible.

On relève les trois éléments clés de cette formule qui doivent être mesurés :

1. La température des fumées.
2. La température ambiante de la chaudière, qui correspond à la température de l'air aspiré par le brûleur. La différence de température entre l'air de la chaufferie et les fumées symbolise la chaleur perdue dans la cheminée.
3. Le pourcentage de CO<sub>2</sub> contenu dans les fumées, qui se calcule à partir de la mesure de la quantité d'oxygène encore présente dans celles-ci, par la formule :

$$\% \text{ CO}_2 = \% \text{ CO}_2, \text{ max} \times (21 - \% \text{ O}_2) / 21.$$

Où:

$\% \text{ O}_2$  : la teneur en oxygène mesurée dans les fumées [%] .

$\% \text{ CO}_2, \text{ max}$  : la teneur en  $\text{CO}_2$  des fumées si la combustion était idéale.

La détermination de ce rendement permet de s'assurer de fonctionnement optimal de la chaudière en temps réel, et de valider les paramètres de réglage de celle-ci, il est généralement

Compris entre 85 et 92 %.

### 4.2. Rendement utile ou de production :

Ce rendement est établi pour une durée de fonctionnement déterminée, et défini comme le rapport entre l'énergie fournie en sortie de chaudière (mesurée par un compteur de calories) et l'énergie contenue dans le combustible : utile =  $P_u / P_a$  ou :

- $P_u$  = puissance utile de la chaudière ou puissance fournie à l'eau de chauffage.

- $P_a$  = puissance contenue dans le combustible = débit de combustible x son pouvoir calorifique PCI.

Il s'agit d'un rendement instantané qui peut varier en fonction des conditions d'exploitation de la chaudière. Le fabricant doit pouvoir fournir sa valeur à charge nominale et dans des conditions de combustion idéales (rendement nominal) dans leur documentation technique.

La différence entre la puissance utile fournie à l'eau ( $P_u$ ) et la puissance contenue dans le combustible est constituée de pertes :

- Vers la chaufferie : la chaudière, malgré l'isolation des parois, se comporte comme un radiateur qui émet de la chaleur vers l'ambiance de la chaufferie.
- Si le compteur de calories est situé dans une sous-station distante de la chaufferie, le rendement obtenu prend en compte les pertes liées à la distribution de la chaleur (circuit primaire).

### 4.3. Rendement global :

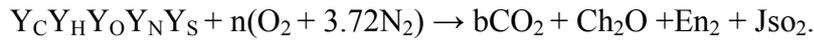
Au final, le rendement global de la chaufferie intègre, outre les pertes de production de chaleur par la chaudière, les pertes liées à la distribution de la chaleur et à la régulation :

**Rendement global d'exploitation = rendement de production X rendement de distribution X rendement de régulation.**

Les ordres de grandeur généralement constatés pour ces rendements sont les suivants :

- Rendement de production : 80 à 85 % ;
- Rendement de distribution : 92 à 98 % ;
- Rendement de régulation : 94 à 96 % ;
- Rendement global d'exploitation : 70 à 80 %.

**5. Equation de la réaction de combustion du grignon d'olive:**



Avec  $Y_X$ : la fraction massique de l'élément X dans le grignon d'olive donné dans le chapitre 2.

**Remarque:**

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

$$\{Y_C = b\}$$

$$\left\{c = \frac{Y_H}{2}\right\}$$

$$Y_O + 2n = 2b + c + 2j \quad \Longrightarrow \quad n = b + \frac{c}{2} + j + \frac{Y_O}{2}$$

$$Y_N + 2 \times 3,72 \times n = 2e \quad \Longrightarrow \quad e = \frac{Y_N}{2} + 3,72 \times n$$

$$Y_S = j$$

Ce qui nous donne comme résultat:

$$b = 0,548$$

$$c = 0,036$$

$$n = 0,7467$$

$$e = 2,787424$$

$$j = 0.0012$$

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

$$\dot{m}_{air} = n \times \dot{m}_{cmb} = 0,7467 \times \dot{m}_{cmb}$$

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.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre on va commencer de discuté sur les énergies renouvelables en générale, puis on à discuté sur la biomasse (grignon d'olive) comme énergie des pauvres. Enfin présent les étapes du principe de fonctionnement de la chaudière à biomasse réaliser.



**Conclusion générale.**

### 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 introduits 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.

# Nomenclatures

---

## **Symbole :**

- $T_e$  : température d'entré. (C°)
- $T_s$  : température de sortie. (C°)
- $S$  : surface d'échange. (m<sup>2</sup>)
- $K$  : le coefficient de transmission thermique moyen. (K)
- $P_e$  : pression en entré chaudière. (bar)
- $P_s$  : pression en sortie chaudière. (bar)
- PCI : pouvoirs calorifiques. (KJ/kg)
- $\dot{m}_{\text{bois}}$  : débit massique. (kg/s)
- $\dot{m}_e$  : débit massique eau. (kg/s)
- $J$  : La densité de flux diffusif (Quantité physique scalaire/m<sup>2</sup>.s)

## **Abréviations:**

CFD : ComputationalFluidDynamic.

SCR: Réduction sélective catalytique.

PDF: Fonction de densité de probabilité.

LCA:Evaluation du cycle de vie.

LCA:Evaluation du cycle de vie.

LES : Large Eddy Simulation.

TNO: Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée.

SNCR: Réduction sélective non catalytique.

MPC: Modèle de contrôle prédictif.

CLF: Combustion à lit fluidisé.

LFB:Lit fluidisé à bulles.

LFC:Lits fluidisés circulants.

PM: Particule de matière.

## Références et bibliographique

---

### Ce qu'il faut savoir sur la chaudière biomasse - Prime Eco ...

<https://www.prime-eco-energie.auchan.fr> > ... > *Le chauffage au bois*

### Les chaudières biomasse : caractéristiques, fonctionnement ...

[www.m-habitat.fr](http://www.m-habitat.fr) > *Chaudières* > *Chaudières nouvelle génération*

<https://chauffage.ooreka.fr> > Choisir son chauffage > À la loupe

### Chauffage par biomasse - Définition et avantages | Réseau RESPIRE

[respire-habitat.com/entreprise-chauffage-biomasse/](http://respire-habitat.com/entreprise-chauffage-biomasse/)

Sumer B.Darbude ; Biomasse technologie.

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie 2007 ; Les émissions atmosphériques de la combustion de biomasse.

International Energy Agency ; Energy statistics for 2014.

Amadou Mamadou 2001 ; PFE, Département génie mécanique ; Etude d'un chauffage domestique utilisant comme combustible le grignon d'olive.

[1]: Sumer B.Darbude ; Biomass Technology.

[2]: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie 2007; Les émissions atmosphériques de la combustion de biomasse.

[3]: International Energy Agency ; Energy statistics for 2014.

[4]: Amadou Mamadou 2001 ; PFE; Département Génie Mécanique; Etude d'un chauffage domestique utilisant comme combustible le grignon d'olive.

[5] : H.EL Hajouji ;2007. Thèse de doctorat ; Evolution des caractéristiques physico-chimiques, spectroscopiques et écotoxicologiques des effluents d'huileries d'olives au cours de traitements biologique et chimique.

[6] : Institute of Chemical Engineering, Fuel and Environmental Technology ; The BIOBIB database for biomass fuels ; <http://cdmaster2.vt.tuwien.ac.at/biobib/biobib.html>.

[7]: Vladimir Strezov Tim J. Evans: Biomass Processing Technologies.

[8]: Norbert Peters :2010, Combustion Theory.

[9]:SamySadaka, Donald M. Johnson: Biomass Combustion.

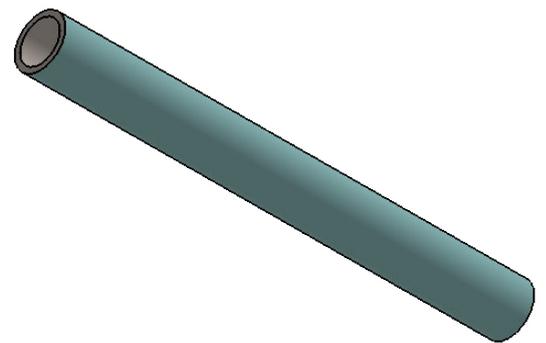
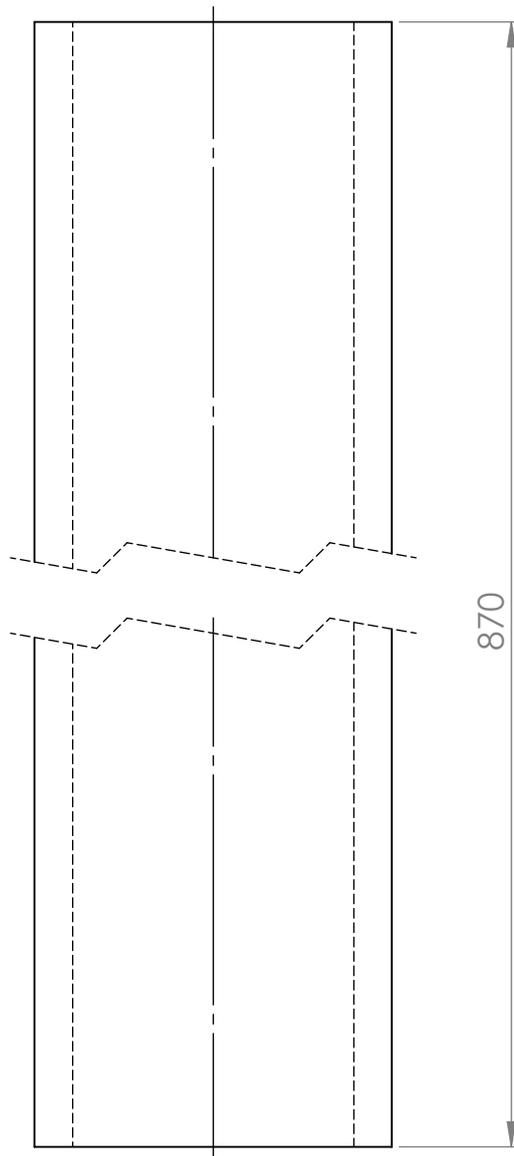
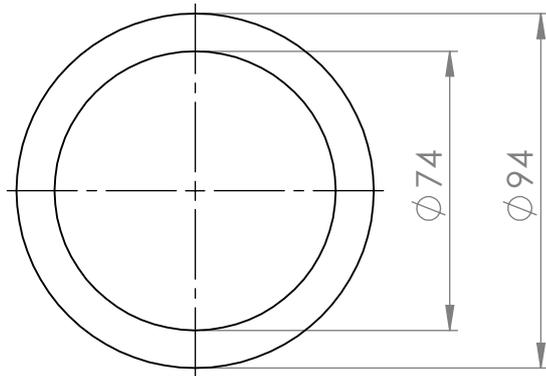
[10]:SamySadaka, Donald M. Johnson: Biomass Combustion.

[11]:Sjaak van Loo and JaapKoppeja: The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring.

[12]: Thomas Nussbaumer: 2003, Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction.

# ANNEXES

# **ANNEXES -A-**



UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

MESO15

MODELISATION ET SIMULATION EN MECANIQUE

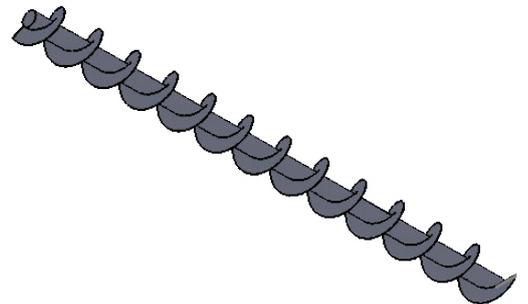
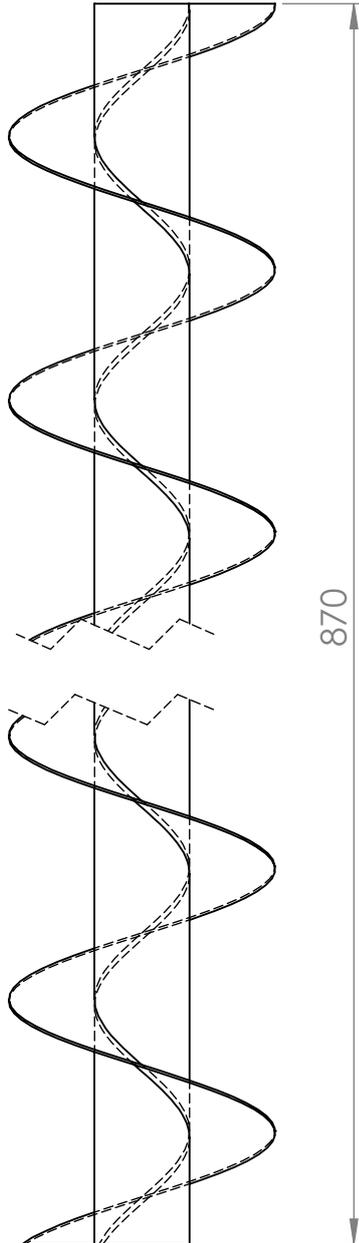
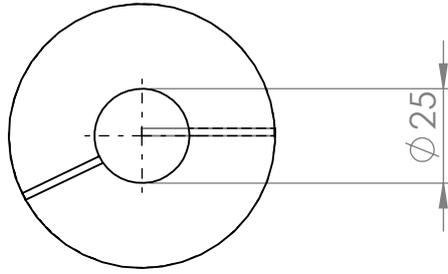
ÉCHELLE : 1/2

**Conduite vis  
sans fin**

**ALIOUANE AEK**

Année 2016\2017





UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

MESO15

MODELISATION ET SIMULATION EN MECANIQUE

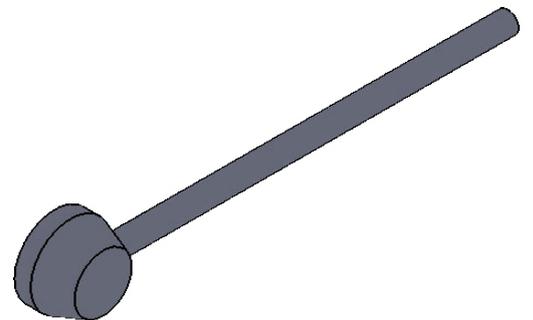
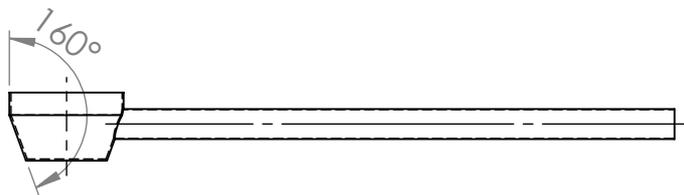
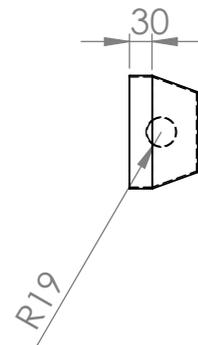
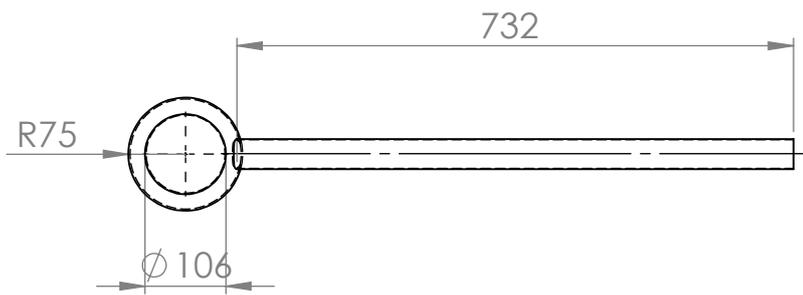
ÉCHELLE : 1/1

**vis sans fin**

**ALIOUANE AEK**

Année 2016\2017





UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

MESO15

MODELISATION ET SIMULATION EN MECANIQUE

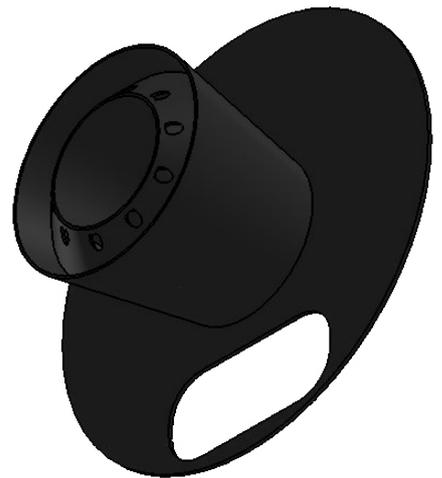
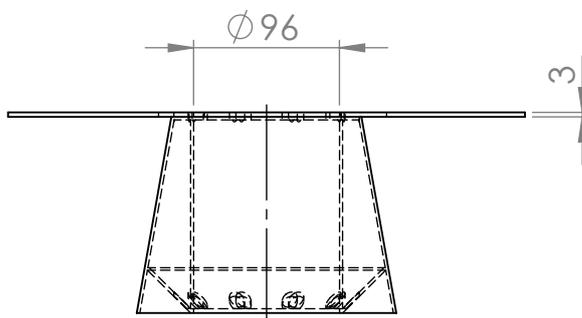
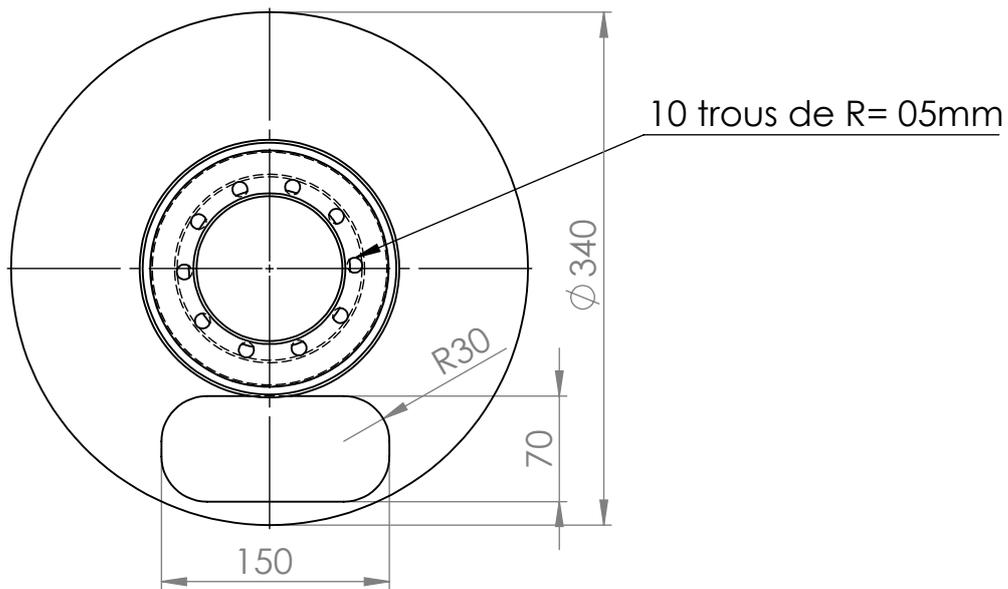
ÉCHELLE : 1/10

Conduite d'air

ALIOUANE AEK

Année 2016\2017





UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

MESO15

MODELISATION ET SIMULATION EN MECANIQUE

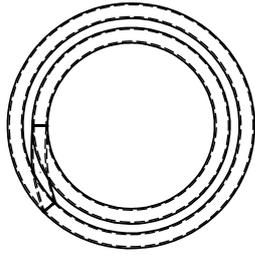
ÉCHELLE : 1/5

**Diffuseur**

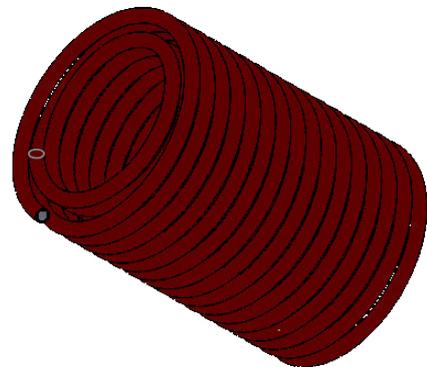
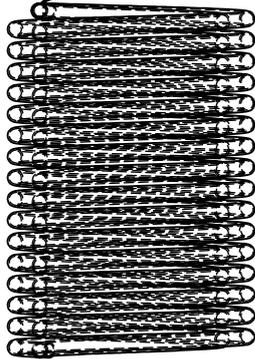
**ALIOUANE AEK**

Année 2016\2017





Langeur = 800mm et R=10mm



UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

MESO15

MODELISATION ET SIMULATION EN MECANIQUE

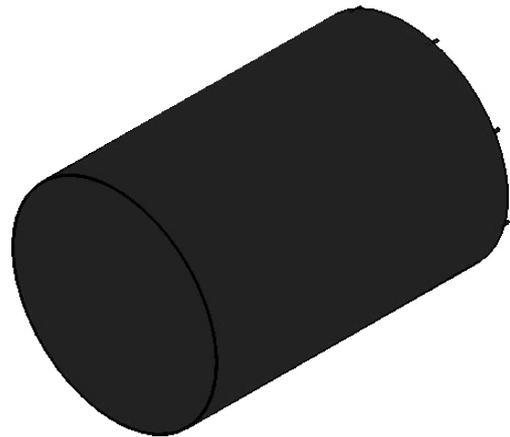
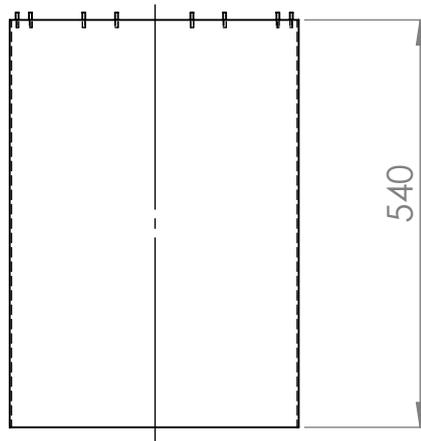
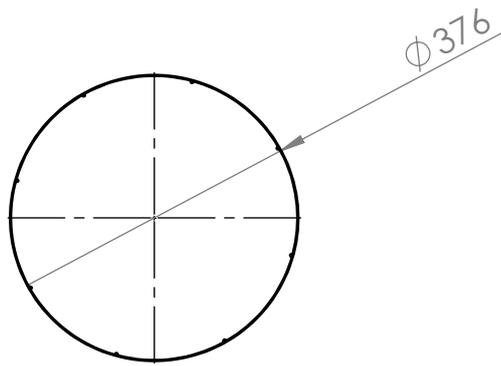
ÉCHELLE : 1/10

Echangeur de  
chaleur

ALIOUANE AEK

Année 2016\2017





UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

**MESO15**

MODELISATION ET SIMULATION EN MECANIQUE

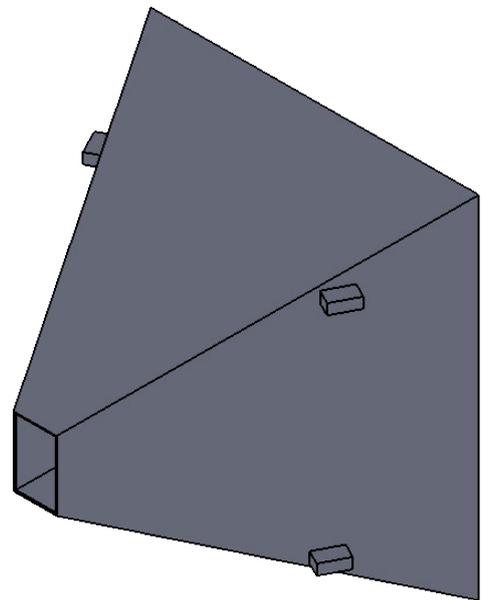
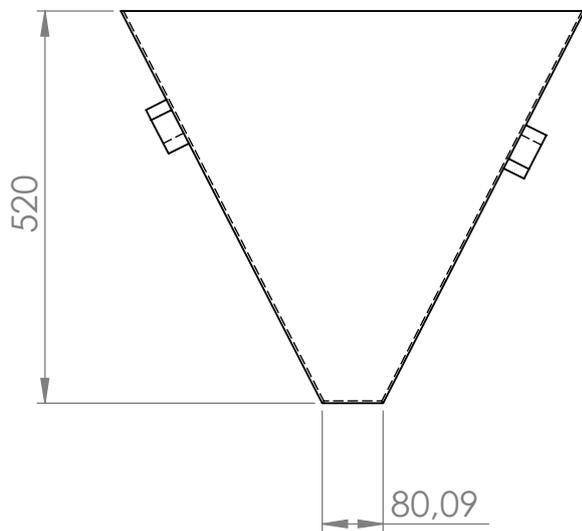
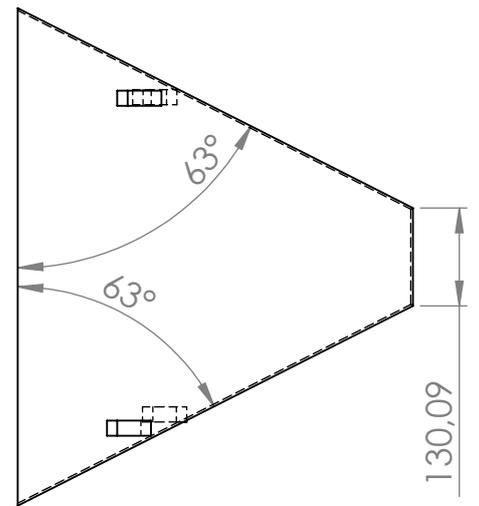
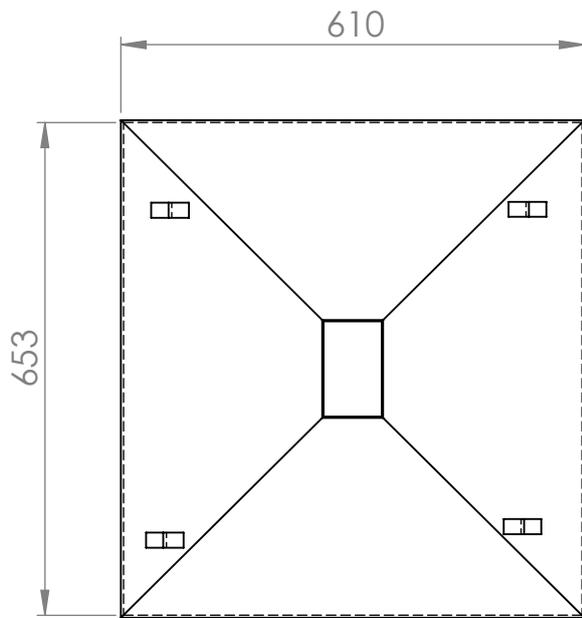
ÉCHELLE : 1/10

**Toile de la chabre de  
combustion**

**ALIOUANE AEK**

Année 2016\2017





UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

MESO15

MODELISATION ET SIMULATION EN MECANIQUE

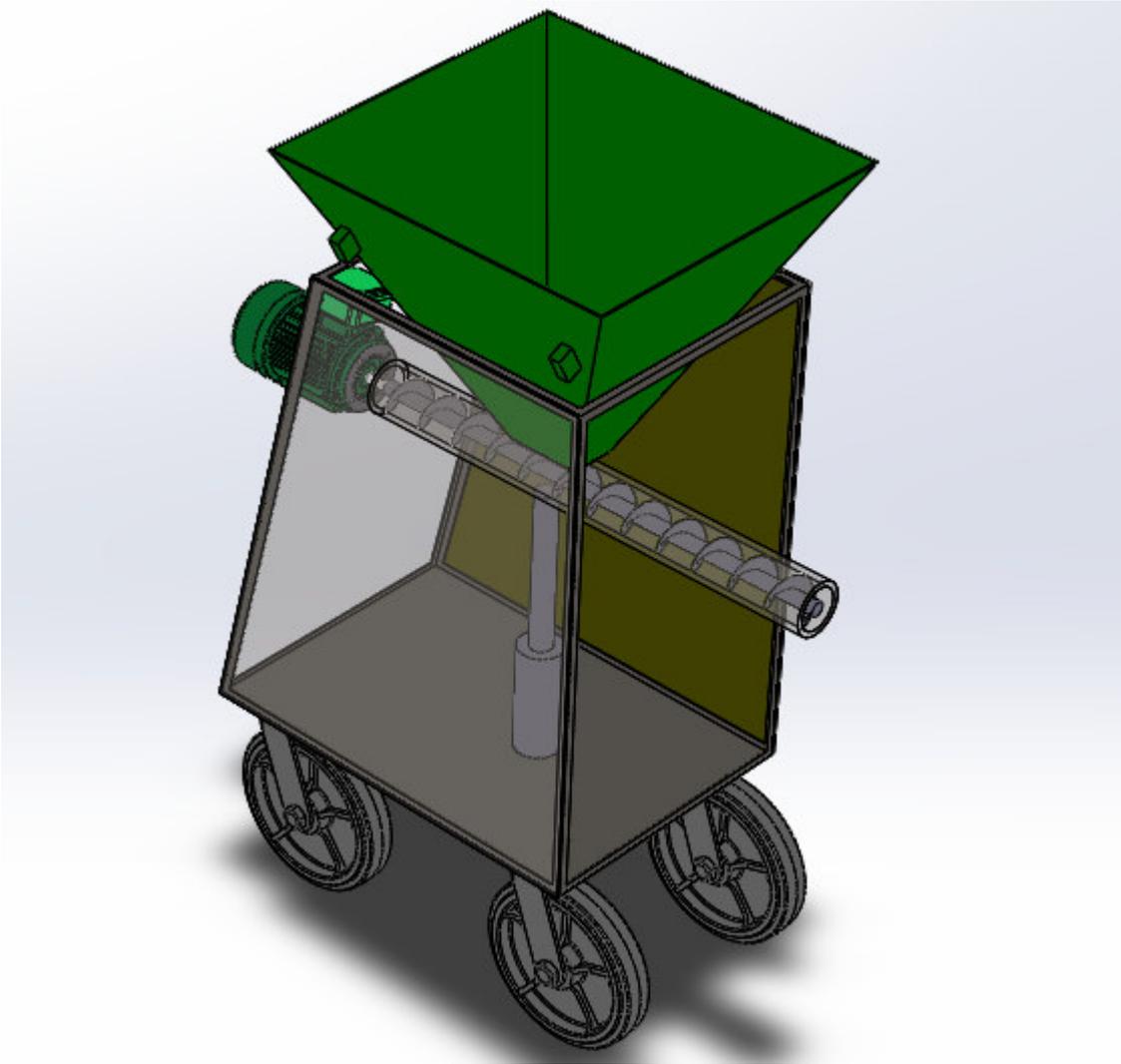
ÉCHELLE : 1/10

Bac d'approvisionnement

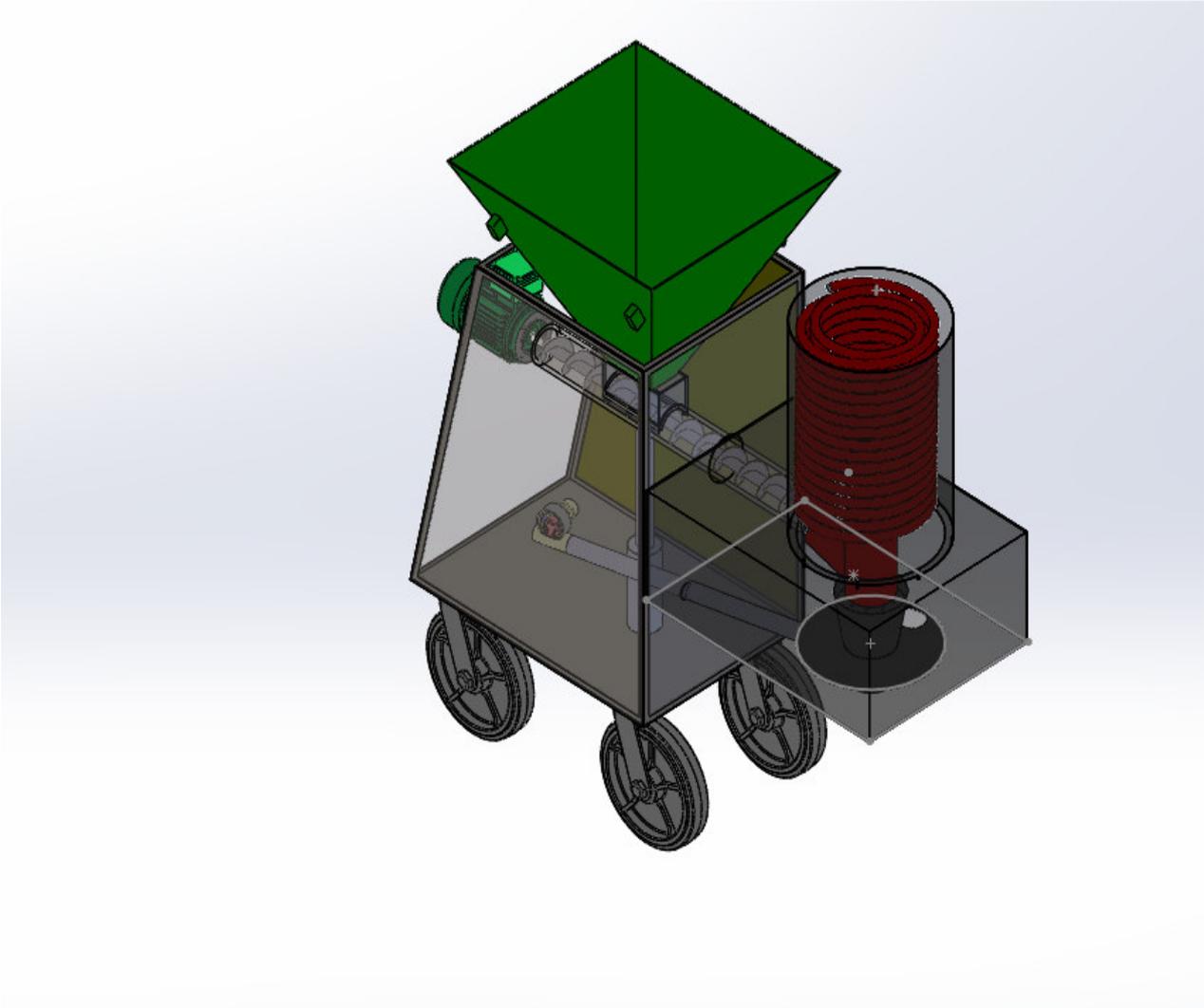
ALIOUANE AEK

Année 2016\2017

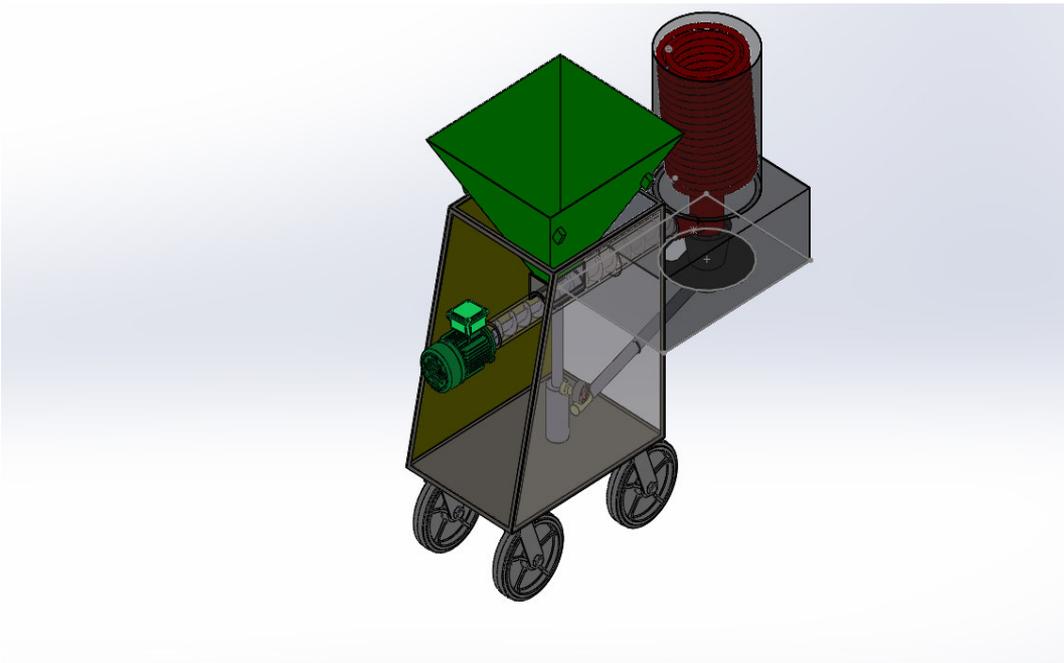
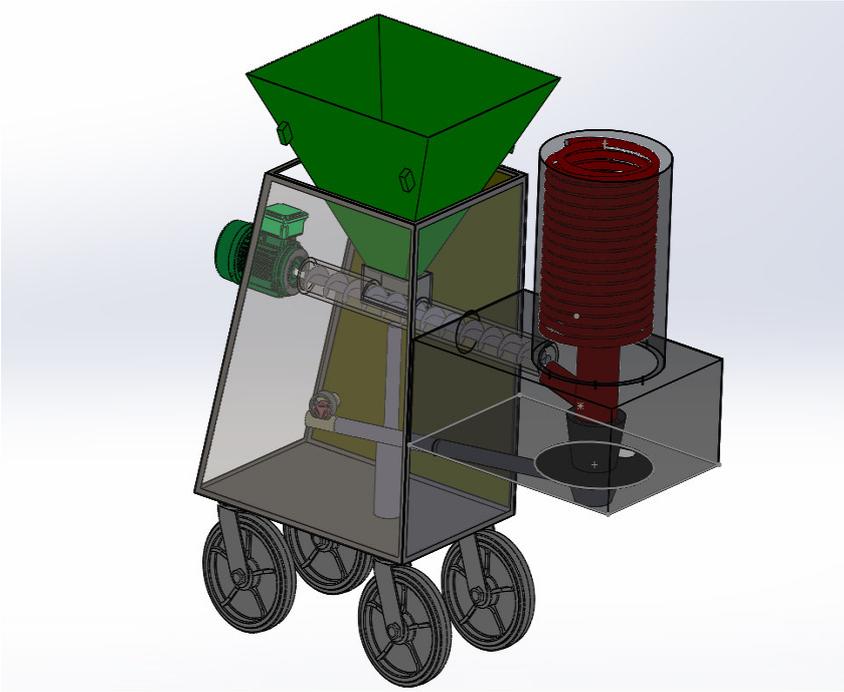




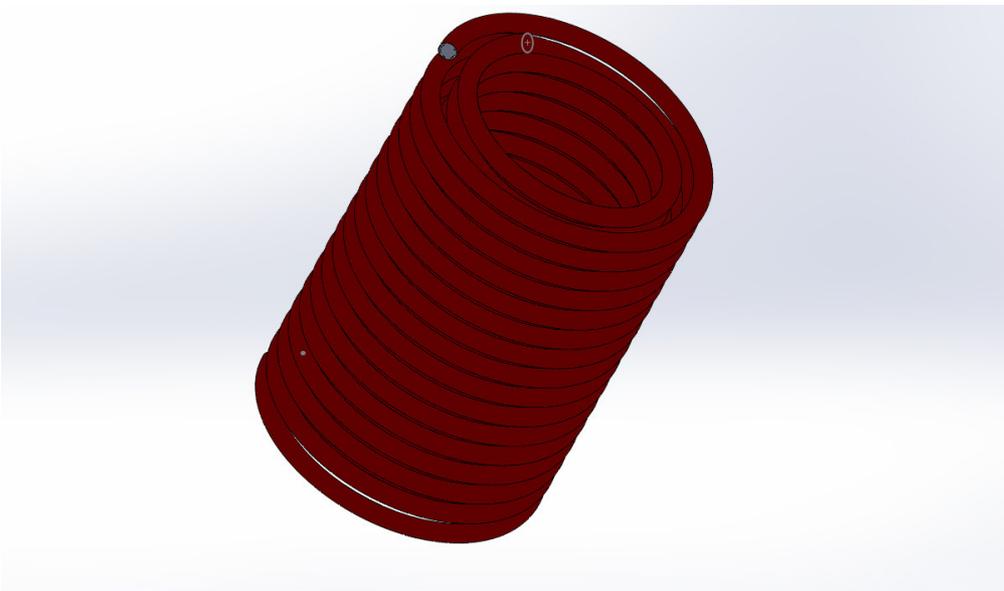
**Système d'alimentation la biomasse**



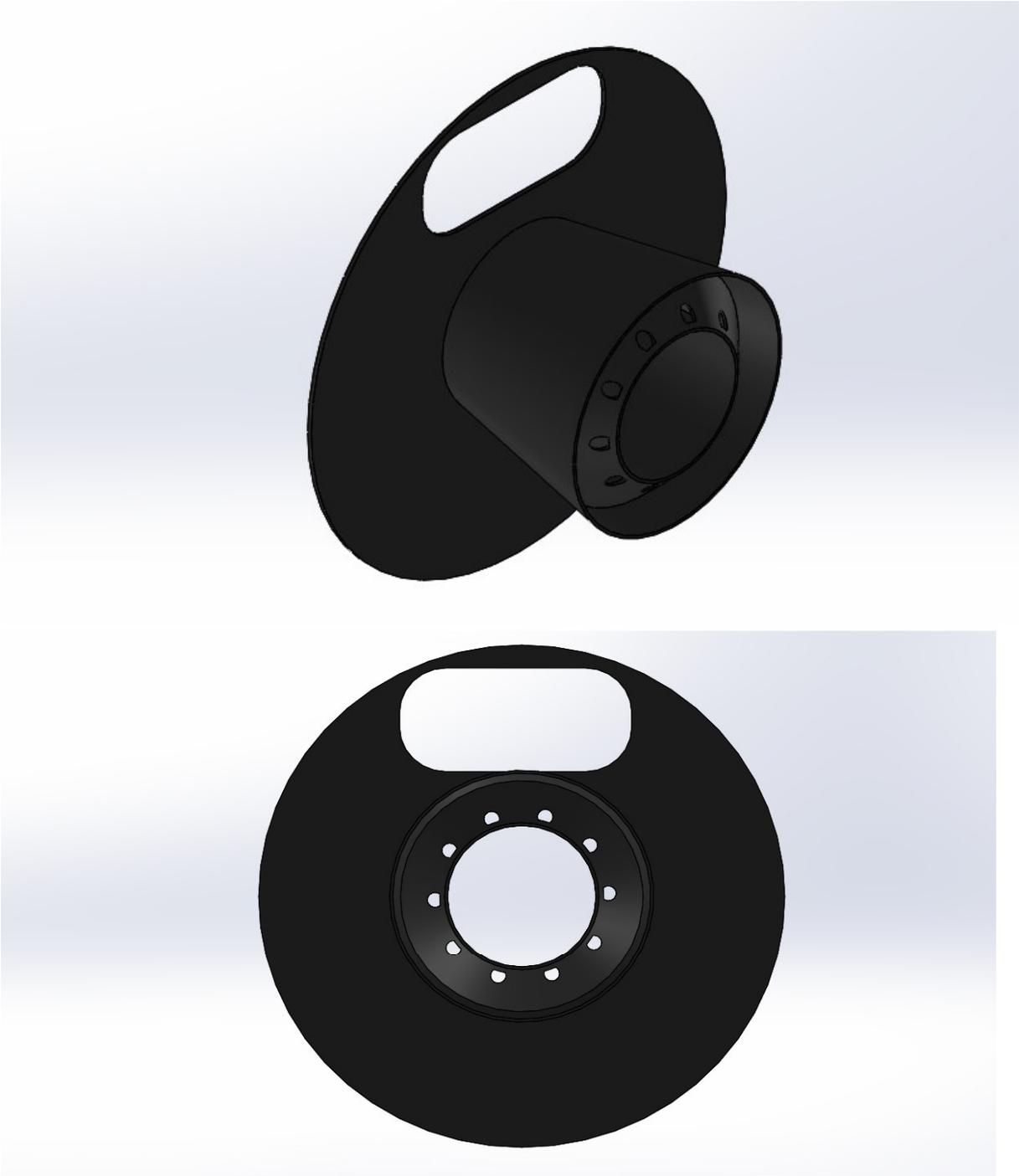
## Assemblage de la chaudière



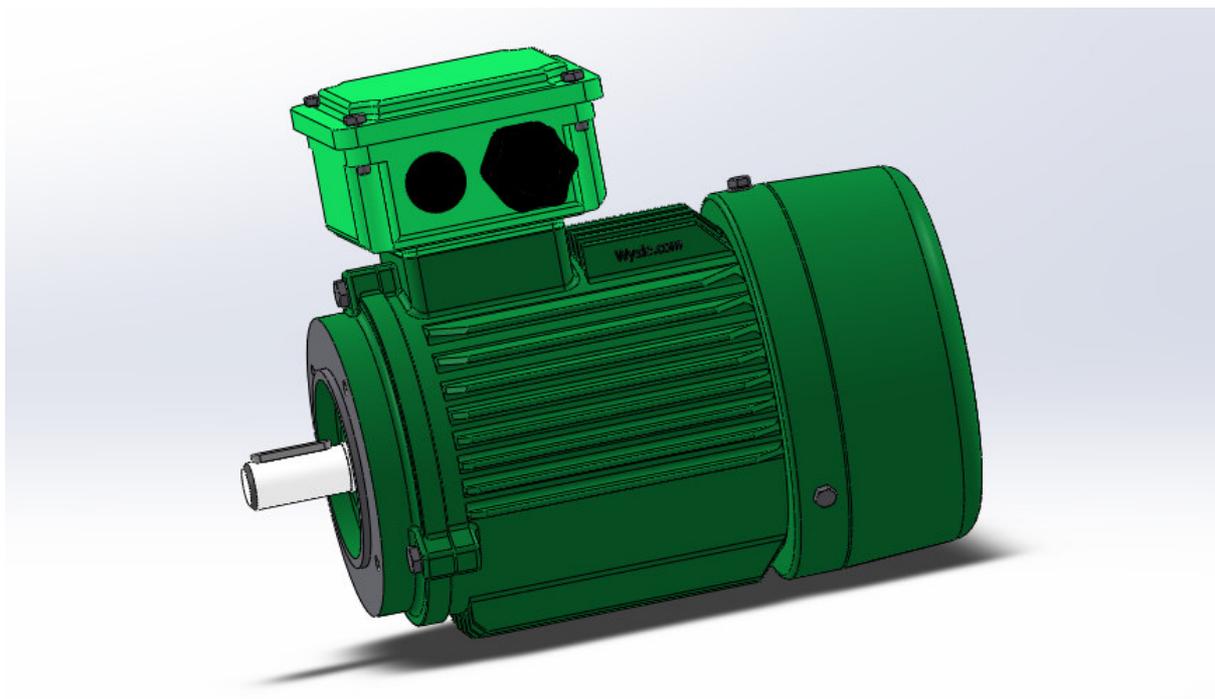
**Assemblage de la chaudière**



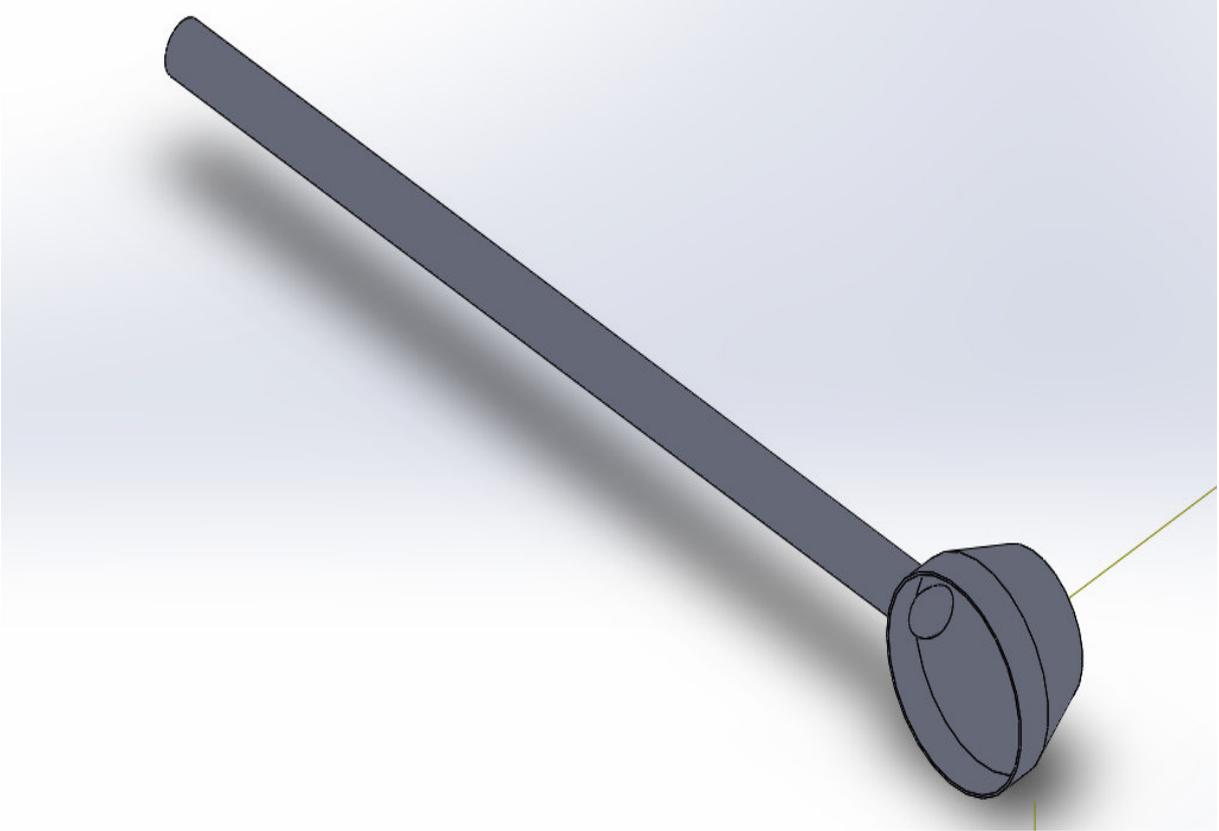
**Echangeur de chaleur – serpentin -**



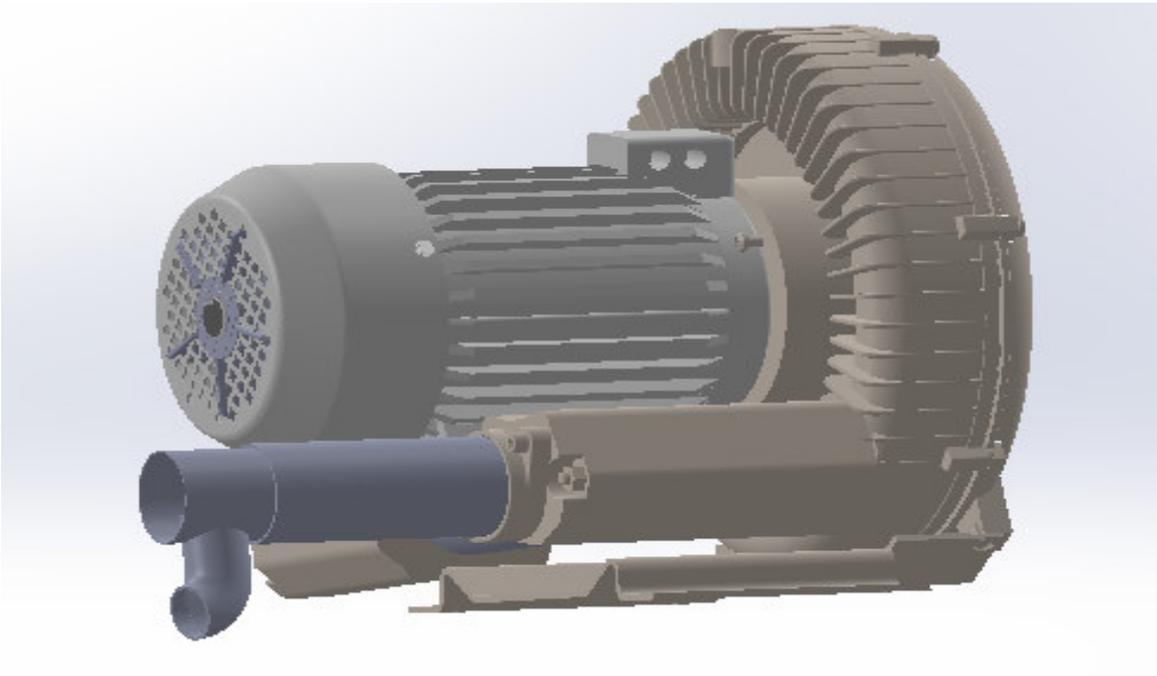
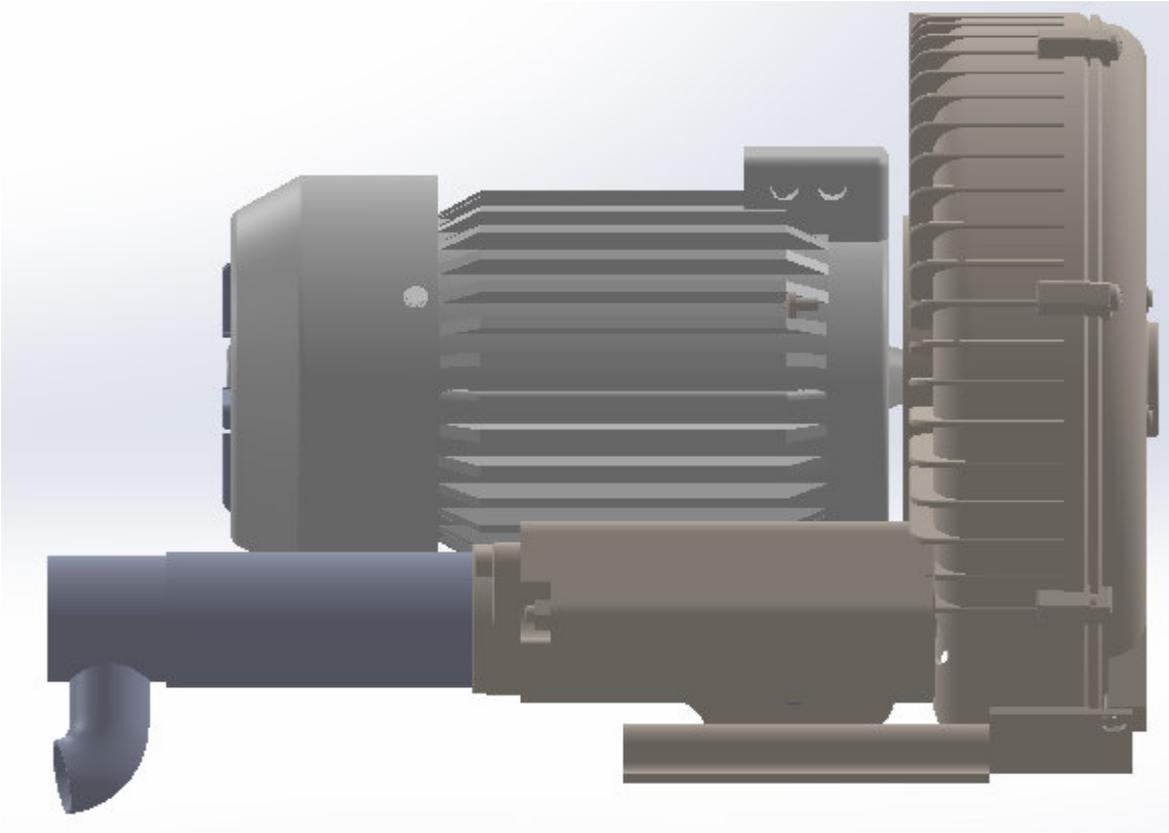
**Diffuseur**



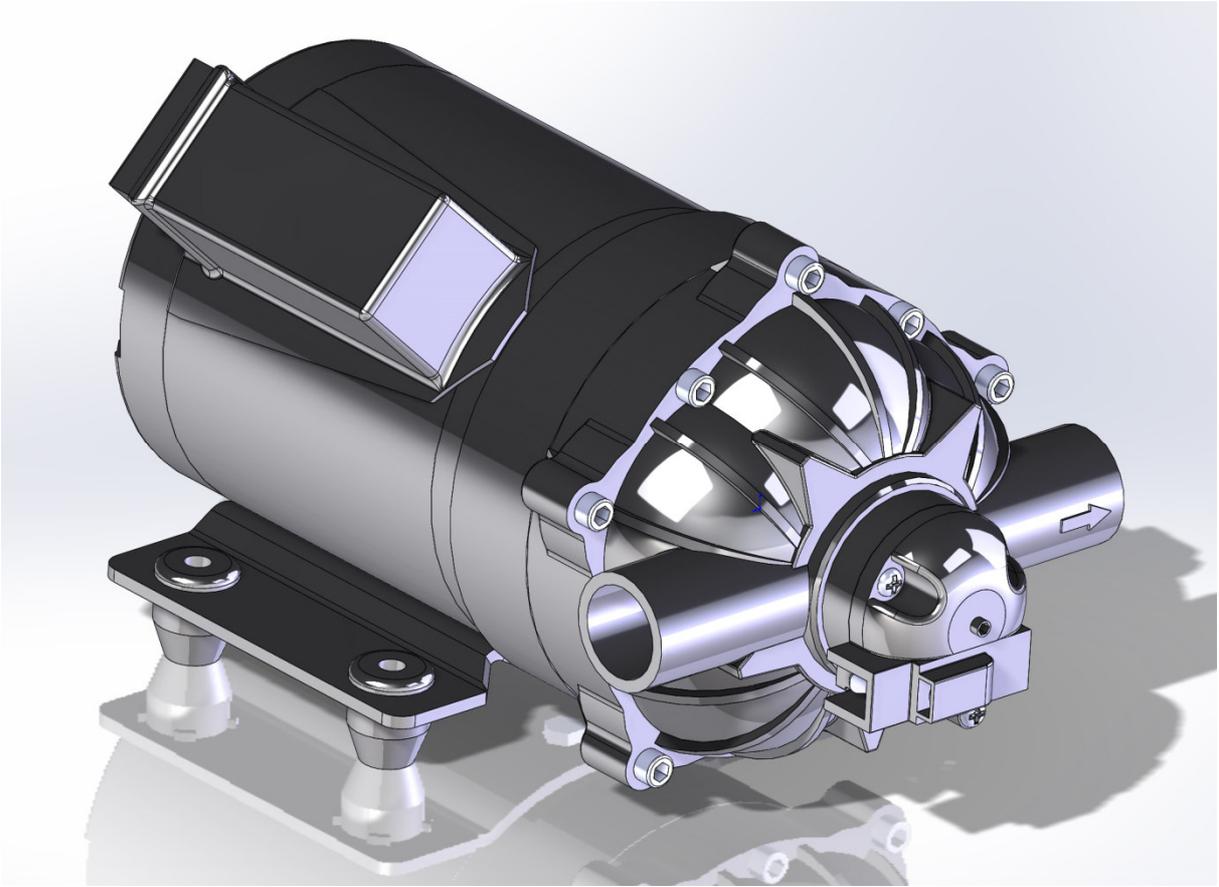
**Moteur de la vis sans fin**



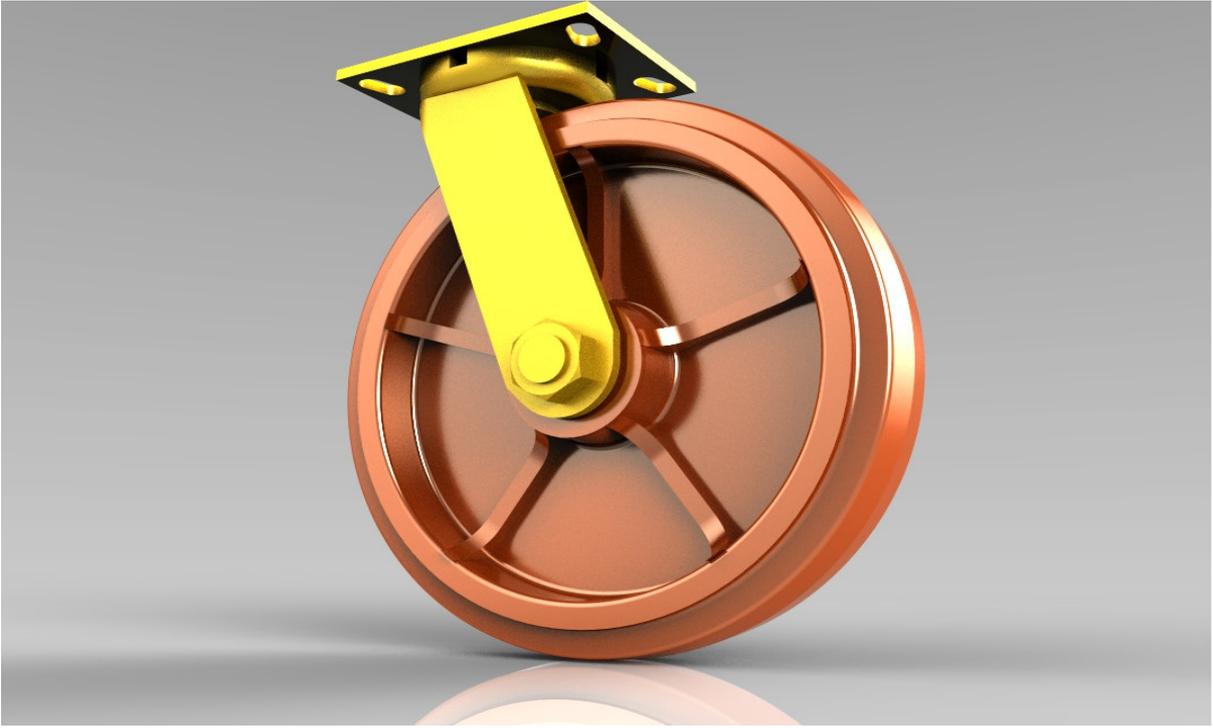
**Sous assemblage diffuseur**



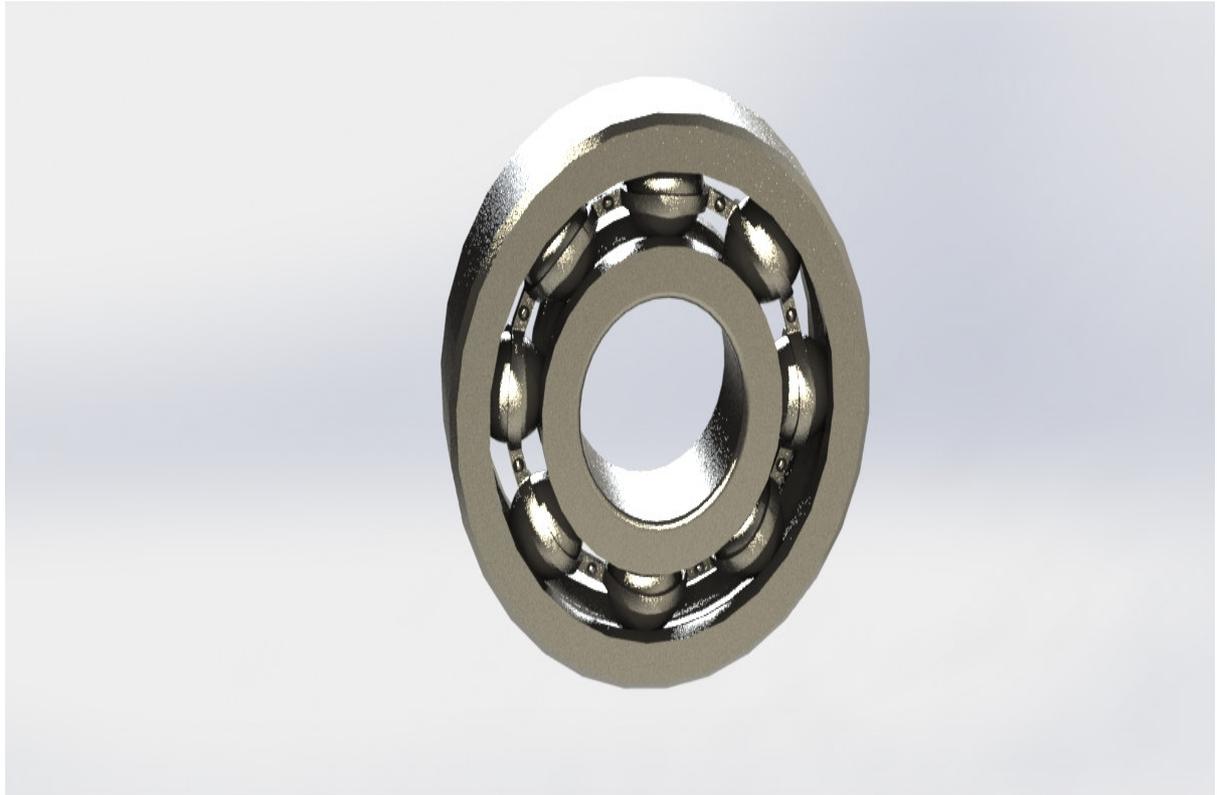
**Siffleur**



**Pompe à eau**



**Roue**

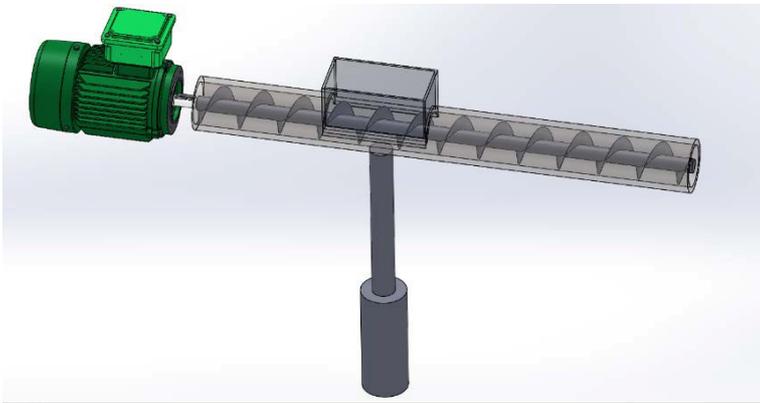


**Roulement à bille**

# **ANNEXES -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 10s.

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 :

Flamme si : 1 -> Résistance 0  
0 -> résistance 1

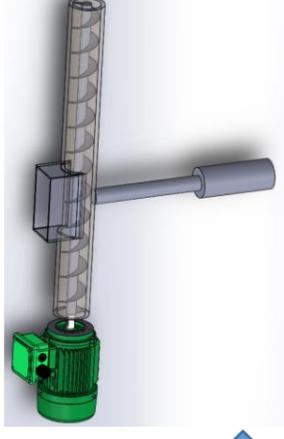
Résistance  
chauffante

Capteur de  
flamme



Arduino uno

**Visse sans fin :**  
Marche 0,14s  
Arrêt pour 10s  
(débit 2g/s)



**Souffleur:**  
Toujours allumé sauf  
arrêt total



Capteur de  
température  
 $T > x \text{ } ^\circ\text{C}$   
pompe en  
marche (1)



Afficheur et  
regulateur

pompe

