

SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA BIOMASSE

CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES DE LA BIOMASSE

CHAPITRE 3 : LES DIFFERENTES VOIES DE VALORISATION
ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE

CHAPITRE 4 : LA GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 5 : MOTIVATION DU PROJET

CHAPITRE 6 : CONCEPTION ET REALISATION DU GAZOGENE

CHAPITRE 7 : MODELISATION PAR LE MODELE
« GASIFIER » SOUS ENGINEERING EQUATION SOLVER (EES)

CHAPITRE 8 : TESTS DU GAZOGENE

CHAPITRE 9 : UTILISATIONS DU SYNGAS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Structure de la cellulose.....	5
Figure 2 : Structure de l'hémicellulose	5
Figure 3 : Structure de la lignine.....	6
Figure 4 : Diagramme de Van Krevelen	15
Figure 5 : Diagramme ternaire CHO de la biomasse montrant les différentes transformations	16
Figure 6 : Vue d'ensemble des procédés courants de conversion de la biomasse	17
Figure 7 : Etapes biologiques de la digestion anaérobie	20
Figure 8 : Etapes biologiques du compostage	22
Figure 9 : Schéma réactionnel global de la pyrolyse	25
Figure 10 : Produits majoritaires de la pyrolyse de la biomasse à pression atmosphérique selon les conditions de température et de vitesse de chauffe	27
Figure 11 : Dates marquants sur l'histoire de la gazéification.....	29
Figure 12 : Schéma de principe d'un gazogène updraft.....	34
Figure 13 : Schéma de principe d'un gazogène downdraft.....	35
Figure 14 : Schéma de principe d'un gazogène crossdraft	36
Figure 15 : Schéma de principe d'un gazogène à lit fluidisé	38
Figure 16 : Schéma de principe d'un gazéificateur à lit entraîné avec ravitaillement haut	39
Figure 17 : Intervalle de puissance des différents types de gazogène	40
Figure 18 : Composition du syngas en fonction de Φ	42
Figure 19 : Différentes vues de la chambre de réaction.....	53
Figure 20 : Photographie de la chambre de réaction	54
Figure 21 : Différentes vues de la trémie	55
Figure 22 : Différentes vues de l'enveloppe.....	56
Figure 23 : Schéma d'un séparateur cyclone à flux inversé.....	58
Figure 24 : Différentes vues du cyclone.....	59
Figure 25 : Les composantes d'un ventilateur centrifuge	60
Figure 26 : Schéma de l'assemblage roue-pales.....	61
Figure 27 : Variateur mécanique de vitesse	64

Figure 28 : Les différentes vues du refroidisseur	68
Figure 29 : Interface graphique de GASIFIER à son ouverture.....	71
Figure 30 : Evolution du débit d'air en fonction de la température de gazéification	74
Figure 31 : Influence de la température sur la composition du syngas	76
Figure 32 : variation du PCI du syngas en fonction de la température pour différentes valeur de l'humidité	77
Figure 33 : Photographie du combustible utilisé lors des tests.....	80
Figure 34 : Evolution de l'inflammabilité du syngas	86
Figure 35 : débit de consommation de bois des trois premiers tests	88
Figure 36 : Histogramme empilé des différents constituants du syngas	91
Figure 37 : Production d'éthanol ex-plantes sucrières.....	C
Figure 38 : Production d'éthanol à partir de céréales (wet milling)	D
Figure 39 : Production d'éthanol à partir de céréales (dry milling).	E

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Teneurs moyennes en cellulose, hémicellulose et lignine de quelques biomasses lignocellulosiques	7
Tableau 2 : Compositions élémentaires de quelques biomasses ainsi que certains combustibles fossiles	11
Tableau 3 : Répartition des produits de réaction en fonction des conditions de pression	27
Tableau 4 : Répartition des sources d'énergie de cuisson dans les ménages	47
Tableau 5 : Caractéristiques du moteur	62
Tableau 6 : Répartition du cout de fabrication du gazogène.....	69
Tableau 7 : Les paramètres d'entrée du logiciel.....	71
Tableau 8 : Masses des échantillons avant et après séchage dans l'étuve.....	81
Tableau 9 : Analyse immédiate et élémentaire de l'eucalyptus.....	82
Tableau 10 : Relevé des différentes masses et du temps pour le calcul de débit.....	87
Tableau 11 : Paramètres d'entrée des simulations	89
Tableau 12 : Composition du syngas en base humide et base sèche des différents tests (pourcentage en volume)	90
Tableau 13 : Données pour le calcul de α	93
Tableau 14 : Rapports stœchiométriques des différents tests	93
Tableau 15 : PCI des syngas	94
Tableau 16 : Débits volumiques des syngas sec.....	97
Tableau 17 : Cold gas efficiency des différents tests	97
Tableau 18 : Puissances véhicules par les syngas	98

LISTES DES ACRONYMES, SYMBOLES ET UNITES

A	Ampère
α	Mole d'O ₂ / mole de biomasse
AGV	Acides Gras Volatils
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
Ar	Ariary
BFB	Bubbling Fluidized Bed
BH	Base Humide
BS	Base Sèche
° C	Degré Celsius
CF	Carbone Fixe
CFB	Circulating Fluidized Bed
cm	Centimètre
cos(φ)	Facteur de puissance
DB	Débit de biomasse
dp	Diamètre de la poulie
dr	Diamètre de la roue
EES	Engineering Equation Solver
Φ	Rapport stoechiométrique
h	heure
Hz	Hertz
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle

INSTAT	Institut National de la STATistique
JIRAMA	Jlro sy RAno MAlagasy
kCal	Kilocalorie
kg	Kilogramme
kPa	Kilopascal
kW	Kilowatt
m	Mètre
M	Masse molaire
m³	Mètre cube
mm	Millimètre
[°]m_{air}	Débit massique d'air
[°]m_{bio}	Débit massique de biomasse
[°]m_c	Débit massique de charbon
m_{mat}	Masse du matériau
MPa	Mégapascal
MS	Matière Sèche
MV	Matière Volatile
MW	Mégawatt
μF	Microfarad
min	Minute
n	Nombre de mole

N	Vitesse de rotation
η_g	Cold gas efficiency
P	Pression ; Puissance
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
ρ_{abs}	Masse volumique absolue
ρ_{app}	Masse volumique apparente
$\rho_{réel}$	Masse volumique réelle
s	seconde
t	Temps
T	Température
V_{abs}	Volume absolu
V_{app}	Volume apparent
\dot{V}_g	Débit volumique de syngas
V_m	Volume molaire
$V_{réel}$	Volume réel

INTRODUCTION

Dans un contexte de développement durable, la maîtrise de la consommation énergétique fait partie des défis majeurs de ce siècle. Au regard de l'épuisement des ressources fossiles et des problèmes environnementaux engendrés par leur consommation, le recours à des sources d'énergie alternatives est incontournable pour continuer à satisfaire les besoins énergétiques tout en préservant l'environnement. La biomasse, plus particulièrement la biomasse lignocellulosique, a émergé dans l'arène de l'énergie renouvelable comme l'une des options les plus prometteuses pour les années à venir, en raison de l'importance de son gisement et de ses diverses ressources.

Ainsi, le bois comme ses dérivés, utilisé depuis des siècles comme énergie de chauffage et de cuisson, revient en force avec les possibilités offertes par les technologies de production d'énergie plus efficaces et plus propres. Parmi ces technologies figure la gazéification. Dans ce sens, ce mémoire traitera de « **CONCEPTION ET REALISATION D'UN GAZOGENE DOWNDRAFT A USAGE DOMESTIQUE : APPLICATION A LA GAZEIFICATION DES ECLATS D'EUCALYPTUS** ».

Pour la majorité des ménages malgaches, le bois reste le premier choix en matière de combustible. Celui-ci est pourtant utilisé d'une manière encore très primitive, ce qui ne permet pas de profiter les potentiels innombrables qu'elle peut offrir. La problématique se pose sur la manière dont il faut exploiter la biomasse afin de rentabiliser son utilisation le plus possible.

La gazéification est un processus qui se fait en quatre étapes : le séchage de la biomasse, la pyrolyse des intrants, l'oxydation des gaz de pyrolyse et la réduction du carbone. Une meilleure compréhension de ces phénomènes est essentielle pour la conception et l'amélioration du gazogène.

Ce mémoire abordera le sujet en deux parties dont la première sera consacrée à l'étude bibliographique aboutissant à une synthèse sur les caractéristiques de la biomasse, ses différentes voies de valorisation énergétique et sa gazéification. La deuxième partie détaillera l'étude expérimentale, allant de la motivation du projet aux tests de performance de l'appareil en passant par sa conception et sa réalisation.

PREMIERE PARTIE :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA BIOMASSE

1.1 DEFINITION DE LA BIOMASSE [1][w1][w2]

Il est difficile de trouver une définition plus générale acceptée par tous de la biomasse. Cependant, celle utilisée par l'United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2005) est :

« Matières organiques biodégradables et non fossilisées provenant des plantes, des animaux et des microorganismes. Elle inclut aussi les produits, les sous-produits, les résidus et les déchets de l'agriculture, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que les fractions organiques non fossilisées et biodégradables des déchets industriels et municipaux. »

La biomasse comprend uniquement les espèces biologiques vivantes ou récemment mortes qui peuvent être utilisées comme combustible ou dans la production de certains produits chimiques. Elle ne comprend pas les matières organiques qui ont été transformées par des processus géologiques pendant plusieurs millions d'années en substances telles que le charbon ou le pétrole.

1.2 FORMATION DE LA BIOMASSE [1][2][w3]

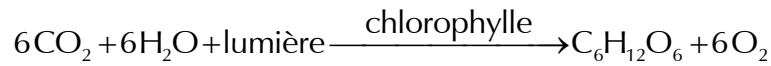
La biomasse botanique provient de la conversion des molécules simples telles que le dioxyde de carbone CO_2 et l'eau H_2O en glucose par l'énergie solaire en présence de la chlorophylle.

Les plantes absorbent l'énergie solaire par le processus appelé photosynthèse. En présence des rayonnements du soleil de longueurs d'onde particulières, les plantes chlorophylliennes décomposent l'eau pour obtenir des électrons et protons et les utilisent pour transformer le CO_2 en glucose, libérant du dioxygène O_2 comme sous-produit. Avec le glucose, les plantes vont :

- Nourrir les cellules

- Stocker de l'énergie
- Synthétiser d'autres molécules organiques

Le processus peut être représenté par l'équation globale :



Les ingrédients importants pour la croissance de la biomasse sont :

- La plante vivante
- Le spectre visible de la radiation solaire
- Le dioxyde de carbone
- La chlorophylle (agissant comme catalyseur)
- L'eau

L'énergie chimique emmagasinée dans les plantes est alors transmise aux animaux qui se nourrissent de ces derniers.

1.3 LES DIFFERENTS TYPES DE BIOMASSE [1][w4][w5][w6]

La biomasse peut être divisée en 3 grands groupes :

1.3.1 Biomasse lignocellulosique

La grande majorité de la biomasse est composée de lignocellulose qui elle est constituée de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine.

a. La cellulose

La cellulose, qui est la plus abondante des substances organiques naturelles, est la composante structurale primaire de la paroi cellulaire dans la biomasse. Sa quantité varie de 90 % (en masse) dans le coton à 33 % pour la plupart des autres plantes.

Avec une formule générale $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, la cellulose est un polymère à longue chaîne avec un degré de polymérisation élevé ($\sim 10\,000$) et de masse moléculaire très grande ($\sim 500\,000$). Elle a une structure cristalline, et par conséquent une grande résistance permettant de fournir la structure squelettique de la biomasse terrestre. La

cellulose est hautement insoluble dans les solvants organiques et l'eau. Elle n'est pas non plus digestible par l'être humain.

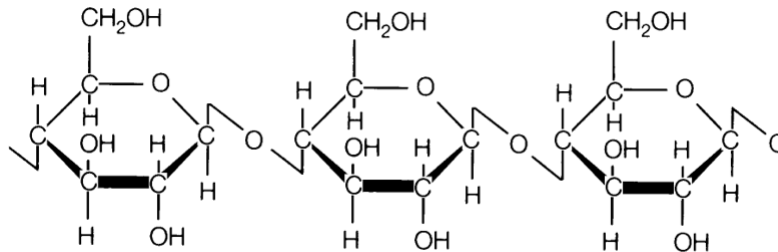


Figure 1 : Structure de la cellulose

b. L'hémicellulose

L'hémicellulose est un autre constituant de la paroi cellulaire de la plante. Alors que la cellulose possède une structure cristalline, l'hémicellulose est amorphe et moins résistante. Il s'agit d'un groupe de polysaccharides à chaînes ramifiées avec un degré de polymérisation faible ($\sim 100-200$), et peut être représentée par la formule générale $(C_5H_8O_4)_n$. Elle assure le rôle de pontage entre les fibres de cellulose, mais aussi avec d'autres composés matriciels.

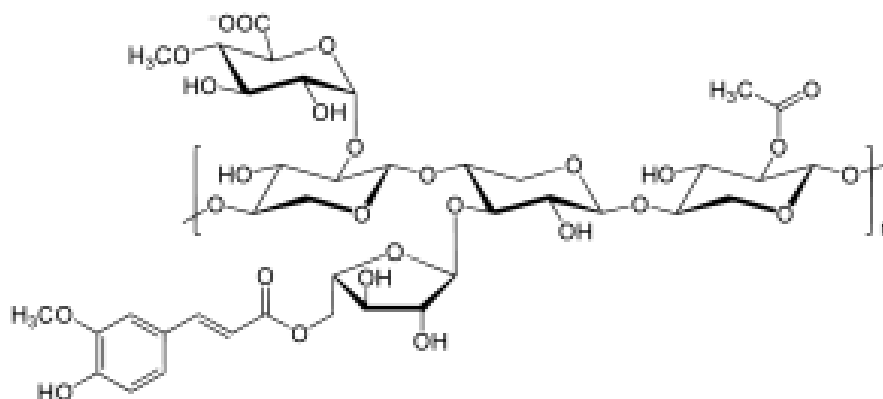


Figure 2 : Structure de l'hémicellulose

c. La lignine

La lignine est un polymère ramifié très complexe de phénylpropane et est une partie intégrante des parois cellulaires secondaires des plantes. Elle agit comme un agent de collage des faisceaux de fibres de cellulose.

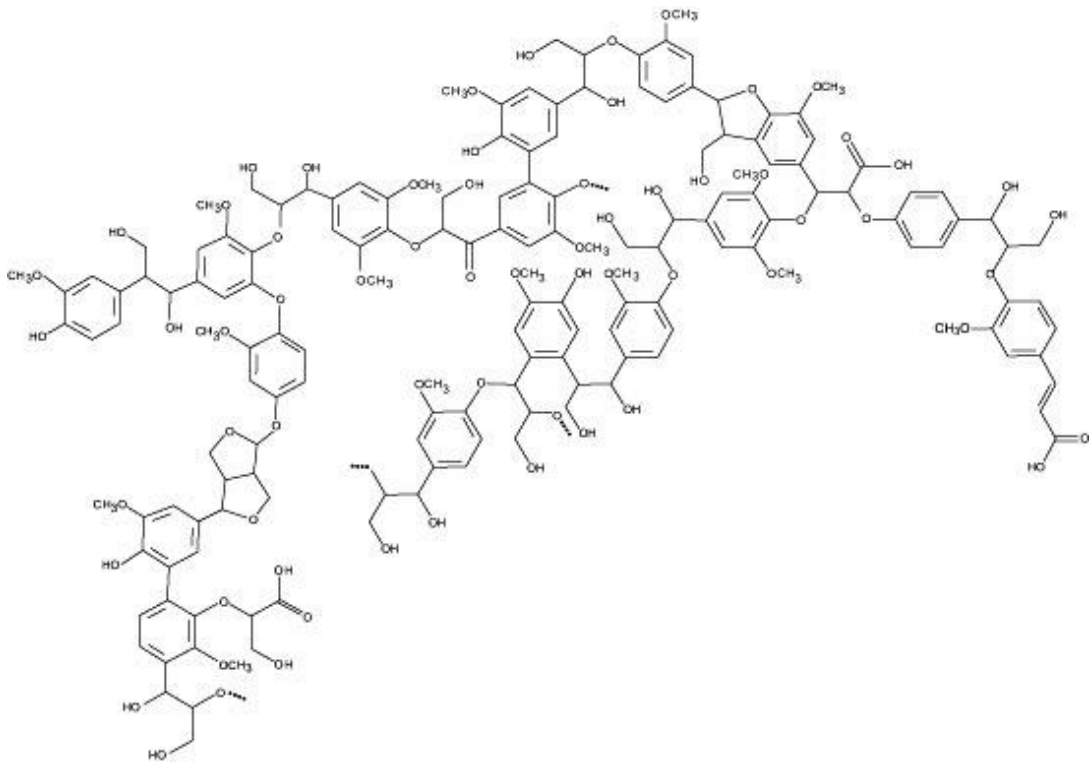


Figure 3 : Structure de la lignine

Les proportions de chacun des constituants peuvent varier de manière considérable selon la provenance de la biomasse. Le tableau ci-après indique à titre informatif les teneurs moyennes des trois constituants dans diverses biomasses lignocellulosiques.

Tableau 1 : *Teneurs moyennes en cellulose, hémicellulose et lignine de quelques biomasses lignocellulosiques [3]*

biomasse	cellulose	hémicellulose	lignine
Herbe	30–50 %	15–40 %	5–20 %
Bagasse	40–55 %	25–40 %	5–25 %
Bois dur	40–50 %	20–30 %	15–30 %
Bois tendre	40–55 %	10–15 %	25–30 %
Résidus agricoles	30–40 %	10–40 %	10–30 %
moyenne	40–60 %	20–40 %	10–25 %

La biomasse lignocellulosique n'entre pas dans la chaîne alimentaire humaine donc son utilisation ne menace pas l'approvisionnement alimentaire mondial. La source de biomasse lignocellulosique provient aussi bien des résidus agricoles et forestiers ou des sous-produits de transformation du bois que de cultures dédiées, qu'il s'agisse de plantes ligneuses ou de plantes herbacées.

1.3.2 Biomasse à glucide

La biomasse à glucide riche en substances glucidiques, contrairement à la biomasse lignocellulosique, est facilement hydrolysable. Il est relativement simple d'obtenir des combustibles liquides par fermentation de cette dernière. Pour cette raison, la plupart des usines d'éthanol utilise la biomasse à glucide comme matière première. Comme exemple de biomasse à glucide, on peut citer :

- Les céréales ;
- Les betteraves sucrières ;
- Les cannes à sucre.

Parce qu'ils servent à l'alimentation humaine, leur utilisation pour la production de produits chimiques ou d'énergie doit être soigneusement pesée car elles pourraient affecter les approvisionnements alimentaires.

1.3.3 Biomasse oléagineuse

Ce troisième type de biomasse est riche en lipides fournissant une bonne source d'huile végétale : palmier à huile, coco, tournesol, colza, jatropha, etc. La biomasse oléagineuse est principalement destinée à des fins alimentaires ou à servir de biocarburants après réaction de transestérification.

CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES DE LA BIOMASSE

Les caractéristiques de la biomasse influent beaucoup sur les procédés de conversion ultérieure qu'elle peut subir. Dans le cas de la gazéification, une bonne compréhension des propriétés physiques et chimiques de la biomasse est essentielle pour la conception d'un gazogène fiable.

2.1 STRUCTURE DE LA BIOMASSE [1]

La biomasse est un mélange complexe de matières organiques telles que des glucides, des lipides et des protéines, ainsi que d'une petite quantité de minéraux comme le sodium, le phosphore, le calcium ou encore le fer. Les composantes de la biomasse peuvent être divisées en trois types :

Les extractibles : substances présentes dans le tissu végétal ou animal qui peuvent être séparées par extraction successive aux solvants et ensuite récupérées par évaporation des solvants. Elles incluent les protéines, les huiles, l'amidon, le sucre, etc.

La paroi cellulaire : qui confère à la plante une résistance structurale qui lui permet de se tenir debout sans soutien. Une paroi cellulaire typique est composée de polysaccharides comme la cellulose ou l'hémicellulose mais aussi de lignine. Les fibres de cellulose et d'hémicellulose apportent la force à la structure de la plante, tandis que la lignine maintient celles-ci ensembles.

La cendre : qui est la part inorganique de la biomasse.

2.2 PROPRIETES [1][3][4][5][6][7]

Chaque type de biomasse possède des propriétés spécifiques qui déterminent ses performances en tant que combustible lors de la combustion ou de la gazéification. Les propriétés les plus importantes relatives à la conversion thermique de biomasse sont les suivantes :

- Composition ;
- Pouvoir calorifique ;
- Masse volumique.

2.2.1 La composition

La biomasse contient un grand nombre de composés organiques complexes, d'humidité et d'une petite quantité d'impuretés inorganiques appelés cendres. Les composés organiques comprennent quatre éléments principaux dont le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O), et l'azote (N). La biomasse d'origine animale peut contenir une petite quantité de chlore (Cl) et de soufre (S). Dans le cadre de la conversion thermique de la biomasse, les deux types de compositions suivantes sont les plus utilisées :

a. La composition mentaire

Ici, la composition du combustible est exprimée en termes de ses éléments de base à l'exception de son humidité et de la teneur en constituants inorganiques. L'humidité est exprimée séparément, donc dans la composition élémentaire l'hydrogène et l'oxygène ne doivent pas contenir ceux de l'humidité. Une analyse élémentaire typique est :

$$C + H + O + N + S + E + R = 100\%$$

Avec C, H, O, N, S, E et R sont respectivement les pourcentages du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote, du soufre, de l'humidité et de cendre (résidu solide).

La composition peut être aussi représentée par rapport au combustible sec :

$$C'H'O'S'N'R'$$

Ou encore par rapport au combustible sec et exempt de cendre :

$$C''H''O''S''N''$$

Le tableau suivant compare les compositions élémentaires (base sèche) de quelques biomasses avec celles de certains combustibles fossiles.

Tableau 2 : *Compositions élémentaires de quelques biomasses ainsi que certains combustibles fossiles [1]*

biomasse	C' (%)	H' (%)	O' (%)	N' (%)	S' (%)	R' (%)
Paille (riz)	39,20	5,10	35,80	0,60	0,10	19,20
Balle de riz	38,50	5,70	39,80	0,50	0,00	15,50
Papier	43,40	5,80	44,30	0,30	0,20	6,80
Tourbe	54,50	5,10	33,09	1,65	0,45	5,20
Anthracite	83,70	1,90	10,50	0,90	0,70	2,30

Les compositions élémentaires sont données en base sèche c'est-à-dire après avoir éliminé l'humidité.

b. La composition immédiate

L'analyse immédiate donne la composition de la biomasse en termes de ses composants bruts tels que l'humidité, la matière volatile, la cendre et le carbone fixe.

La matière volatile

La matière volatile est la part de la biomasse qui est vaporisée lorsque cette dernière est chauffée (jusqu'à 400 °C-500 °C). Elle inclut les gaz incondensables ou non.

La cendre

La cendre est le résidu solide inorganique restant après que le combustible ait complètement brûlé. Ses ingrédients principaux sont la silice, l'aluminium, le fer et le calcium ; une petite quantité de magnésium, de titane, de sodium et de potassium, peuvent également être présents.

L'humidité

La teneur en humidité de la biomasse est la quantité d'eau, exprimée en pourcentage de la masse du matériau. Elle peut être exprimée sur une base humide et sur une base sèche. [Equation Section \(Next\)](#)

$$E_{\text{base humide}} = 100 \times \left(\frac{\text{masse}_{\text{frais}} - \text{masse}_{\text{sec}}}{\text{masse}_{\text{frais}}} \right) \quad (1.1)$$

$$E_{\text{base sèche}} = 100 \times \left(\frac{\text{masse}_{\text{frais}} - \text{masse}_{\text{sec}}}{\text{masse}_{\text{sec}}} \right) \quad (1.2)$$

Le carbone fixe

Le carbone fixe est déterminé à partir de la formule suivante :

$$CF = 1 - MV - E_{\text{base humide}} - \text{Cendre} \quad (1.3)$$

Où :

CF : Carbone fixe

MV : Matière volatile

$E_{\text{base humide}}$: Humidité sur base humide

Il représente le carbone solide restant dans la biomasse après dévolatilisation durant le processus de pyrolyse.

2.2.2 Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est l'énergie (par unité de masse ou de volume) libérée par sa combustion complète conduisant à la formation de CO_2 et de H_2O , à pression constante et dans les conditions normales de température et de pression.

On fait la distinction entre le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

a. Pouvoir calorifique supérieur (PCS)

Le PCS tient compte de la somme des quantités de chaleur dégagée par la combustion des divers éléments, y compris la chaleur libérée par la condensation de la vapeur formée au moment de l'oxydation de l'hydrogène; cette chaleur est généralement évaluée à 600 kcal/kg. Les différents composés étant supposés ramenés à la température 0 °C et sous pression atmosphérique normale (1013 mbars).

b. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Le PCI ne diffère du précédant que par la chaleur de condensation de la vapeur d'eau qui se trouve dans les fumées, en supposant qu'elle est maintenue dans cet état dans les conditions dites normales (0 °C et 1013mbars).

La seule grandeur vraiment utile dans la pratique est le PCI, puisque dans les produits de combustion rejetés, l'eau se retrouve à l'état vapeur.

On dispose de plusieurs formules empiriques pour le calcul du PCI.

Pour les combustibles solides et liquides :

$$\text{PCI(kcal / kg)} = 8000C + 29000\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2500S - 600E \quad (1.4)$$

Où **C, H, O, S et E** sont respectivement les teneurs (pourcentages en masse) en carbone, hydrogène, oxygène, soufre et humidité du combustible humide.

Pour les combustibles gazeux :

$$\text{PCI(kcal / m}^3\text{)} = 2580[H_2] + 3050[CO] + 8530[CH_4] + 17000[C_nH_p] \quad (1.5)$$

Où $[H_2]$, $[CO]$, $[CH_4]$ et $[C_nH_p]$ sont respectivement les teneurs (pourcentages en volume) de l'hydrogène, du monoxyde de carbone, du méthane et des gaz (hydrocarbures) autres que le méthane.

2.2.3 La masse volumique

Pour une biomasse de type granulaire, on peut définir trois masses volumiques caractéristiques :

La masse volumique apparente

C'est le rapport entre la masse de matériau et le volume apparent de l'ensemble des grains.

$$\rho_{\text{app}} = \frac{m_{\text{mat}}}{V_{\text{app}}} \quad (1.6)$$

La masse volumique réelle

C'est le rapport entre la masse de matériau et le volume réel des grains (sommées des volumes élémentaires des grains y compris le volume des pores fermés).

$$\rho_{\text{réel}} = \frac{m_{\text{mat}}}{V_{\text{réel}}} \quad (1.7)$$

La masse volumique absolue

C'est le rapport entre la masse de matériau et le volume déduit de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{m_{\text{mat}}}{V_{\text{abs}}} = \frac{m_{\text{mat}}}{V_{\text{réel}} - V_{\text{pores}}} \quad (1.8)$$

2.3 CLASSIFICATION GENERALE DES COMBUSTIBLES [1][W7]

La classification est un moyen important d'évaluer les propriétés d'un combustible. Les combustibles appartenant à un groupe particulier ont un comportement similaire, quels que soient leur origine et leur type..

Il existe deux méthodes de classification des combustibles en utilisant leurs constituants chimiques : le rapport atomique (diagramme de Van Krevelen) et le diagramme ternaire.

2.3.1 Le rapport atomique

Le rapport atomique est basé sur la teneur en carbone, hydrogène et oxygène du combustible. La classification sur la base des rapports atomiques nous permet de grouper les combustibles selon leur pouvoir calorifique.

Le diagramme de Van Krevelen est un mode de représentation graphique des rapports atomiques : sur l'abscisse se trouve le rapport atomique (O/C) et sur l'ordonnée le rapport atomique (H/C). Les rapports sont calculés sur une base sèche et exempte de cendre du combustible.

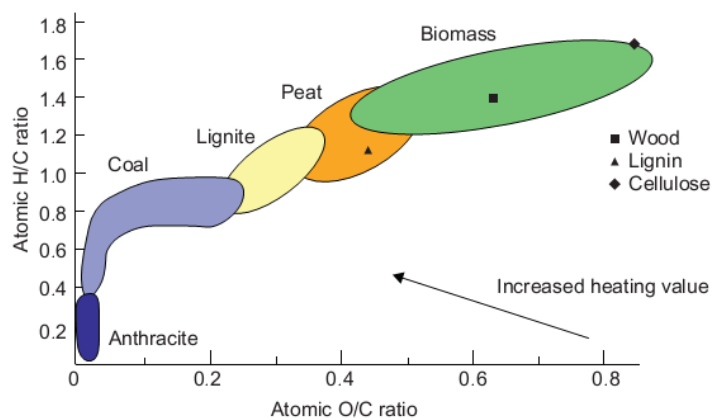


Figure 4 : Diagramme de Van Krevelen [1]

Ce graphique montre que la biomasse possède des rapports atomiques (O/C) et (H/C) élevés par rapport aux combustibles fossiles. Pour une large gamme de biomasses le rapport (H/C) et une fonction linéaire de (O/C).

2.3.2 Le diagramme ternaire

Le diagramme ternaire est un outil pour la classification des combustibles, et aussi utilisé pour représenter les processus de conversion de la biomasse.

Le diagramme a pour base, un triangle équilatéral où les trois sommets représentent chacun un constituant pur (C, H, ou O). À l'inverse, le côté opposé

correspondant au binaire n'en contient pas. Un point à l'intérieur du triangle représente quant à lui un mélange des trois constituants.

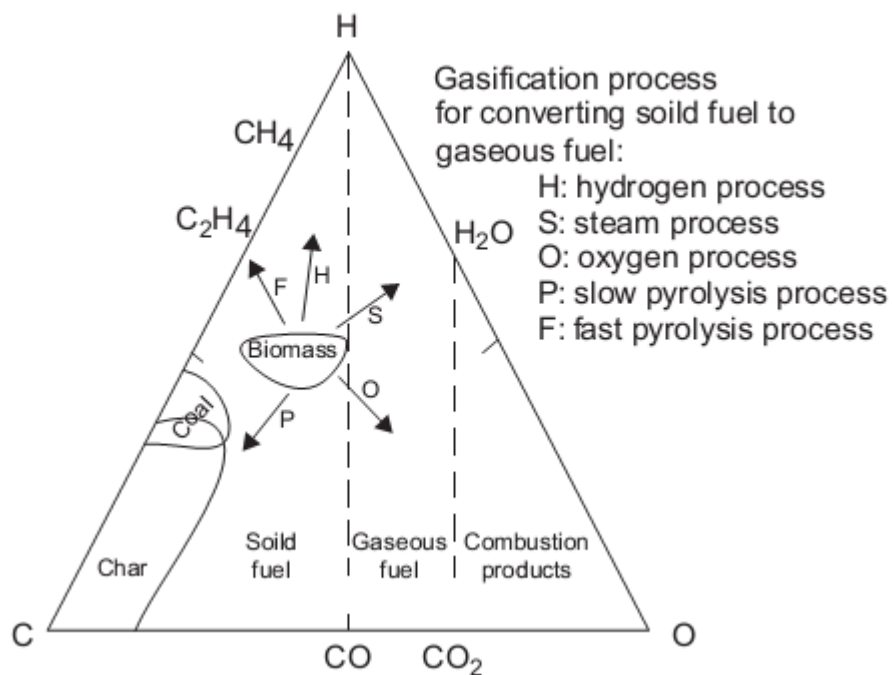


Figure 5 : Diagramme ternaire CHO de la biomasse montrant les différentes transformations (**source [1]**)

CHAPITRE 3 : LES DIFFERENTES VOIES DE VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE

Il existe une grande variété de technologie de conversion de la biomasse. Généralement, ces procédés de conversion dépendent de l'état physique de la biomasse.

La conversion de la biomasse peut être achevée par le biais de l'une des deux voies principales :

- La voie biochimique ;
- La voie thermochimique.

La figure suivante montre les différents procédés de conversion de la biomasse selon les deux voies.

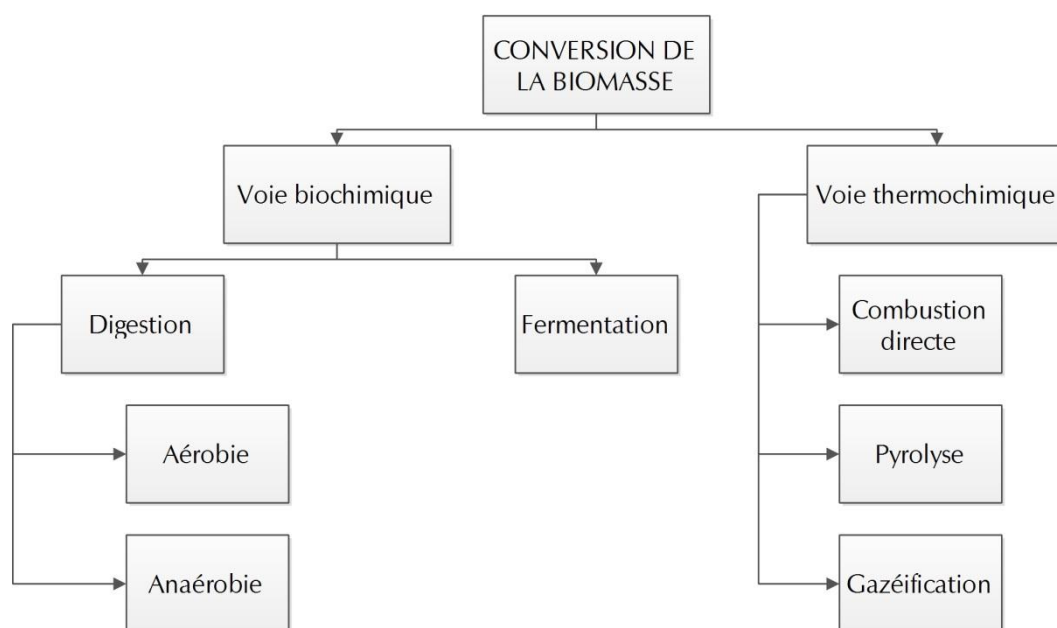


Figure 6 : Vue d'ensemble des procédés courants de conversion de la biomasse (adapté de [1] et [15])

La conversion biochimique est peut-être la plus ancienne méthode utilisée pour transformer la biomasse en d'autres formes sources d'énergie. La conversion thermochimique de la biomasse en gaz vient un peu plus tard.

3.1 CONVERSIONS BIOCHIMIQUES DE LA BIOMASSE [1][8][9][10][w8]

Pour tout procédé de conversion biochimique, les molécules sont décomposées en des molécules plus petites par l'action des bactéries ou des enzymes. Ces procédés sont beaucoup moins rapides que les conversions thermochimiques mais par contre, ils ne nécessitent pas d'apport énergétique extérieur. Les trois principaux moyens de conversion biochimique sont :

- La digestion (anaérobie et aérobie)
- La fermentation
- L'hydrolyse enzymatique ou acide

La digestion anaérobie produit principalement du méthane CH_4 et de dioxyde de carbone CO_2 en plus des résidus solides.

La digestion aérobie, encore appelée compostage, est aussi un autre moyen de décomposition de la biomasse sauf qu'elle se déroule en présence d'air. Elle utilise plusieurs types de microorganismes qui, en présence de l'air, produisent du dioxyde de carbone CO_2 , de la chaleur et un digestat solide.

3.1.1 La digestion anaérobie

La digestion anaérobie ou encore la méthanisation est la transformation de la matière organique en biogaz, un mélange de gaz composé principalement de méthane CH_4 et de dioxyde de carbone CO_2 , par une communauté de microorganismes complexes en milieu anaérobie.

La méthanisation permet donc de transformer des déchets organiques en énergie par l'intermédiaire de la production de biogaz riche en méthane.

La transformation de la matière organique qui est un mélange très complexe passe par une succession d'intermédiaires métaboliques qui sont transformés par différents types de population microbienne. On considère trois grands groupes de micro-organismes qui correspondent aux trois phases de la méthanisation :

a. L'hydrolyse et l'acidogénèse

Les premières réactions que subit la matière organique sont des réactions d'hydrolyse et d'acidogénèse qui transforment la matière organique solide en acides gras volatils (AGV), alcools, acide acétique, hydrogène et gaz carbonique par des bactéries anaérobies, strictes ou facultatives, hydrolytiques et fermentatives (*Clostridium*, *Bacteroides*, *Bacillus*, *Staphylococcus*). L'étape limitant de cette première phase est la dégradation des solides. La présence de lignine dans la matière organique empêche parfois l'accès des enzymes aux matières fermentescibles.

b. L'acétogénèse

Dans cette étape, les intermédiaires métaboliques sont transformés en acétate CH_3COO^- , hydrogène et dioxyde de carbone grâce notamment à trois groupes de bactérie :

- Les acétogènes productrices obligées d'hydrogène ;
- Les bactéries homoacétogènes ;
- Les bactéries sulfatoréductrices.

Les vitesses réactionnelles d'acétogénèse sont généralement faibles et peuvent être soumises à des problèmes d'inhibition par la présence d'hydrogène.

c. La méthanogénèse

Cette dernière étape fait intervenir les Archées méthanogènes qui ont la fonction de transformer l'acétate en méthane et dioxyde de carbone et de réduire le dioxyde de carbone avec l'hydrogène pour former du méthane et de l'eau.

Les Archées qui utilisent l'acide acétique pour former du CO_2 et du CH_4 sont dites « acétoclastes » et celles qui réduisent le gaz carbonique par l'hydrogène pour produire du méthane et de l'eau sont dites « hydrogénophiles ».

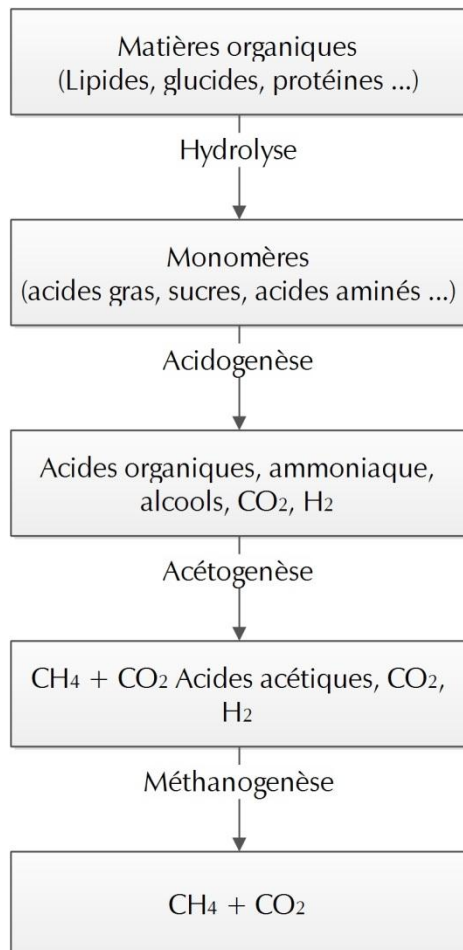


Figure 7 : *Etapes biologiques de la digestion anaérobie [8]*

3.1.2 La digestion aérobie

La digestion aérobie est aussi une autre alternative de traitement biologique des déchets organiques. Dans le langage courant, la digestion aérobie est appelée compostage et dont le principal but est de produire du compost valorisable comme amendement organique des sols.

La mise en œuvre du compostage comporte deux étapes en plus des prétraitements et post-traitements éventuellement nécessaires (tris, broyage, etc...) :

- La première étape permet de réduire la masse du déchet mais aussi sa stabilisation. Au cours de cette première étape, la matière organique la plus facilement dégradable est oxydée par des microorganismes aérobies qui consomment de l'oxygène et libèrent de la chaleur. La durée de cette première étape varie de quelques jours à quelques semaines et en fonction de la nature du déchet, de l'aération, de la dimension de l'installation et encore d'autres paramètres.
- A la fin de la première étape, le déchet est beaucoup moins évolutif et relativement stabilisé puisque la majorité de la fraction biodégradable a été éliminée mais n'est pas encore apte à être utilisé comme amendement des sols. Il est donc nécessaire de modifier les caractéristiques de la matière organique résiduelle pour lui conférer des propriétés proches de celles de l'humus, c'est le but de la maturation. Cette deuxième étape ne s'accompagne que très peu de dégradation de matière et nécessite un apport d'oxygène faible.

Les étapes biologiques du compostage peuvent être représentées par le schéma suivant :

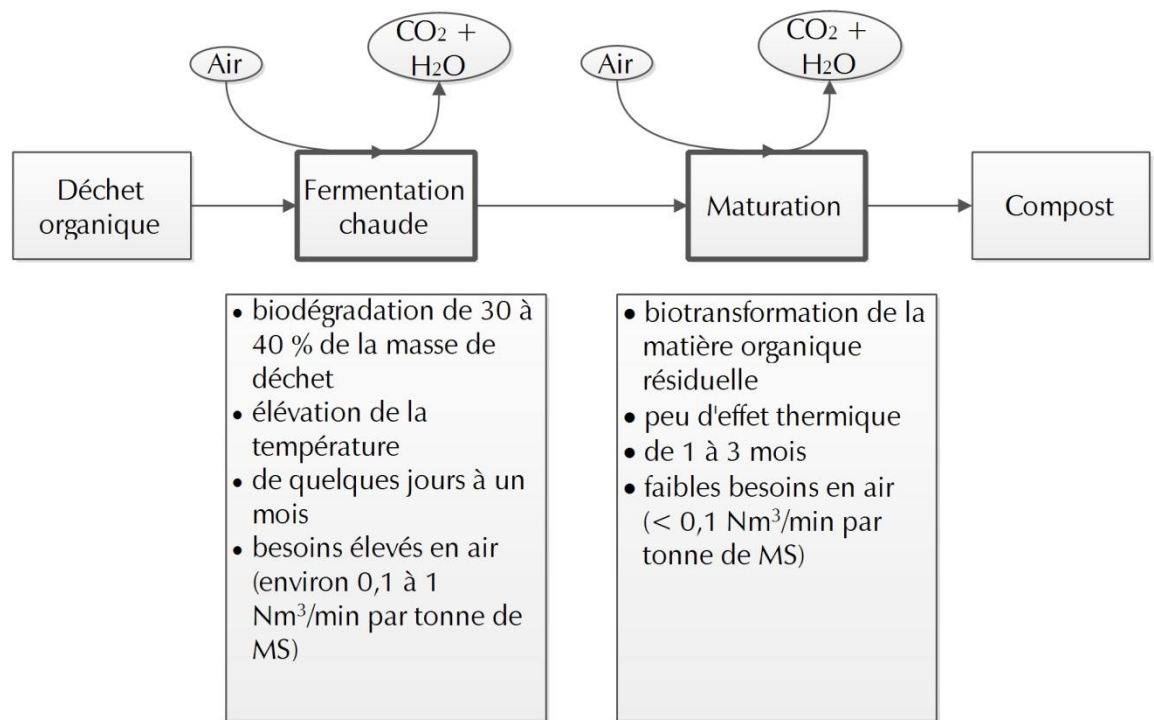


Figure 8 : *Etapes biologiques du compostage [9]*

3.1.3 La fermentation

La fermentation est le processus par lequel l'éthanol est produit à partir de la biomasse par voie biologique.

Les principales matières premières alcooligènes sont réparties en trois grandes catégories :

- Les plantes sucrières, comme la canne à sucre ou la betterave,
- Les plantes céréalières telles que le maïs, le blé, l'orge et les tubercules,
- Les plantes lingocellulosiques telles que les résidus agricoles, dont les pailles de céréales.

Les trois catégories de matière première possèdent chacun leur propre procédé pour la production d'éthanol.

Le procédé de fabrication de l'éthanol varie selon la catégorie de la matière première. Dans l'annexe 2 on trouve les différents procédés de fabrication de l'éthanol pour les trois grandes catégories de matière première.

3.2 CONVERSIONS THERMOCHIMIQUES [1][3][10][11][12][13]

La voie thermochimique regroupe l'ensemble des filières de valorisation énergétique de la biomasse principalement lignocellulosique, mettant en œuvre des procédés tels que la combustion, la pyrolyse et aussi la gazéification. Ces filières se sont développées jusqu'à présent dans le cadre de la production de chaleur et d'électricité.

3.2.1 La combustion directe

La combustion directe est la plus commune des technologies de conversion de la biomasse. Elle transforme, en présence de l'oxygène, de façon complète, la biomasse initiale carbonée en effluent gazeux composé principalement de CO_2 et H_2O tout en libérant de l'énergie. Dans la pratique, l'oxygène fourni, puisé dans l'air, est généralement supérieur à celui de la limite stœchiométrique.

La combustion directe nécessite une biomasse avec un taux d'humidité avoisinant ou inférieur à 15% sinon un séchage préalable sera nécessaire. La chaleur dégagée par la combustion peut être utilisée de différentes manières comme pour :

- la cuisson
- la génération de vapeur
- la production d'énergie mécanique et surtout de l'électricité.

3.2.2 La pyrolyse

Prise dans son sens étymologique de pyro (feu) et lyse (coupure), la pyrolyse est donc le processus de décomposition thermochimique des matières carbonées. Sous l'action de la chaleur et en l'absence d'agents oxydants (dans le cas général de l'oxygène), les principaux constituants de la biomasse sont convertis en trois phases valorisables sous forme de :

- Solide : charbon végétal
- Composés organiques condensables : bio-huile
- Gaz : CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , etc.

Le contrôle des paramètres opératoires permet d'orienter ces réactions vers la production préférentielle d'une de ces 3 phases et de maximiser le rendement.

d. Les mécanismes de la pyrolyse

Les mécanismes réactionnels de la pyrolyse de la biomasse lignocellulosique ont été largement étudiés tant sur ses constituants majoritaires (cellulose, hémicelluloses et lignine) que sur la biomasse elle-même. Pour simplifier, il est commun de classer les réactions de pyrolyse en réactions primaires et réactions secondaires.

Les réactions primaires donnent majoritairement des produits intermédiaires organiques plus ou moins stables à l'état vapeur. Ces vapeurs primaires sont ensuite impliquées dans les réactions secondaires qui conduisent à la formation de produits solides (charbon de bois, coke et suies) et liquides (huiles de pyrolyses ou bio-huiles).

En s'inspirant des travaux menés sur ses constituants majoritaires, il en ressort que la pyrolyse de la biomasse lignocellulosique peut être assimilée à une combinaison linéaire des réactions de pyrolyse de ses principaux constituants. Sur cette base, un schéma réactionnel global de la pyrolyse a été proposé (voir **Figure 9**).

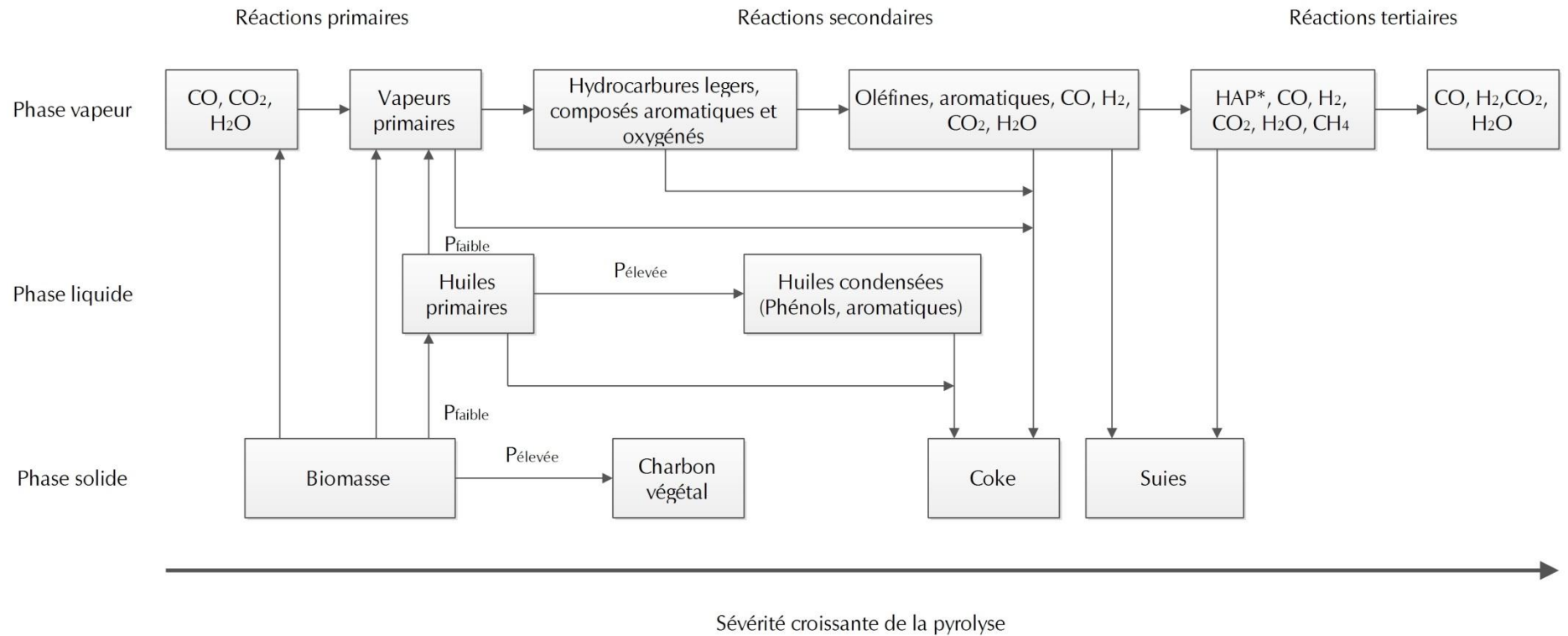


Figure 9 : Schéma réactionnel global de la pyrolyse [10]

HAP* : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

La notion de « sévérité de la pyrolyse » est corrélée à l'augmentation de la température, de la vitesse de chauffage et du temps de séjour des vapeurs primaires. Il est aussi à noter qu'en plus des réactions primaires et secondaires, il existe des réactions tertiaires qui s'expliquent par la formation des suies et de composés organiques volatils.

e. Les principaux paramètres réactionnels

Les principaux paramètres influençant la composition et la qualité des produits de la pyrolyse sont :

- La température
- La vitesse de chauffage
- Le temps de séjour dans le pyrolyseur
- La pression.

A titre d'exemple, le procédé de pyrolyse lente, réalisé à pression atmosphérique, qui se caractérise par une vitesse de chauffage faible de la biomasse ($< 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) en absence d'oxygène jusqu'à des températures de réaction relativement basse ($< 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) et des temps de séjour du solide de plusieurs heures, conduit à la formation du charbon végétal. Ou encore dans le procédé de pyrolyse dit rapide se caractérisant par une vitesse de chauffage élevée de la biomasse ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$), une température de réaction proche de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ et des temps de séjour des vapeurs primaires relativement faibles de l'ordre de 5s, produit un liquide brun foncé ou huile de pyrolyse.

La figure suivante montre les produits majoritaires de la pyrolyse de la biomasse à pression atmosphérique selon les conditions de température et de vitesse de chauffe.

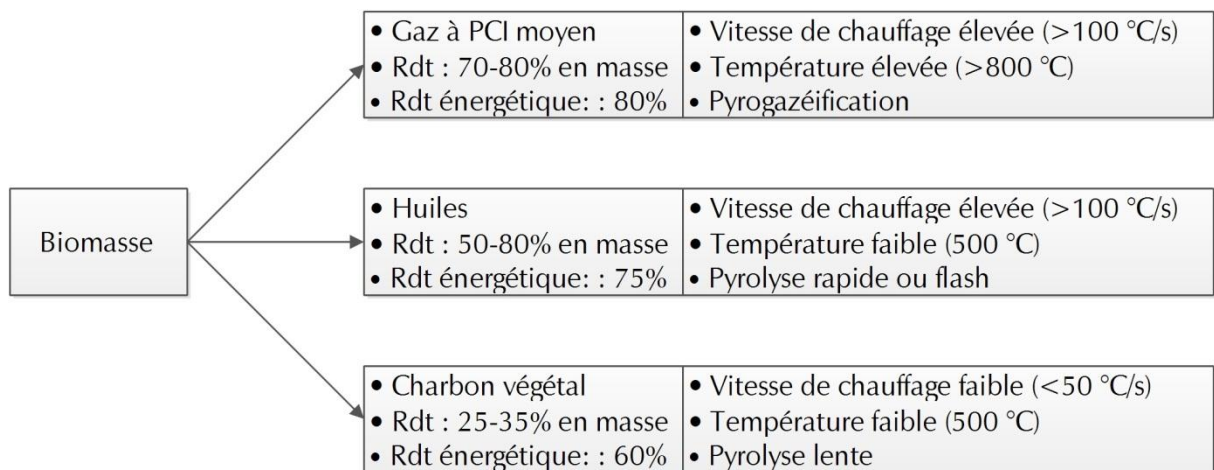


Figure 10 : Produits majoritaires de la pyrolyse de la biomasse à pression atmosphérique selon les conditions de température et de vitesse de chauffe (**source [10]**)

Et le tableau ci-après fournit la répartition des produits de réaction en fonction des conditions de pression.

Tableau 3 : Répartition des produits de réaction en fonction des conditions de pression (**source [10]**)

Produit de pyrolyse (% massique sur sec)	Pyrolyse lente (0,1 MPa)	Pyrolyse lente sous pression (>0,4 MPa)	Pyrolyse lente sous vide (15 kPa)
Huiles	30-35	25-30	60-65
Gaz	25-30	20-25	15-20
Charbon végétal	20-35	30-40	15-20

3.2.3 La gazéification

La gazéification fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4 : LA GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE

4.1 HISTOIRE ET SITUATION ACTUELLE [1][14][w9]

La première utilisation de gazéification déclarée fut en 1792 quand W. Murdoch, un ingénieur écossais, a utilisé le gaz de gazogène (gaz de synthèse ou syngas) pour illuminer son domicile.

C'est en 1816 qu'une unité de gazéification de la houille de taille industrielle a été implantée aux Etats-Unis pour la première fois à Baltimore pour éclairer les rues et les maisons.

L'utilisation du procédé de gazéification de la biomasse pour produire de l'énergie a commencé en 1930, au cours de la seconde guerre mondiale, quand environ 1 million de gazogènes ont été construits principalement pour le transport et la production d'électricité.

Après la guerre, l'utilisation des gazogènes a été interrompue due à la grande disponibilité du pétrole au Moyen Orient. Mais juste quelques temps en 1970, l'intérêt pour la gazéification a été relancé après la discussion sur la disponibilité du combustible fossile comparé à la demande qui ne cesse de croître.

A partir de l'an 2000, la quête de l'indépendance énergétique et l'augmentation rapide des prix du pétrole brut ont incité certains pays à reconnaître la nécessité pour développer des centrales IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle ou cycle combiné à gazéification intégrée).

La **figure 11** résume les dates qui ont marqué l'histoire de la gazéification.

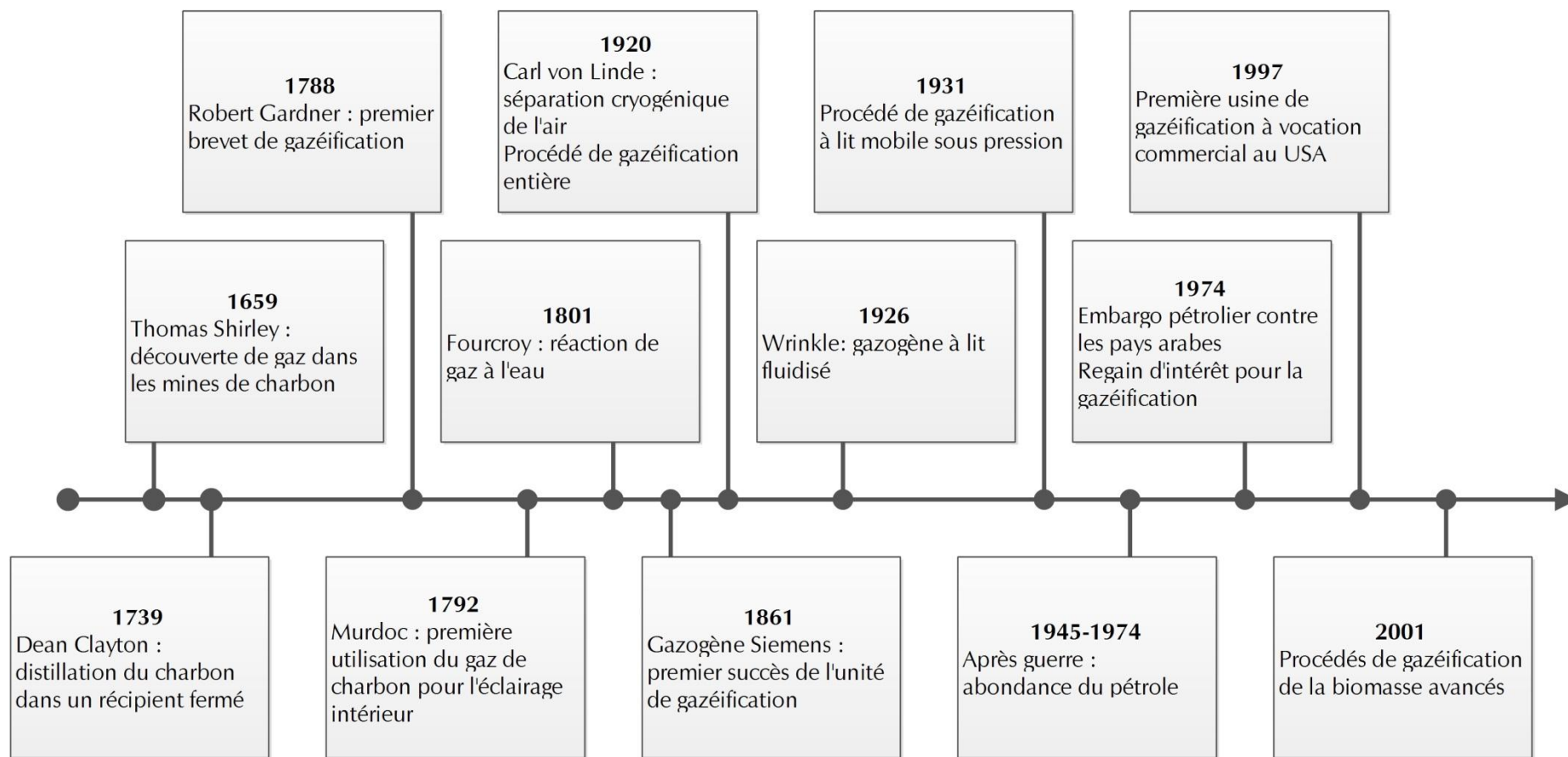


Figure 11 : Dates marquants sur l'histoire de la gazéification [1]

4.2 DEFINITION [1][3][4][5][w9]

La gazéification désigne une transformation thermochimique qui consiste à décomposer par l'action de la chaleur un combustible solide carboné (charbon ou biomasse) en présence d'un médium gazeux (oxygène, air, dioxyde de carbone, vapeur d'eau), à la différence de la pyrolyse qui est un processus thermique réalisé en l'absence de gaz de réaction, dans le but de produire un mélange gazeux combustible appelé gaz de synthèse ou « syngas », contenant principalement les espèces H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O .

4.3 ASPECTS THEORIQUES DE LA GAZEIFICATION [1][3][4][5][13][15]

La conception et l'exploitation d'un gazogène nécessitent une compréhension du processus de gazéification et les paramètres qui peuvent influencer le rendement du procédé.

4.3.1 Les différentes étapes de la gazéification

Les modifications chimiques et physiques qui se déroulent dans un gazéificateur sont assez complexes. A cette complexité s'ajoute la variabilité des matières premières de biomasse. Mais généralement le processus de gazéification se déroule en quatre étapes élémentaires : séchage de la matière première, pyrolyse des intrants, oxydation des gaz de pyrolyse et la réduction du carbone. Bien que ces étapes soient souvent modélisées en série, il n'y a pas de frontière nette entre eux.

a. Le séchage

Le séchage se produit au fur et à mesure que le combustible s'approche de la zone enflammée où la température du gaz environnant avoisine les 100 à 200 °C. Le séchage de la biomasse peut avoir des impacts importants sur les autres étapes de gazéification, c'est pourquoi, il est préférable d'avoir un taux d'humidité inférieur à 25 %.

b. La pyrolyse

La pyrolyse de la biomasse commence à 200 °C, elle se passe en absence d'air. Ici, une partie de la biomasse est transformée en goudrons d'hydrocarbures condensables, en méthane et en résidus de carbones solides (coke ou charbon). Cette étape de pyrolyse est

endothermique et tend à abaisser la température dans la zone correspondante dans le gazogène.

c. L'oxydation

Après la pyrolyse, les produits qui en sont issus passent par une zone d'oxydation où la température est de l'ordre de 1200 °C à 1500 °C. Les produits de pyrolyse s'oxydent en présence de l'oxygène et dégagent la chaleur nécessaire aux deux étapes précédentes et à l'étape suivante de la gazéification. Au cours de la combustion se dégagent aussi le CO₂ et H₂O qui vont ensuite réagir avec le coke lors de la phase de réduction.

d. La réduction

Cette étape se déroule à des températures comprises entre 800 °C et 1200° C. En l'absence d'oxygène, le coke obtenu lors de la phase de pyrolyse réduit la vapeur d'eau et le gaz carbonique obtenus dans l'étape d'oxydation respectivement en hydrogène et en oxyde de carbone pour former du syngas, combustible mélangeant en proportions variables CO et H₂.

4.3.2 Les réactions gouvernant la gazéification

Le tableau suivant liste les réactions chimiques importantes qui se déroulent dans le gazogène lors des quatre processus élémentaires.

Pour simplifier, nous allons considérer que la biomasse sèche est un pseudo-composé de formule CH_xO_yN_zS_w où x, y, z et w sont respectivement les rapports molaires des éléments H, O, N et S par rapport à C.

Tableau 4 : Réactions chimiques de la gazéification [13]

Zone	Réactions
Séchage	$\text{Biomasse humide} + \text{Chaleur} \rightarrow \text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w + \text{H}_2\text{O}$
Pyrolyse	$\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w + \text{Chaleur} \rightarrow \text{C} + \text{goudron} + a\text{NH}_3 + b\text{N}_2 + c\text{H}_2\text{S} + d\text{H}_2\text{O} + e\text{H}_2 + f\text{CH}_4$
Combustion	$\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} - 111\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} - 245\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 - 283\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{NH}_3 + \frac{3}{4}\text{O}_2 \rightarrow \frac{1}{2}\text{N}_2 + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} - 383\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{H}_2\text{S} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} - 563\text{kJ.mol}^{-1}$
Réduction	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 172\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2 + 131\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2 - 41\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 3\text{H}_2 + \text{CO} + 210\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{NH}_3 \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{N}_2 + \frac{3}{2}\text{H}_2 + 46\text{kJ.mol}^{-1}$ $\text{SO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} - 207\text{kJ.mol}^{-1}$

4.3.3 Les différents agents de gazéification

Les agents de gazéification, aussi appelés « medium » réagissent avec les produits de l'étape de pyrolyse dans la zone d'oxydation. Les principaux agents de gazéification sont :

a. L'oxygène

L'oxygène est un médium gazeux très utilisé dans les procédés de gazéification. Elle peut être fournie soit à l'état pur ou par l'intermédiaire de l'air.

Lorsqu'on utilise l'oxygène, le point représentant la biomasse dans le diagramme ternaire se déplace vers le coin de l'oxygène. Au-delà d'une certaine quantité d'oxygène, on passe de la gazéification à la combustion et le produit résultant n'est que de la fumée sans pouvoir calorifique résiduel.

b. La vapeur d'eau

Si la vapeur d'eau est utilisée comme agent de gazéification, le point représentant la biomasse dans le diagramme ternaire se déplace vers le coin de l'hydrogène. Le gaz produit contient alors plus d'hydrogène par unité de carbone, soit un rapport molaire H/C élevé.

4.4 CLASSIFICATION DES GAZOGENES [1][3][4][5][13][15][16][17]

Les gazogènes sont classés selon le mode de contact solide-gaz. Ils sont en général divisés en trois grands types :

- A lit fixe
- A lit fluidisé
- A lit entraîné.

4.4.1 Les gazogènes à lit fixe

Dans les gazogènes à lit fluidisé ou entraîné, l'agent de gazéification transporte les particules de combustible à travers le réacteur, mais dans les gazogènes à lit fixe, le combustible est supporté par une grille.

En fonction de la méthode d'introduction de l'air, les procédés à lit fixe peuvent être classés :

a. Procédés contre-courant ou updraft

C'est le premier type de gazogène qui a été développé. La biomasse est introduite par le haut et l'air entre par le bas à travers la grille qui supporte le combustible. Ainsi le gaz et le solide se déplacent à contre-courant. Le syngas est produit dans la zone de réduction et quitte le gazogène avec les produits de la pyrolyse et la vapeur d'eau de la zone de séchage par le haut comme le montre la figure. Le syngas est riche en goudron et

est seulement adapté à la combustion directe. S'il doit être utilisé pour la production d'électricité par un moteur à combustion interne, il doit être bien nettoyé.

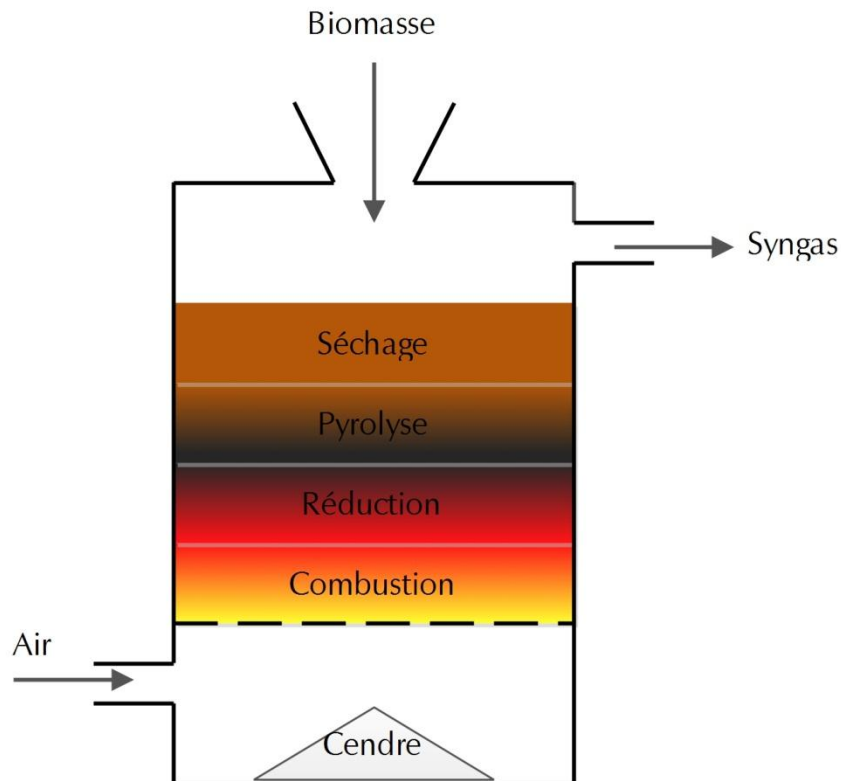


Figure 12 : Schéma de principe d'un gazogène updraft (adapté de [1])

b. Procédés co-courant ou downdraft

La biomasse est d'abord introduite à son sommet. De l'air est injecté à une certaine hauteur par des buses pour amorcer la combustion et fournir de la chaleur à l'ensemble du réacteur. L'intérêt de ce type de gazogène est de permettre le craquage thermique du goudron (produit de la pyrolyse) en produits gazeux. Dans la plupart des cas, le diamètre interne au niveau de la zone de combustion est rétréci pour forcer les produits de la pyrolyse à passer par cet étroit passage. Le mélange gazeux final contient moins de goudron donc plus propre pour une utilisation dans les moteurs à combustion interne.

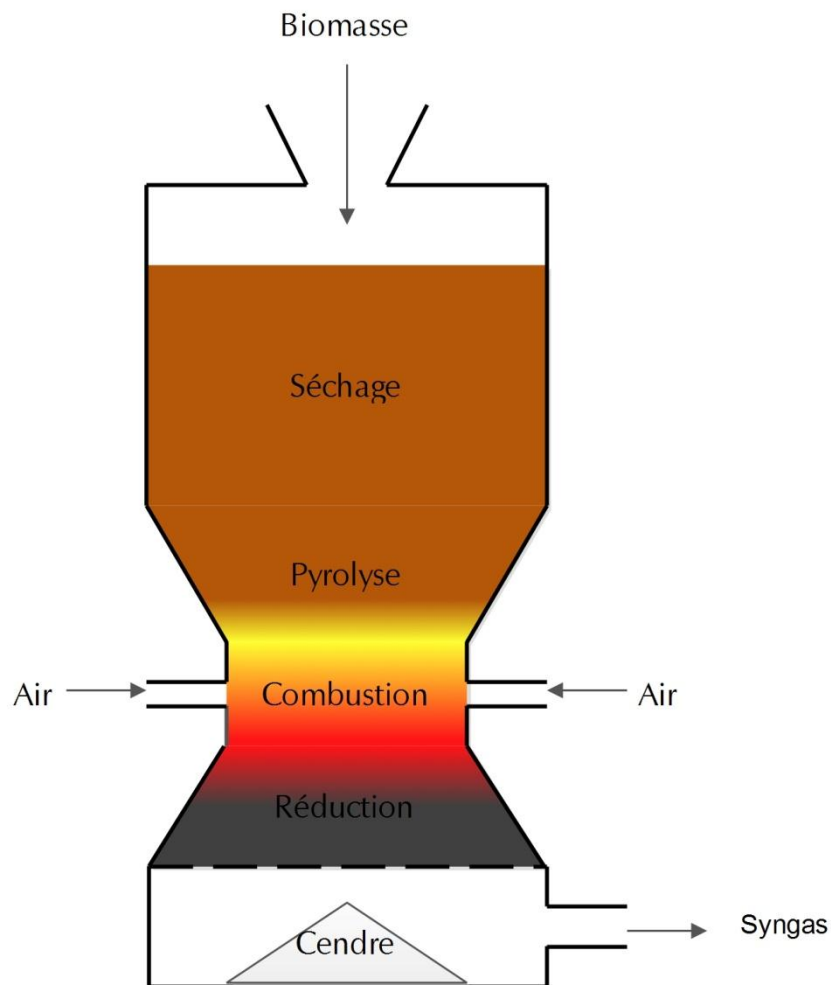


Figure 13 : Schéma de principe d'un gazogène downdraft (*adapté de [1]*)

c. Procédé "crossdraft"

Le combustible est toujours alimenté par le haut, tandis que l'air est injecté à grande vitesse par le côté à l'aide d'une seule buse. Le syngas sort à l'opposé de l'entrée d'air. Ce type de gazogène est utilisé seulement à petite échelle pour la gazéification du charbon végétal. Une de ses caractéristiques importantes est que la zone de réaction est relativement faible, ce qui donne un temps de réponse plus rapide que celui de n'importe quel type de gazogène à lit fixe.

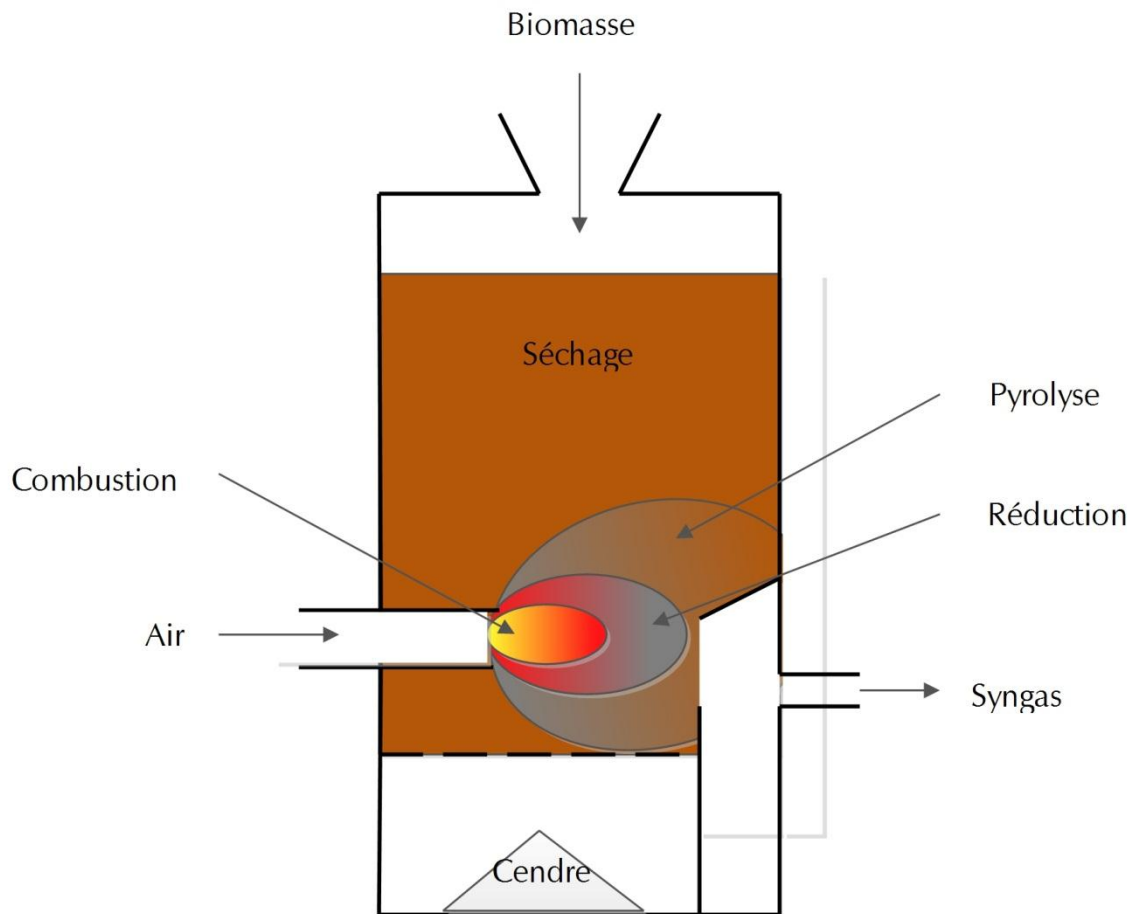


Figure 14 : Schéma de principe d'un gazogène crossdraft (adapté de [1])

4.4.2 Les gazogènes à lit fluidisé

Dans les procédés à lit fluidisé, les particules de biomasse sont mises dans un état semi-suspendu dans le réacteur grâce au passage de l'agent de gazéification avec une vitesse appropriée ; cela favorise les échanges thermiques et massiques entre le gaz et le solide.

Les gazogènes à lit fluidisé se sont avérés particulièrement avantageux pour la gazéification de la biomasse du fait que la conversion du carbone peut atteindre jusqu'à 97% à 99% et que le syngas produit ne contient que très peu de goudron comme dans le procédé downdraft. Il existe deux types de procédés à lit fluidisé :

- Le procédé à lit fluidisé dense ou « Bubbling Fluidized Bed BFB »

- Le procédé à lit fluidisé circulant ou « Circulating Fluidized Bed CFB »

Dans le procédé BFB, la biomasse broyée à moins de 10mm est introduite dans le réacteur par un convoyeur à vis. L'agent de gazéification est alimenté en deux niveaux. Le premier, à la base, est nécessaire pour maintenir le lit à la température désirée et le second pour convertir les particules de charbon qui n'ont pas réagi se trouvant au-dessus du lit.

Dans le procédé CFB, la vitesse de fluidisation est plus élevée (3,5-5,5m/s) contre (0,5-1m/s) dans le procédé BFB assurant un bon mélange des gaz et des solides, et de promouvoir ainsi un excellent transfert de chaleur et de masse. Les particules plus petites sont entraînées hors du réacteur. Un cyclone permet de séparer la phase solide, pour la faire ensuite recirculer dans le lit. La phase solide est donc continuellement en mouvement dans le réacteur.

Les particules plus grosses sont consommées plus lentement et sont recyclées en interne à l'intérieur du lit jusqu'à ce qu'elles soient assez petites pour le recyclage extérieur.

Comparé au procédé à lit fluidisé dense, le procédé à lit fluidisé circulant dispose d'une plus grande tolérance vis-à-vis du combustible.

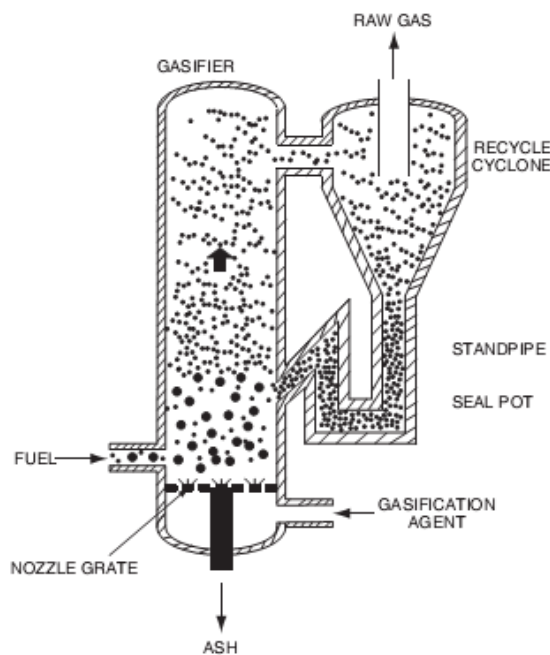


Figure 15 : Schéma de principe d'un gazogène à lit fluidisé [3]

4.4.3 Les gazogènes à lit entraîné

La vitesse de fluidisation est nettement supérieure à 6 m/s. Dans ce cas, les vitesses des particules et des gaz sont presque les mêmes. Le combustible doit être impérativement sous forme pulvérulente. La réaction se fait à très haute température (1200-1500°C) et à haute pression (20-50 bars) et avec comme agent de gazéification de l'oxygène, si bien que le gaz produit est très propre (en termes de teneur en goudrons). Cependant, le temps de séjour du solide dans le réacteur est très faible et ne permet pas la conversion totale du solide. Par ailleurs, la faible granulométrie du combustible implique des coûts de préparation importants et la complexité de la technologie la rend coûteuse et difficile à mettre en œuvre pour la biomasse qui est dans la plupart du temps sous forme fibreuse.

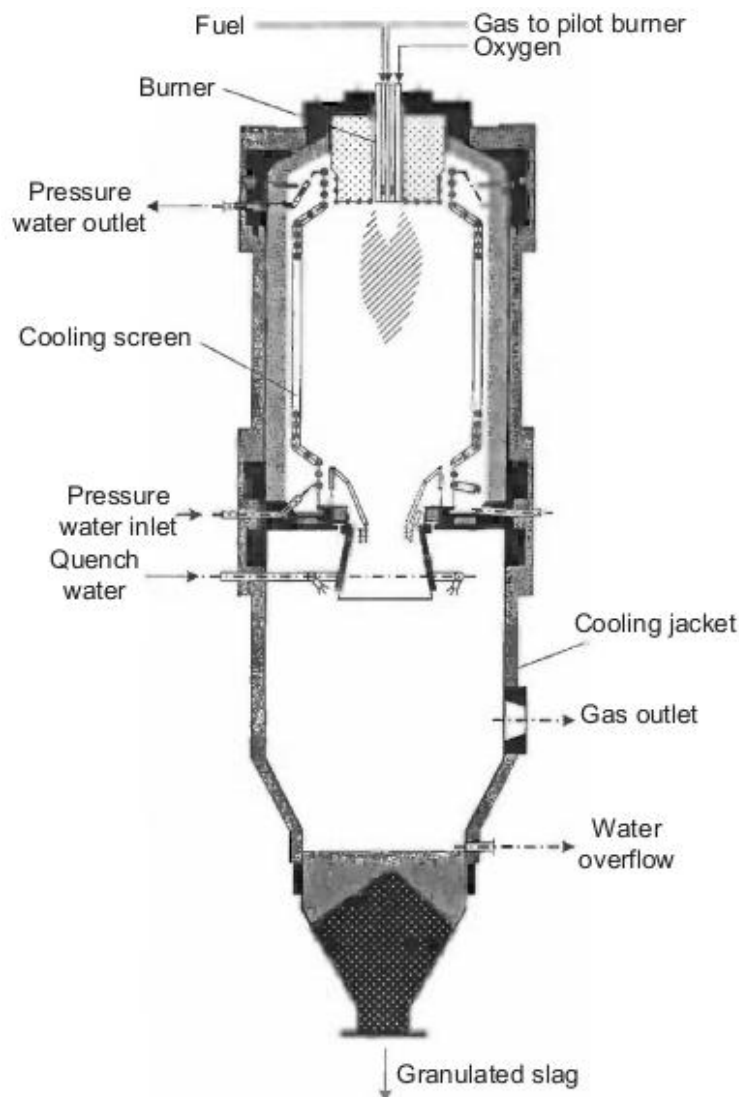


Figure 16 : Schéma de principe d'un gazéificateur à lit entraîné avec ravitaillement haut [1]

4.5 CHAMPS D'APPLICATION DES DIFFERENTS TYPES DE GAZOGENE [1][w10]

Un type de gazogène particulier n'est pas approprié à toutes les gammes de puissances désirées. Il existe pour chaque type de gazogène un domaine où il est plus économique. La figure ci-après permet de visualiser les champs d'application des différents types de gazogène en termes de puissance fournie.

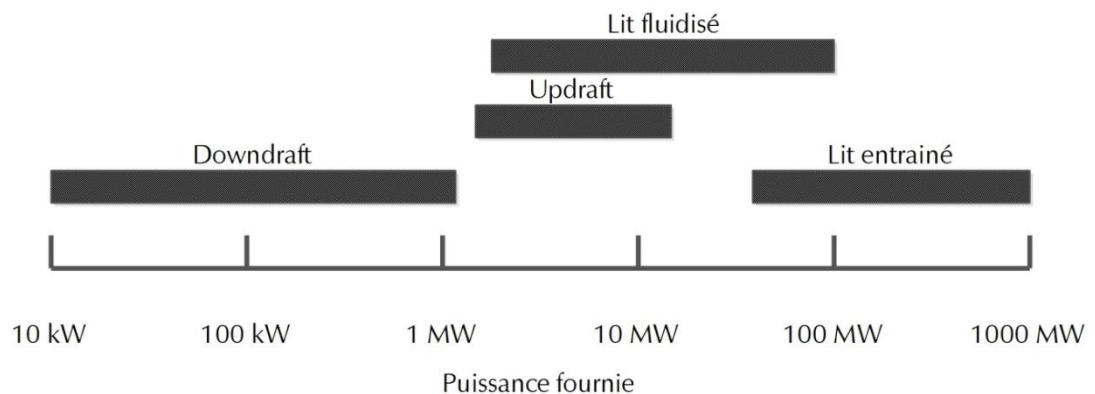


Figure 17 : Intervalle de puissance des différents types de gazogène (*source [1]*)

4.6 EFFETS DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR LE PROCESSUS DE GAZEIFICATION [18]

La composition du syngas varie en fonction du type de gazogène, de la matière première, de l'agent de gazéification et des paramètres opératoires tels que la température, la pression. Les effets des principaux paramètres affectant la qualité du syngas sont décrits dans ce qui suit.

4.6.1 La teneur en humidité

Une grande humidité dans la biomasse tend à accroître la quantité de CO_2 dans le gaz produit par la réaction de shift, qui consomme du CO et libère du CO_2 et de H_2 . La chaleur dégagée par la réaction de Shift ne permet pas de compenser la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'humidité, ce qui diminue considérablement la température à l'intérieur du gazogène lorsque la biomasse contient trop d'humidité. Il existe un seuil limite pour l'humidité, au-delà duquel le processus de gazéification ne sera plus autothermique.

4.6.2 Le rapport stœchiométrique

Le rapport stœchiométrique est le paramètre le plus influent dans tout processus de gazéification. Il est défini comme étant le rapport entre la quantité réelle d'air utilisée sur la quantité stœchiométrique nécessaire à la combustion complète d'une quantité de

biomasse. Cette définition est exactement la même que l'excès d'air utilisé principalement dans les procédés de combustion, si ce n'est qu'il est seulement utilisé pour des situations déficientes d'air, telles que celles trouvées dans les gazogènes.

$$\Phi = \frac{\text{air réel}}{\text{air stoechiométrique}} \quad (1.9)$$

Φ dicte les performances des gazogènes. Par exemple, pour la pyrolyse qui se déroule en absence d'air donc $\Phi = 0$. Or pour la gazéification de la biomasse, il se situe entre 0,2 et 0,3.

La qualité du gaz obtenu dépend fortement de Φ , qui doit être nettement inférieur à 1 pour s'assurer que la biomasse sera gazéifiée au lieu d'être brûlée.

Cependant, une valeur trop faible de Φ (<0.2) entraîne plusieurs problèmes, notamment une gazéification incomplète, la formation excessive de charbon et la production de gaz à faible pouvoir calorifique. D'autre part, une valeur trop élevée de Φ entraîne la formation des produits de combustion complète comme le CO_2 et H_2O au détriment des produits désirés comme CO et H_2 . Cela provoque une diminution du pouvoir calorifique du syngas. En pratique, la valeur de Φ est maintenue dans la plage de 0,2 à 0,3.

La figure suivant montre l'effet de Φ sur la composition du syngas

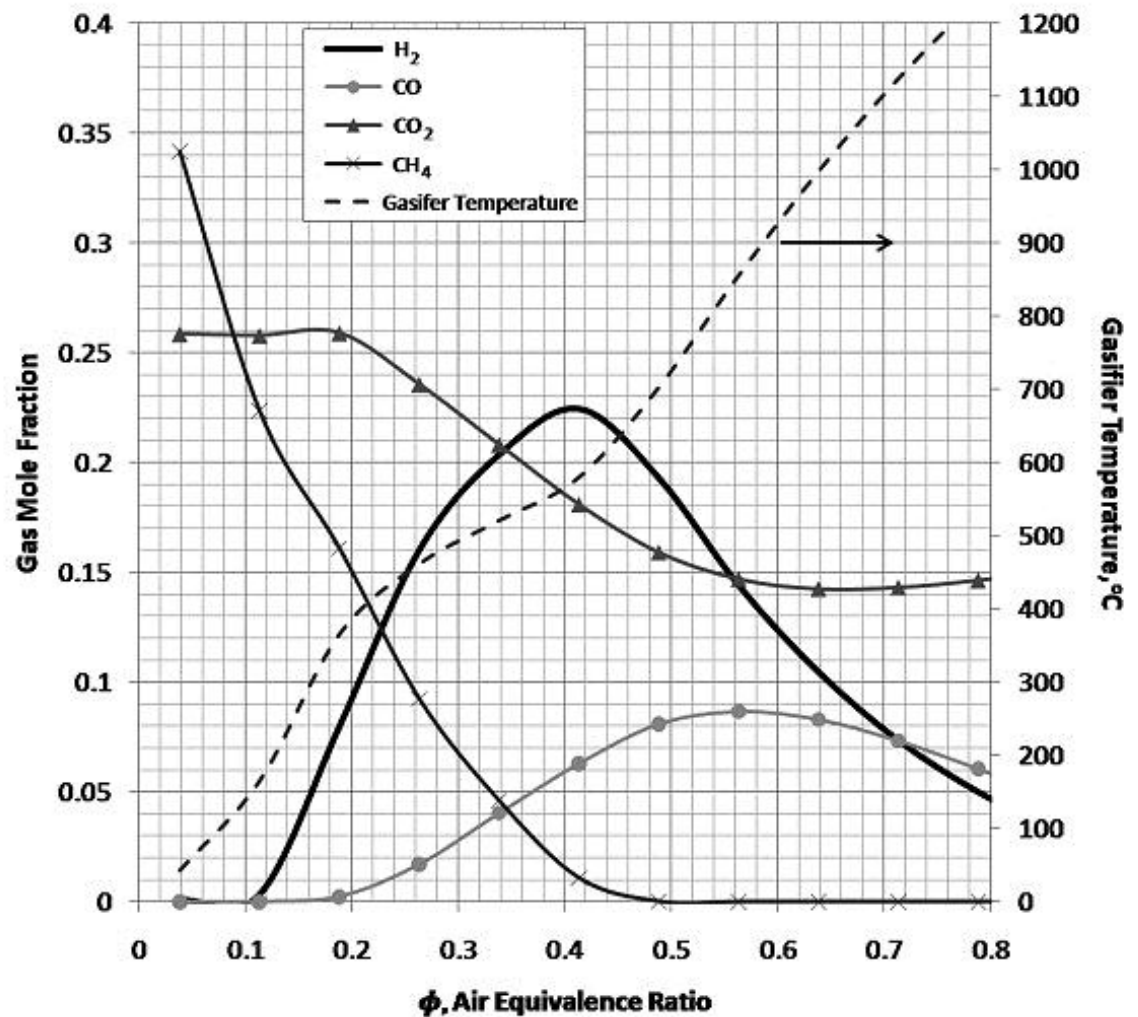


Figure 18 : Composition du syngas en fonction de Φ [13]

4.6.3 La température

La température de gazéification doit être contrôlée afin d'atteindre une meilleure conversion de la biomasse.

Les gaz riches en CO et H_2 sont produits à des températures supérieures à $800\text{ }^{\circ}C$, qui sont des températures typiques de la plupart des gazogènes (à lit fixe). Ce phénomène peut être dû au craquage plus important des goudrons.

4.6.4 La taille des particules

Les gazogènes à lit fixe n'ont pas de restriction en matière de taille des particules par rapport aux gazogènes à lit fluidisé. Généralement, les tailles recommandées sont de moins de 51 mm pour les gazogènes à lit fixe et de 6 mm pour les gazogènes à lit fluidisés.

DEUXIEME PARTIE :
ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 5 : MOTIVATION DU PROJET

5.1 CONTEXTE GENERAL [1]

La gazéification est presque tout aussi ancienne que la combustion, mais cette technologie a été délaissée. Cependant, il y a récemment un regain d'intérêt dans la conversion de la biomasse en gaz combustible dû à trois facteurs très motivants :

- Facteur « renouvelable »
- Facteur environnemental
- Facteur sociopolitique

5.1.1 Renouvelable

Les énergies fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel sont de bonnes sources d'énergie et leur utilisation est devenue pratique. Jusqu'à maintenant, elles répondent efficacement à la demande en énergie de la société. Pourtant, un grand problème se pose : ces ressources sont limitées et ne sont pas renouvelables.

La biomasse par contre, est renouvelable. Un arbre coupé aujourd'hui va repousser dans quelques décennies ou même peut être remplacé par un autre. Donc, à la différence des énergies fossiles, l'épuisement de la biomasse est peu sensible à la consommation. C'est pour cette raison que la production d'énergie à partir de la biomasse connaît une croissance rapide.

5.1.2 Bénéfices environnementaux

La substitution des énergies fossiles par la biomasse contribue à la baisse des émissions de gaz à effet de serre, principalement le CO₂. En effet, la quantité de CO₂ dégagé par la combustion de la biomasse est intrinsèquement égale à la quantité fixée par la plante au cours de sa croissance. On dit que la biomasse a une empreinte carbone nulle.

5.1.3 Bénéfices sociopolitiques

Les bénéfices sociopolitiques de la biomasse sont considérables. Certains affirment que l'utilisation de la biomasse comme carburant dans une usine crée vingt (20) fois plus d'emplois que celui utilisant les combustibles fossiles. Par conséquent, ceci a un impact positif sur l'économie locale.

Un autre aspect important de l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie est l'indépendance vis-à-vis des combustibles fossiles qui deviennent de plus en plus chers alors que la biomasse est presque gratuite si on peut le dire.

5.2 LE CONTEXTE ENERGETIQUE MALGACHE [20][21]

5.2.1 Le bilan énergétique actuel

La demande en énergie au niveau des ménages répond à la satisfaction de deux besoin principaux :

- Le besoin d'énergie pour la cuisson qui est satisfait jusqu'à maintenant par le Bois Energie. Le Bois énergie constitue l'énergie la moins chère et accessible aux ménages actuellement,
- Le besoin d'énergie pour l'éclairage qui est satisfait pour le moment par le pétrole lampant et l'électricité.

La fourniture d'énergie à Madagascar est assurée à hauteur de 92% par le bois énergie. Le bois énergie est principalement utilisé comme combustible au niveau des ménages. Le bois de chauffe constitue le type de bois énergie consommé par 82,2% des ménages à Madagascar. 77,7 % des ménages s'approvisionnent en bois ramassé, dont la majorité se trouve en milieu rural. Les ménages qui s'approvisionnent ainsi, collectent en fait les bois morts pour leur besoin de cuisson, donc ceux qui sont déjà tombés par terre. Toutefois, il existe des cas où l'approvisionnement s'effectue par voie marchande (4,5%). Tandis que le charbon de bois est consommé par 17,1% des ménages qui se trouvent principalement en milieu urbain. Le charbon est acheté par 47% des ménages vivant en

milieu urbain, de l'ordre de 431 000 ménages. Il constitue la principale source d'énergie de cuisson en ville.

Le tableau suivant récapitule la répartition des sources d'énergie de cuisson selon l'INSTAT (enquête EPM 2010)

Tableau 5 : Répartition des sources d'énergie de cuisson dans les ménages [20]

		Bois ramassés	Bois achetés	Charbon	Autres	Total
Ménages urbains	Nombre	412 813	56 026	431 455	18 726	917 020
	%	45,00	6,10	47,10	1,80	100
Ménages ruraux	Nombre	2 831 663	133 488	283 571	10618	3 259 340
	%	86,90	4,10	8,70	0,30	100
Ménages totaux	Nombre	3 244 476	189 514	715 026	27 344	4 178 360
	%	77,70	4,50	17,10	0,70	100

En ce qui concerne le mode d'utilisation de cette énergie (bois énergie), une grande proportion des ménages dépend encore des cuiseurs traditionnels « fatapera gasy » pour le charbon de bois tandis que pour le bois de chauffe, le recours au trépied « toko » de toute sorte, reste la pratique la plus courante. Ces cuiseurs traditionnels ont l'inconvénient d'avoir un très faible rendement énergétique et entraînent d'importantes pertes.

Les produits pétroliers fournissent 7,3% des offres énergétiques à Madagascar. Le pays importe 6 types de Produits Pétroliers depuis 2011 : Gasoil qui représente 54 % du volume, Fuel oil avec 13 % du volume, Gaz, Essence super 95 (sans plomb), Essence aviation.

La part des énergies renouvelables représente encore une faible partie de la production, or le pays dispose d'une grande potentialité en termes de ressources pour la

production d'énergie solaire, d'énergie éolienne et de bioénergie qui ne demande qu'à être exploitées.

5.2.2 Le secteur électricité à Madagascar

La fourniture en énergie électrique est assurée par le réseau de la société d'Etat JIRAMA. La compagnie est chargée d'assurer de distribuer sur tout le territoire à un prix abordable pour ses abonnés. Cependant, de faibles capacités d'investissement ainsi que la nécessité de renouvellement de son parc de production ne lui permettent plus, depuis quelques années, d'assurer l'électrification de l'ensemble du pays, et notamment des zones rurales. Selon l'INSTAT, seuls 12% des ménages malgaches ont accès à l'électricité avec une inégalité flagrante quant à l'accès à l'électricité en milieu rural et milieu urbain. En effet, dans le milieu rural où vit plus de 70 % de la population, seuls 4,8 % des ménages ont accès à l'électricité en 2010 contre 39% en milieu urbain.

5.2.3 Solutions pour l'électrification rurale

L'électrification rurale devra avoir une orientation totale vers les énergies renouvelables en valorisant les sites hydroélectriques, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la biomasse. En matière de biomasse, Madagascar possède plusieurs ressources valorisables :

- La bagasse issue de la transformation de la canne à sucre et de la production du sucre et de l'éthanol : les zones potentielles concerneront donc celles qui font la culture de canne à sucre et fournit les sucreries.
- La balle de riz issue des rizeries : les zones potentielles concerneront les greniers à riz de Madagascar comme la région Alaotra Mangoro dont la zone d'Ambatondrazaka, Amparafavola, la région Boeny dont la zone de Marovoay.
- Les déchets des produits forestiers : les zones potentielles concernent par exemple celles traversées par la forêt de Fanalamanga.
- Les déchets ruraux.

5.3 OBJECTIFS DE L'ETUDE

La principale raison d'être de cette étude est la conception et la réalisation d'un gazogène à petite échelle dans le but de valoriser la biomasse, principalement des déchets, à Madagascar en un gaz utilisable comme combustible : le syngas. Bien que l'utilisation du syngas obtenu soit large, il a été décidé que pour l'instant, le syngas sera destiné seulement à la cuisson au lieu d'alimenter un moteur à combustion interne.

CHAPITRE 6 : CONCEPTION ET REALISATION DU GAZOGENE

6.1 CHOIX DU TYPE DE GAZOGENE

Nous avons choisi de réaliser un gazogène à lit fixe de type co-courant (downdraft) pour notre étude. Les raisons de ce choix sont :

- Les gazogènes à lit fixe sont les mieux adaptés aux contextes des pays en voie de développement comme Madagascar. La taille des installations est convenable à l'utilisation domestique (cuisson) ou production d'électricité à petite échelle.
- Le gazogène downdraft est préféré par rapport à l'updraft, pour la qualité du gaz produit qui contient moins de goudron et donc multi-usage.
- Les matériaux de construction sont faciles à se procurer dans les différentes brocantes.

6.2 CHOIX DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Lors du choix des matériaux nécessaires à la fabrication de notre gazogène, nous avons pris en compte les contraintes suivantes :

- La disponibilité des matériaux
- Le coût
- La durabilité de l'appareil.

On a choisi donc l'acier ordinaire, qui est un matériau résistant à l'usure du temps et aussi disponible. Tous les matériaux utilisés sont de récupération. A part l'acier ordinaire, nous avons aussi quelques pièces en acier galvanisé comme les tuyauteries qui sont faites à partir des chutes de tuyaux galvanisés.

6.3 QUELQUES CONTRAINTES ETABLIES

Pour contribuer au développement du pays par l'apport d'une technologie innovante, nous avons cherché par tous les moyens à n'utiliser que des matériaux de récupération. En effet, l'utilisation des matériaux de récupération permet d'amoindrir le coût du gazogène et ainsi grand nombre de malgaches pourraient en bénéficier.

Pour que notre gazogène puisse avoir une grande souplesse en matière de combustible utilisé, un des paramètres le plus important est le débit d'air entrant. En effet, le débit d'air n'est pas le même pour les combustibles tels que la balle de riz, le bois ou même la bagasse de canne à sucre. La recherche d'un moyen permettant de varier ce débit est donc primordial.

6.4 LES COMPOSANTS DU GAZOGENE

Les composants de notre gazogène sont divisés en deux groupes. Il y a les composants qui constituent le corps du gazogène et les équipements auxiliaires.

6.4.1 Le corps du gazogène

Pour avoir la possibilité de réparation ou de modification, nous avons décidé de réaliser le corps du gazogène en deux éléments séparables.

a. La chambre de réaction avec la trémie

Cette partie constitue le cœur du gazogène. C'est à l'intérieur de celle-ci que se passent les quatre étapes de la gazéification. Elle a été faite à l'aide d'un tube cylindrique en acier ordinaire de hauteur 450 mm, de diamètre intérieur 260 mm et une épaisseur de 4 mm. L'acier est un matériau qui peut supporter une température allant jusqu'à 1400 °C et pour ne pas subir trop de déformation due à la chaleur, l'épaisseur minimum admise est de 3 mm.

En bas du tube est soudée une plaque épaisse (5mm) perforée qui maintient le combustible et permet le passage des gaz.

Dans la version première de notre gazogène, il n'existait pas de resserrement au niveau de la zone de combustion du gazogène, mais après avoir constaté la grande quantité de goudron imbrulé dans le gaz produit, nous avons modifié le gazogène en installant un dispositif de restriction au niveau de la zone de combustion. En effet, l'existence de la gorge force les goudrons à passer dans la zone étroite très chaude permettant ainsi sa destruction par craquage thermique.

L'air est alimenté à la partie basse du gazogène, au tiers de la longueur de la chambre de réaction (qui est une hauteur très commune dans les gazogènes downdraft). D'abord, l'air est amené dans une chambre placée en haut sur le périphérique du réacteur avant d'être distribué à l'aide de 3 conduites et ensuite injecté par des buses dans la zone de combustion. Le nombre de buses doit être un nombre impair de telle sorte que le jet d'une buse ne touche pas le jet du côté opposé, en laissant un espace mort entre les deux.

Afin de permettre l'assemblage de la chambre de réaction avec son enveloppe, une bride est soudée à 100 mm du haut. Des trous sont percés sur la périphérie de la bride pour l'assemblage par boulon.

La figure suivante montre les différentes vues de la chambre de réaction.

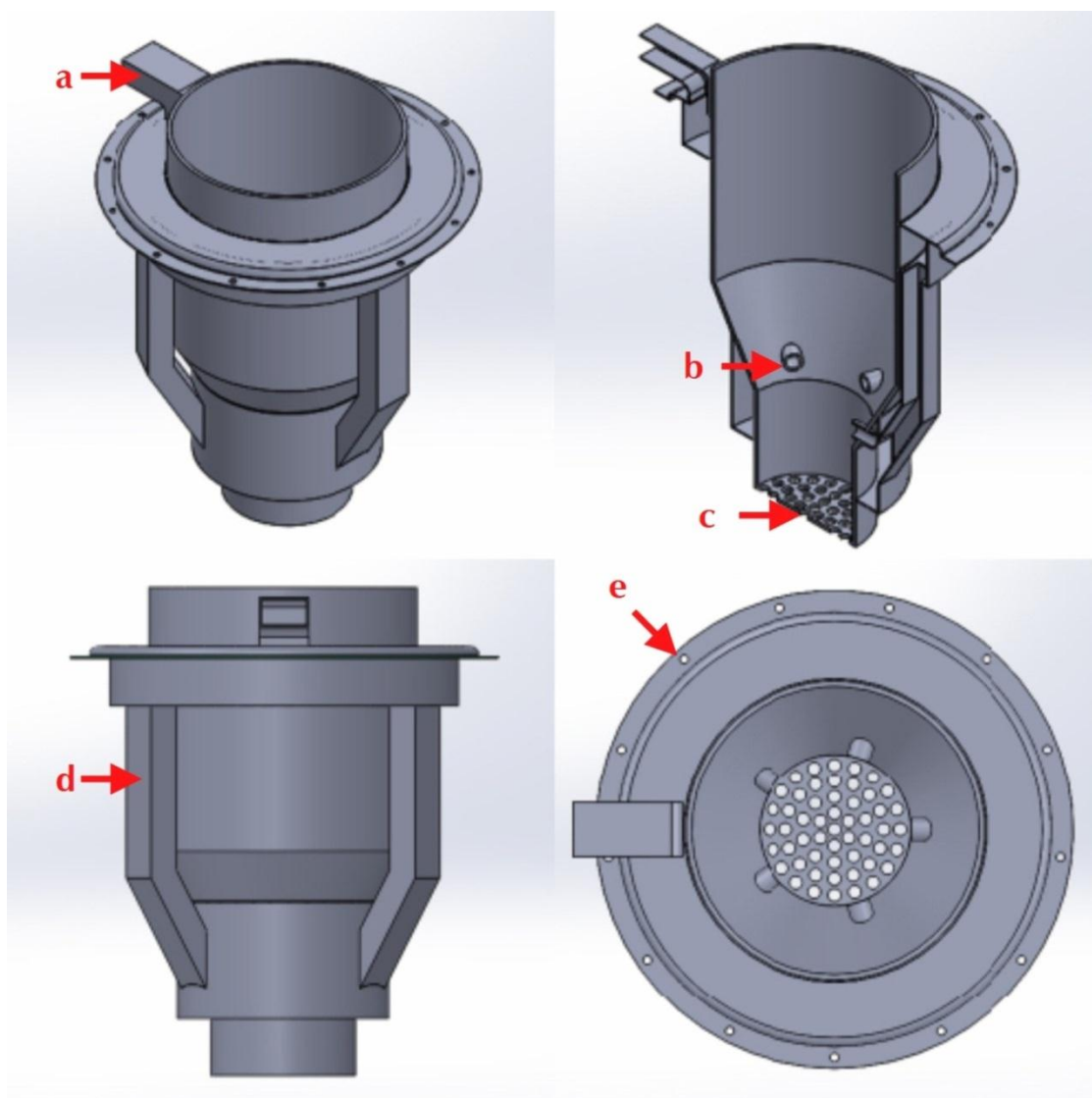


Figure 19 : Différentes vues de la chambre de réaction avec : (a) entrée d'air principale, (b) buse, (c) grille, (d) conduite de distribution d'air et (e) bride

Voici la photo de la chambre de réaction après la construction.



Figure 20 : *Photographie de la chambre de réaction*

Le réacteur est surmonté d'une trémie dont l'usage permet un approvisionnement continu de biomasse dans le réacteur pendant un certain temps. La trémie a été construite à l'aide d'une ancienne cuve de chauffe-eau dont les dimensions sont respectivement pour la hauteur et le diamètre de 500 mm et 400 mm. La trémie est fermée par un couvercle sur la partie supérieure qui empêche l'air d'entrer par le haut.

La figure suivante montre les différentes vues de la trémie de stockage de la biomasse.

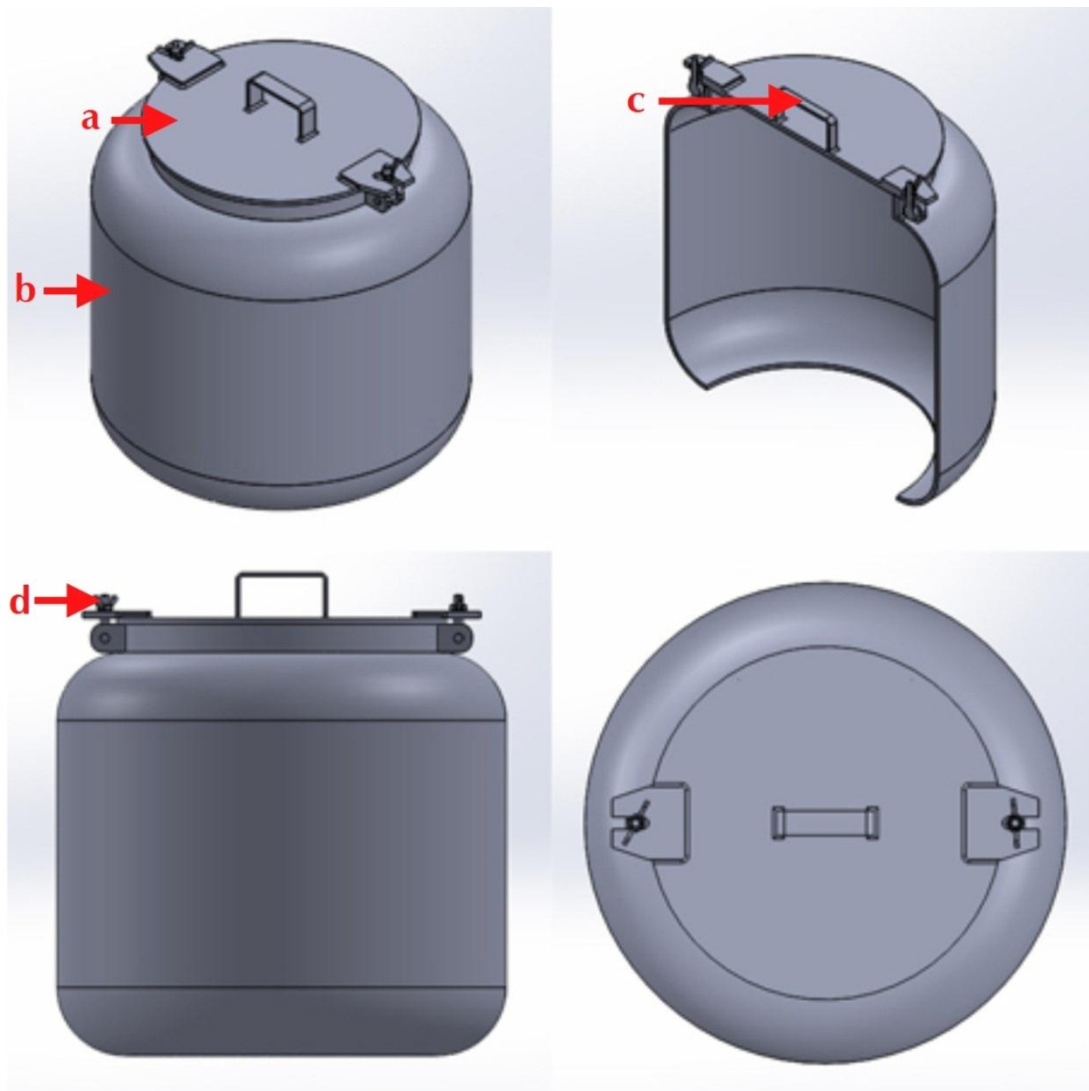


Figure 21 : Différentes vues de la trémie avec : (a) couvercle, (b) corps de la trémie, (c) poigné et (d) écrou de serrage à la main

b. L'enveloppe

L'enveloppe permet de stocker intermédiairement le gaz produit qui sort par les perforations de la grille qui maintient le combustible mais aussi de récupérer les cendres. Il a été construit à l'aide d'une vieille cuve de vidange dont la taille pouvait contenir parfaitement la chambre de réaction. Sur le bord supérieur est soudée l'autre partie de la bride nécessaire à l'assemblage du corps du gazogène. Lorsque tous les boulons ayant été serrés, l'espace entre l'enveloppe et le réacteur devenait hermétique et le gaz ne pouvait

être évacué que par une perforation faite sur l'enveloppe. Nous avons perforé l'enveloppe sur sa surface latérale à une certaine hauteur. Le gaz sort donc de ce trou et passe dans les équipements auxiliaires.

Pour récupérer les cendres, une ouverture a été installée au fond de la cuve.

La figure ci-après montre l'enveloppe de la chambre de réaction sous différentes vues.

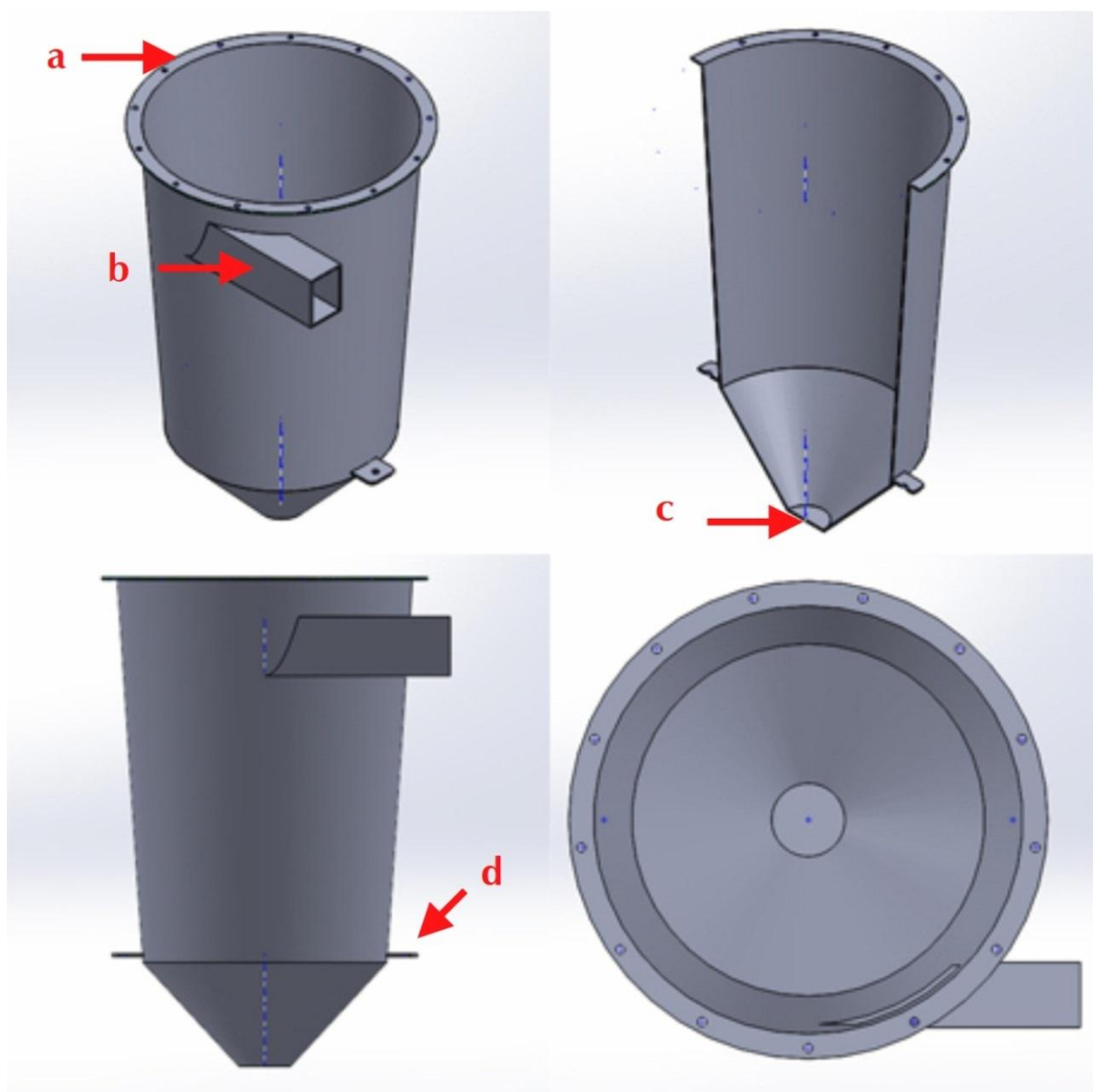


Figure 22 : Différentes vues de l'enveloppe avec : (a) bride, (b) sortie du syngas, (c) récupération du cendre et (d) fixation avec le cadre

6.4.2 Les équipements auxiliaires

Les équipements auxiliaires comprennent : un système de séparation solide-gaz (le cyclone), un ventilateur centrifuge, un moteur, un dispositif mécanique de variation de tour et un refroidisseur.

a. Le cyclone

A la sortie de la chambre de combustion, le syngas contient des particules de charbon en suspension qui est nuisible aux moteurs à combustion interne. Bien que l'étude se porte seulement sur l'utilisation du syngas pour la cuisson donc pas de nécessité de purification du gaz, nous avons jugé important de prémunir notre gazogène d'un dispositif de purification pour anticiper les éventuelles travaux ultérieures entre autre la production d'électricité.

Le cyclone est un classificateur statique de forme cylindro-conique. Le gaz est introduit tangentiellement à la section du cylindre. Un puissant vortex est créé à l'intérieur du corps du cyclone. Le flux qui en résulte peut être schématisé par une spirale descendante externe et une spirale ascendante interne. La spirale externe dirige les particules en suspension vers la sousverse, alors que la deuxième spirale permet l'évacuation du gaz purifié vers le diaphragme situé en haut.

La **Figure 9** illustre un cyclone à flux inversé, un séparateur qui est largement utilisé dans les procédés de gazéification.

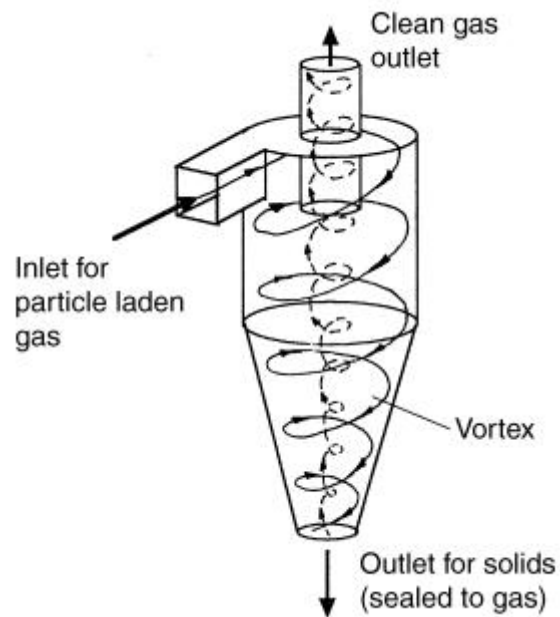


Figure 23 : Schéma d'un séparateur cyclone à flux inversé

Le cyclone que nous avons construit est en tôle. On trouve les différentes vue de notre cyclone dans la figure suivante.

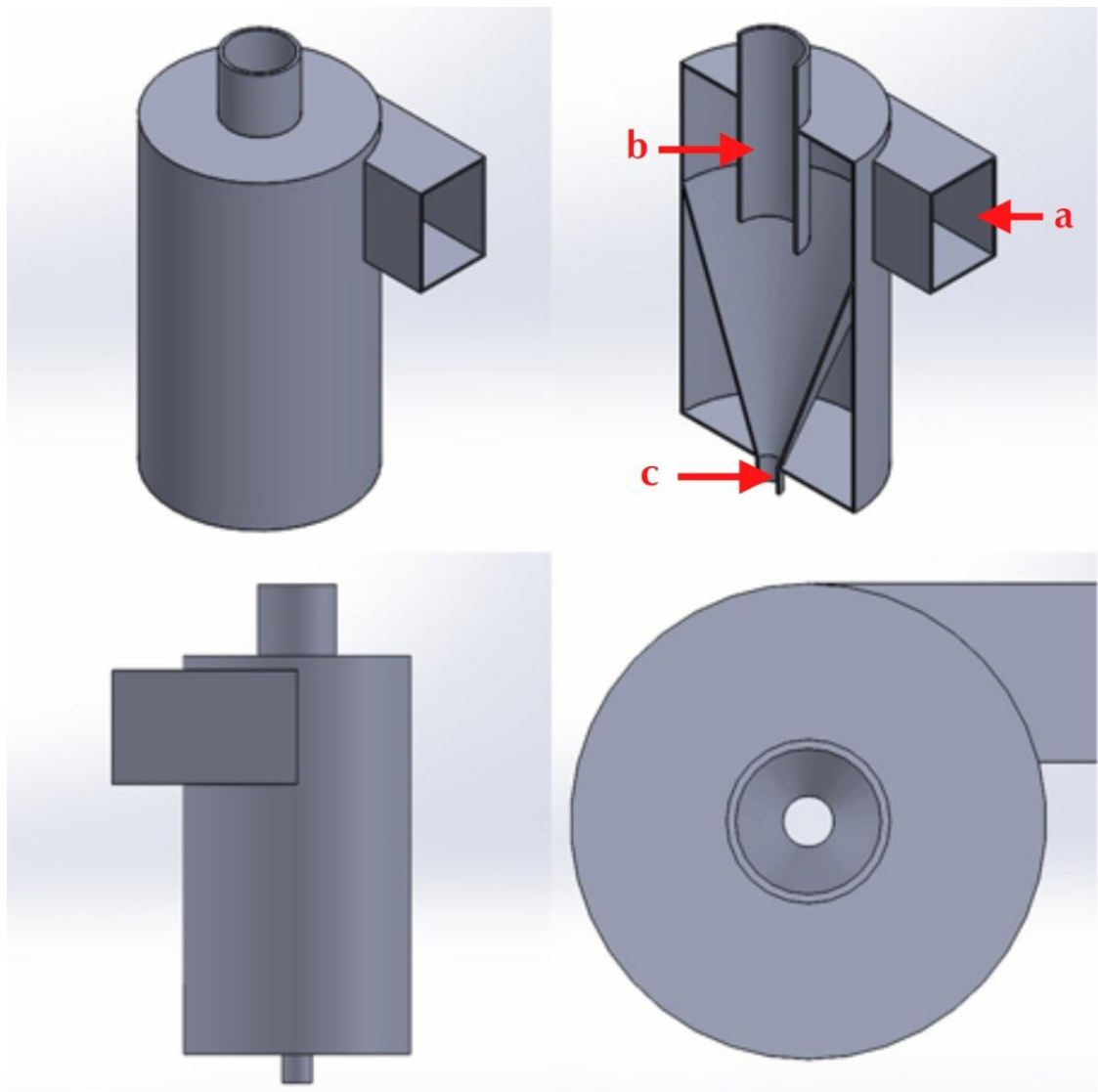


Figure 24 : Différentes vues du cyclone avec : (a) entrée du syngas impur, (b) diaphragme de sortie du gaz purifié et (c) récupération des particules de charbon

b. Le ventilateur centrifuge

Le ventilateur centrifuge est le poumon du gazogène. Cet appareil permet en même temps l'entrée de l'air dans le gazogène et l'évacuation du syngas produit.

Les composants de base du ventilateur consistent en une roue et un carter pour diriger le débit d'air.

Le schéma suivant illustre un ventilateur centrifuge avec ses différents composants.

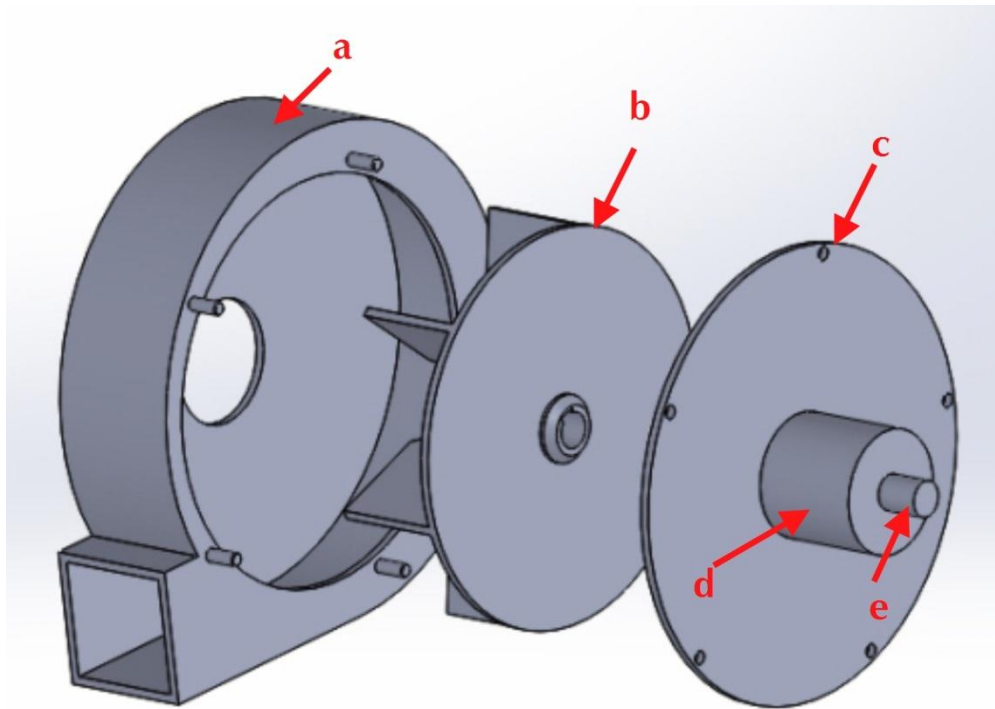


Figure 25 : Les composantes d'un ventilateur centrifuge avec : (a) carter, (b) roue, (c) porte roue, (d) palier et (e) arbre

L'air est aspiré parallèlement à l'axe de rotation de la roue et propulsé par force centrifuge perpendiculairement à ce même axe.

Selon la configuration des pales, il existe 3 types de ventilateur centrifuges :

- Les ventilateurs à pales courbées vers l'avant

Les pales courbées vers l'avant sont montées sur une roue souvent appelée rotor à cage d'écureuil. Ce type de ventilateur génère un grand volume d'air relativement à sa taille, de plus il est très léger et économique. Mais son plus gros défaut, c'est qu'il est très sensible à l'encrassement parce que les pales peuvent accumuler des dépôts, ce qui réduit considérablement leur performance. D'ailleurs, elles ne sont utilisées que pour le déplacement d'un gaz très propre.

- Les ventilateurs à pales radiales

Les ventilateurs à pales radiales sont les plus simples et les moins efficaces. Ils sont utilisés lorsqu'il y a beaucoup de particules dans l'écoulement de gaz.

- Les ventilateurs à inclinées vers l'arrière

Les pales sont inclinées d'un certain angle par rapport aux rayons. Leur rendement est beaucoup plus élevé que celui des ventilateurs à pales radiales. Les pales résistent bien à l'abrasion et sont ainsi idéales pour le traitement de gaz contenant un taux moyen de particules.

Pour le choix de la configuration des pales de notre ventilateur centrifuge, nous avons opté pour le ventilateur à pales inclinées vers l'arrière du fait de son efficacité par rapport aux ventilateurs à pales radiales mais aussi que le gaz produit par notre gazogène contient un taux assez élevé de particules. Le nombre de pales utilisées est de 6.

La figure suivante montre le schéma de notre roue avec les 6 pales.

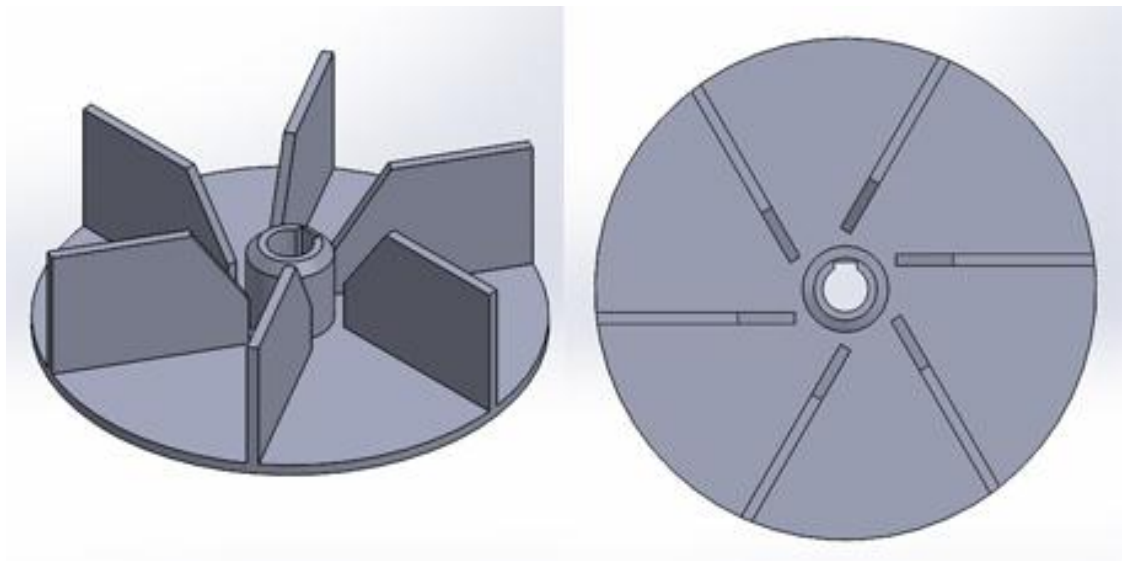


Figure 26 : Schéma de l'assemblage roue-pales

Nous avons placé le ventilateur centrifuge en aval de la chambre de réaction. Lorsque la roue supportant les pales tourne, elle crée une dépression qui aspire l'air depuis l'entrée d'air principale vers la zone de combustion et ensuite le gaz produit à

travers le cyclone avant d'être expulsé dans le refroidisseur. La vitesse de rotation de la roue détermine le débit de gaz déplacé.

Lors de la conception, pour que notre ventilateur soit robuste, nous avons choisi d'utiliser des matériaux épais de l'ordre de 4 mm.

c. Le moteur

Comme on a besoin de faire tourner la roue de notre ventilateur centrifuge à une vitesse assez élevée pendant une période pouvant aller jusqu'à plusieurs heures, on ne peut pas se passer de l'utilisation d'un moteur.

Nous avons à notre disposition un moteur électrique asynchrone monophasé dont les caractéristiques sont données dans le tableau suivant.

Tableau 6 : *Caractéristiques du moteur*

Marque	GEORG SAHM
Puissance nominale	0,75 kW
Tension d'alimentation	220-230 V
Courant nominal	5,40 A
Vitesse de rotation	2800 tr/ min à 50 Hz et 3360 tr/min à 60 Hz
Facteur de puissance	$\cos(\varphi) = 0,82$
Condensateur permanent	25 μ F – 450V

d. Le variateur de vitesse

Un des soucis majeurs lors de la construction de notre gazogène, c'est que nous ignorons le nombre de tours nécessaires pour faire tourner la roue. Il fallait donc trouver un moyen de faire varier cette vitesse.

Il existe pour cela deux types de variateur de vitesse :

- Le variateur électronique
- Le variateur mécanique

❖ Le variateur électronique

Le principe du variateur électronique pour moteur asynchrone repose sur la variation de la fréquence de la tension d'alimentation. Ce système est très complexe donc nous l'avons délaissé.

❖ Le variateur mécanique

Le variateur mécanique peut être un système d'engrenages (comme dans les boîtes à vitesse) ou un système poulie menante-poulie menée à plusieurs diamètres. Ces deux systèmes classiques ne sont toujours pas appropriés dans notre cas parce nous ne voulons pas fixer au préalable des vitesses pour la roue et en plus la variation de vitesse doit se faire en continu et sans arrêter le moteur.

Après plusieurs conceptions toutes vouées à l'échec, nous avons fini par inventer un système permettant de faire varier en continu la vitesse au niveau de la roue et sans arrêter le moteur.

La figure suivante montre la photographie du système de variation de vitesse conçu.

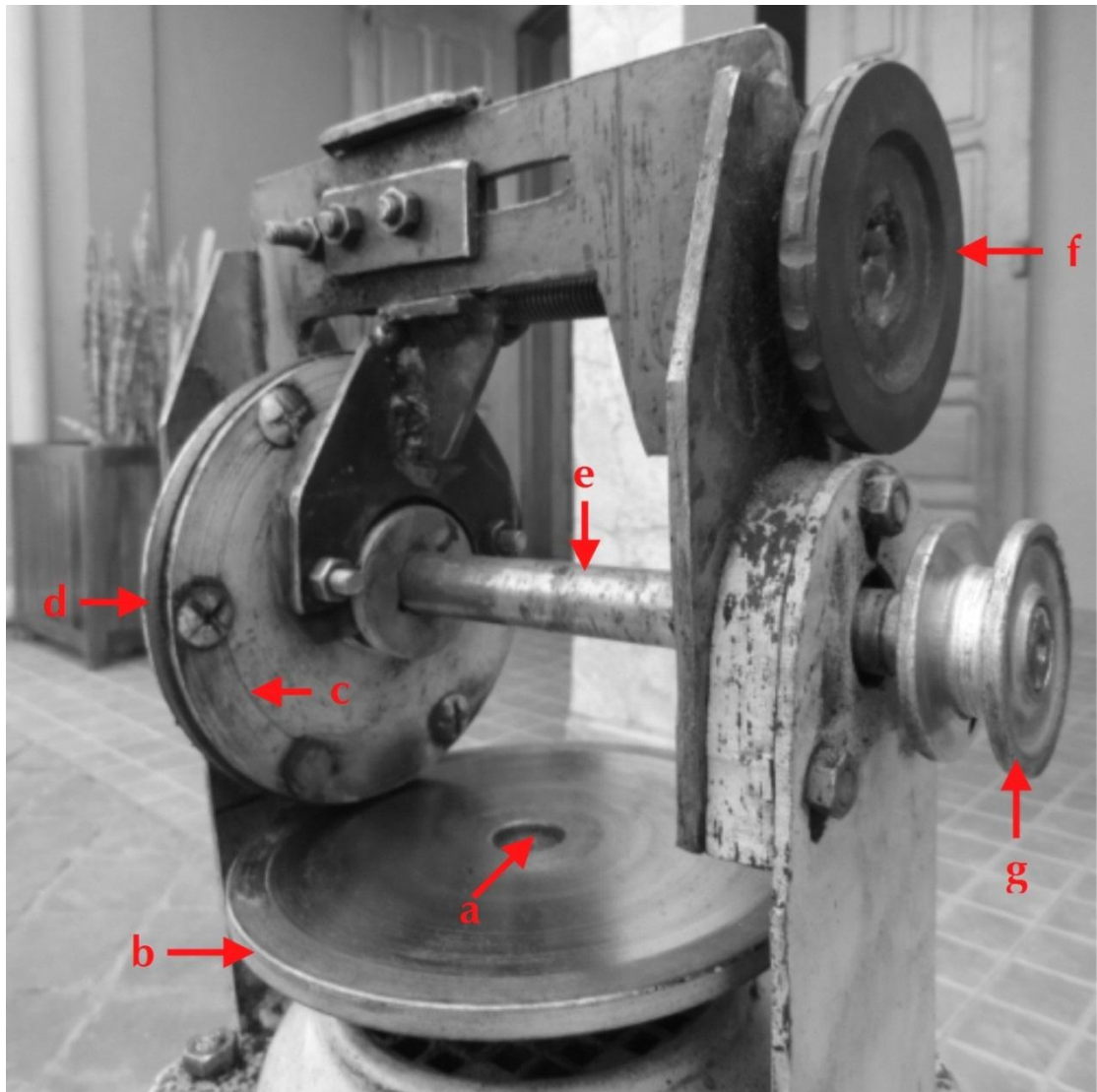


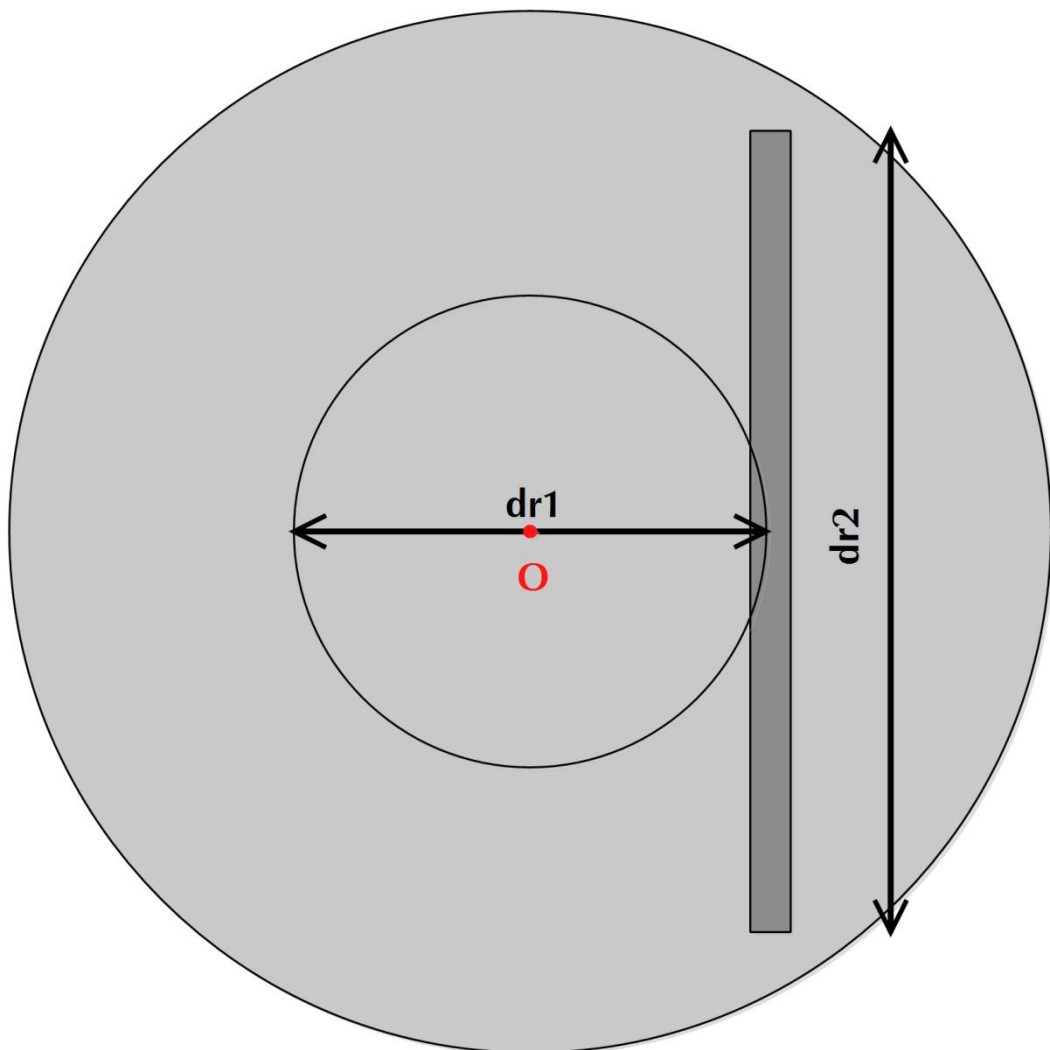
Figure 27 : Variateur mécanique de vitesse avec : (a) arbre du moteur, (b) roue menante, (c) roue menée, (d) caoutchouc, (e) arbre de transmission, (f) réglage de la position de la roue menée et (g) poulie menante

On dispose d'une roue menante de diamètre 130 mm montée sur arbre du moteur et d'une roue menée de diamètre 100 mm placée perpendiculairement à la première. Cette deuxième roue peut coulisser librement sur l'arbre de transmission à l'aide de la manivelle (f). Pour éviter un contact direct entre les deux roues, nous avons muni la roue menée d'une gaine en caoutchouc. Lorsque la roue menée s'éloigne de l'arbre du moteur, la vitesse de rotation de cette dernière augmente ainsi que l'arbre de transmission. Ensuite une poulie menante est assemblée sur l'arbre de transmission et une

courroie assure la transmission du mouvement sur une poulie menée porté par l'arbre de la roue qui supporte les pales.

❖ Vitesse minimale et maximale de la roue menée

Soit **dr1** le diamètre d'un cercle se trouvant sur le plan de la roue menante, de centre O et passant par le point de contact entre les deux roues et **dr2** le diamètre de la roue menée.



Comme les vitesses linéaires du cercle et de la roue menée sont les mêmes, on a les relations :Equation Section (Next)

$$\frac{N_2 \text{ (rouemenée)}}{N_1 \text{ (rouemenante)}} = \frac{dr1}{dr2} \quad (2.1)$$

Soit :

$$N_2 (\text{rouemenée}) = N_1 (\text{rouemenante}) \times \frac{dr_1}{dr_2} \quad (2.2)$$

N : vitesse de rotation en tr/min

dr : diamètre en mm

Nous avons limité le déplacement de la roue menée pour que :

- **$dr_1 (\text{min}) = 40 \text{ mm}$**
- **$dr_1 (\text{max}) = 130 \text{ mm}$**

D'où les valeurs de $N_2 (\text{min})$ et $N_2 (\text{max})$

$$N_2 (\text{min}) = 2800 \times \frac{40}{100}$$

$$N_2 (\text{max}) = 2800 \times \frac{130}{100}$$

$$\mathbf{N_2 (\text{min}) = 1120 \text{ tr / min} \text{ et } N_2 (\text{max}) = 3640 \text{ tr / min}}$$

❖ Calcul du diamètre de la poulie menante

Fixant le diamètre de la poulie menée à **$dp_2 = 40 \text{ mm}$** et la vitesse maximale au niveau des pales **$N_3 (\text{max}) = 5500 \text{ tr/min}$** . on peut déduire le diamètre de la poulie menante **dp_1** de la relation :

$$\frac{N_3 (\text{max})}{N_2 (\text{max})} = \frac{dp_1}{dp_2} \quad (2.3)$$

$$dp_1 = dp_2 \times \frac{N_3 (\text{max})}{N_2 (\text{max})} = 40 \times \frac{5500}{3640} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{dp_1 = 60,43 \approx 60 \text{ mm}}$$

Avec cette valeur du diamètre de la poulie menante **dp_1** on peut trouver la vitesse minimale **$N_3 (\text{min})$** :

$$N_3 (\text{min}) = N_2 (\text{min}) \times \frac{dp_1}{dp_2} \quad (2.5)$$

$$N_3 (\text{min}) = 1120 \times \frac{60}{40}$$

$$N_3 (\text{min}) = 1680 \text{ tr / min}$$

Avec ce variateur de vitesse, nous pouvons donc varier continuellement la vitesse au niveau de la roue de 1680 tr/min à 5500 tr/min.

e. Le refroidisseur

Le syngas produit contient une certaine quantité d'eau sous forme de vapeur qui réduit considérablement le pouvoir calorifique du combustible gazeux, donc il est nécessaire de l'éliminer. Une méthode très simple est la condensation de l'eau sur une paroi possédant une grande surface. En effet, plus la surface est grande plus le gaz va perdre de la chaleur et plus la quantité d'eau condensée sera maximisée.

Généralement, le condenseur est constitué d'un faisceau de tubes parallèles mais dans notre cas nous avons juste utilisé un seul tube de grand diamètre et d'une bonbonne soudés ensemble dont la surface totale est suffisamment grande pour permettre la condensation de la vapeur d'eau.

Notre refroidisseur fait aussi office de réservoir tampon pour le syngas produit.

Le schéma ci-après montre les différentes vues du refroidisseur.

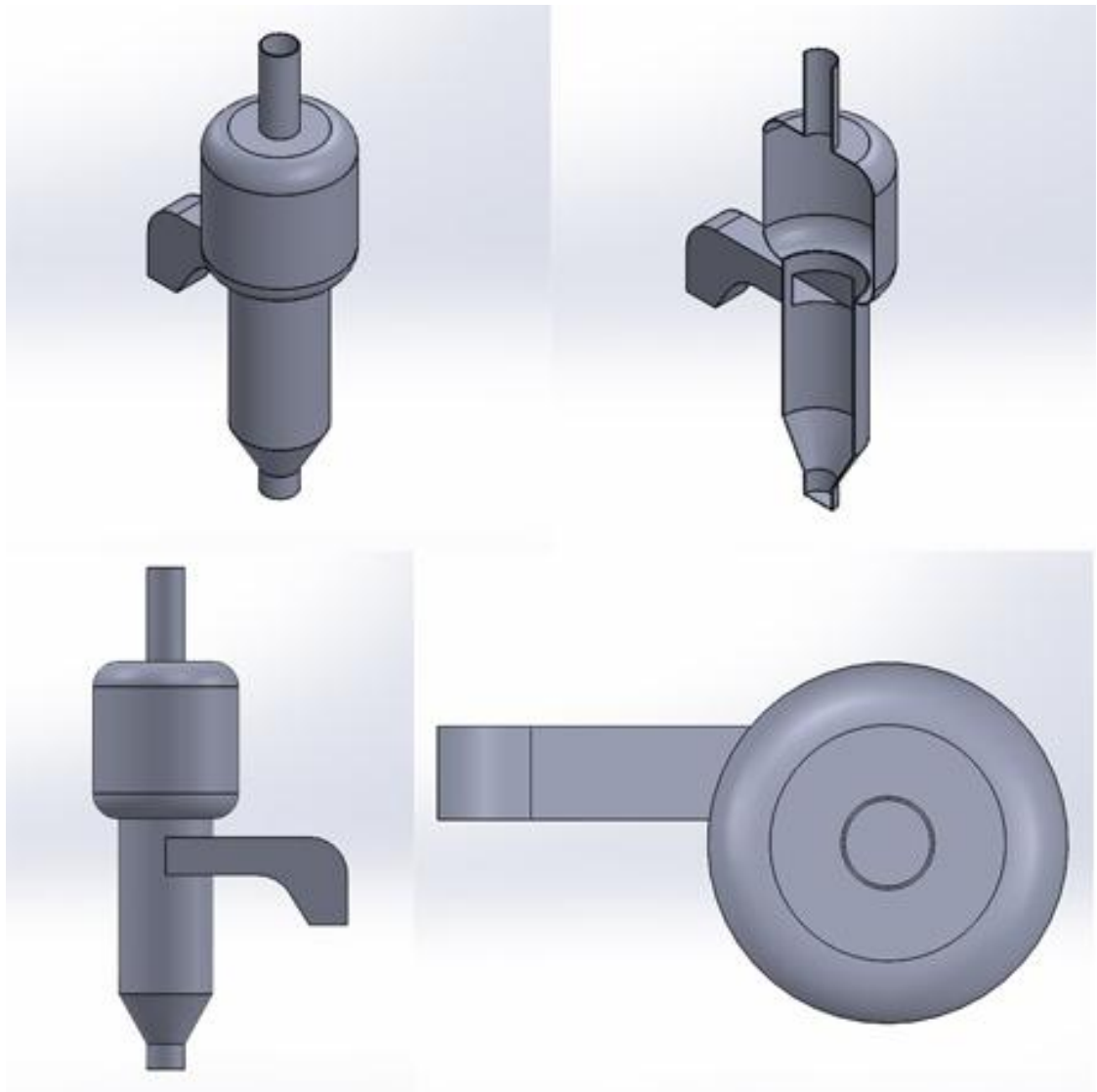


Figure 28 : Les différentes vues du refroidisseur

6.5 EVALUATION DU COUT DE FABRICATION

Le cout de fabrication du gazogène est détaillé dans le tableau suivant.

Tableau 7 : Répartition du cout de fabrication du gazogène

Composant	Prix [Ariary]
Trémie	80 000
Chambre de réaction	120 000
Enveloppe	40 000
Cyclone	20 000
Ventilateur centrifuge	65 000
Moteur 1 CV avec variateur de vitesse	320 000
Refroidisseur de gaz	34 000
Cadre	100 000
Main d'ouvre	300 000
TOTAL	1 079 000

CHAPITRE 7 : MODELISATION PAR LE MODELE « GASIFIER » SOUS ENGINEERING EQUATION SOLVER (EES)

7.1 INTRODUCTION

Dans de nombreux domaines de la science et de l'industrie, la maîtrise de la modélisation et de la simulation numérique est devenue indispensable.

Dans notre situation, le recours à la simulation est vraiment d'une grande aide. En effet, les matériels d'analyse pour le syngas sont inexistant à Madagascar et pour avoir les informations sur la composition du syngas produit par notre gazogène, l'utilisation d'un simulateur de gazéification de la biomasse devrait nous permettre de prédire la composition du syngas.

7.2 PRESENTATION DE EES ET DU MODELE

EES est l'abréviation de Engineering Equation Solver ou Solveur d'Equations pour l'ingénierie. EES permet de résoudre des systèmes d'équations algébriques, des équations différentielles, des équations à variables complexes. EES permet également d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système, de calculer des régressions linéaires et non linéaires, de générer des courbes de grande qualité.

Le programme de simulation nommée « GASIFIER » a été développé par Fock et al [22] au Department of Energy Engineering de Technical University of Denmark notamment avec EES. C'est un modèle stationnaire qui n'est basé sur aucun gazogène spécifique. Le modèle est encore réduit aux gazogènes à co-courant.

7.3 FAMILIARISATION AVEC LE LOGICIEL

La prise en mains se fait assez facilement grâce à une interface graphique très simple.

La figure suivante montre l'interface graphique du logiciel à son ouverture.

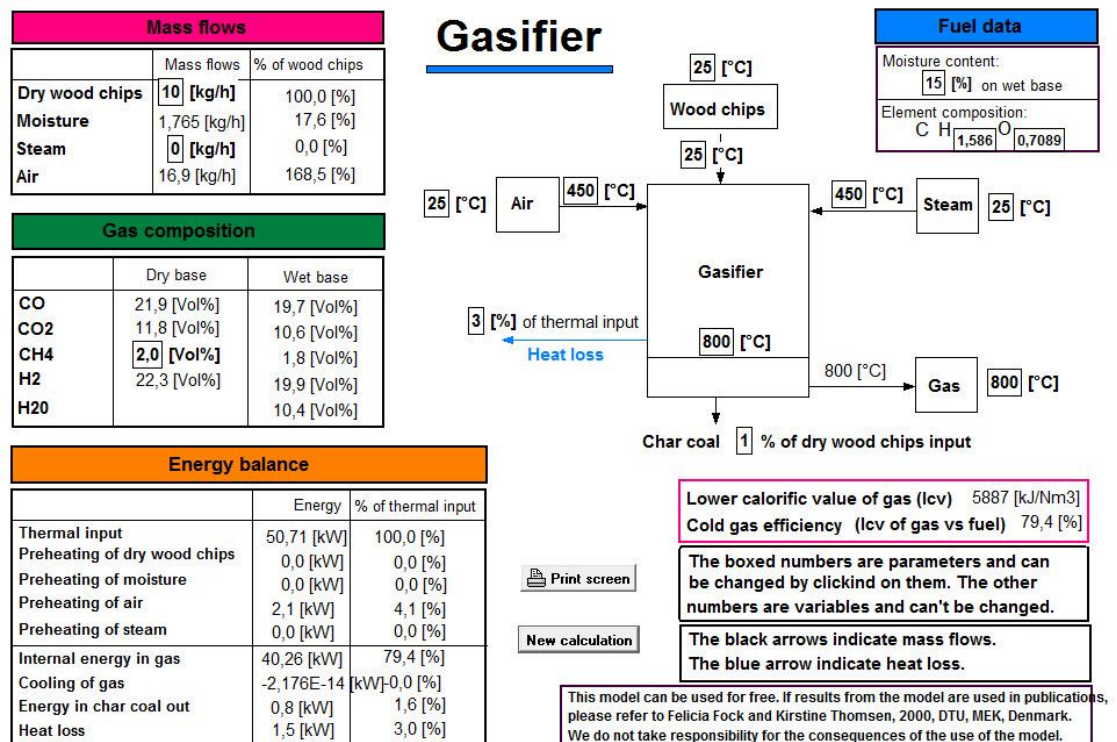


Figure 29 : Interface graphique de GASIFIER à son ouverture

Les valeurs d'entrées de ce logiciel sont données dans le tableau suivant.

Tableau 8 : Les paramètres d'entrée du logiciel

Moisture content on wet base	Humidité de la biomasse sur base humide
Element composition	Composition élémentaire de la biomasse sur base sèche
Mass flow of dry wood chips	Débit massique de biomasse sèche
Mass flow of steam	Débit massique de vapeur (s'il y a lieu injection dans le gazogène)
Initial temperature of biomass	Température initiale de la biomasse
Biomass temperature in entrance of gasifier	Température de la biomasse à l'entrée du gazogène

Initial temperature of air	Température de l'air ambiant
Air temperature in entrance of gasifier	Température de l'air à l'entrée du gazogène
Initial temperature of water	Température initiale de l'eau
Steam temperature in entrance of gasifier	Température de la vapeur d'eau à l'entrée du gazogène
Gasification temperature	Température de gazéification
Heat loss	Perte de chaleur à travers la paroi du gazogène
Temperature of output syngas	Température du syngas produit
Charcoal percentage of dry wood chips	Pourcentage du charbon par rapport à la biomasse sèche
Percentage of CH ₄ in output syngas	Pourcentage en CH ₄ dans le syngas sur base sèche

7.4 EXPLOITATION DU LOGICIEL

Ce qui nous intéresse à travers la simulation, c'est la variation de la composition du syngas en fonction du débit d'air entrant dans le gazogène pour un débit donné de biomasse. Or le débit d'air n'est pas un paramètre d'entrée du logiciel, il faut donc trouver d'autres paramètres et des relations qui permettent de relier ces derniers avec débit d'air.

Pour un débit donné de biomasse, les paramètres qui modifient le débit d'air sont :

- Débit massique de vapeur (s'il y a lieu injection dans le gazogène)
- Température de la vapeur d'eau à l'entrée du gazogène
- Température de la biomasse à l'entrée du gazogène
- Température de l'air à l'entrée du gazogène
- Température de gazéification

Dans notre cas, lors des expérimentations le paramètre facilement accessible est la température de gazéification. Ce paramètre est aussi un paramètre d'entrée du logiciel. Il est à remarquer que ces quatre derniers paramètres ne sont pas indépendants car la variation de l'un implique la variation des autres. La connaissance de la température de gazéification permet de lancer le calcul.

7.4.1 Etude de la Variation du débit d'air en fonction de la température de gazéification

a. Procédures

En partant de la composition approximative moyenne de la biomasse sèche $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$, nous allons simuler à l'aide du logiciel l'effet de la variation de la température de gazéification sur le débit d'air.

Les données de la simulation sont les suivantes :

- L'humidité sur base humide de la biomasse est de 10%
- Le débit en biomasse humide est de 10 kg/h donc un débit en biomasse sèche de 9 kg/h
- Le débit de vapeur à l'entrée du gazogène est nul (il n'y a pas utilisation de la vapeur d'eau comme agent de gazéification)
- La température de l'air à l'entrée du gazogène est égale à la température de l'air ambiant, soit 25 °C (il n'existe pas de préchauffage de l'air)
- Les autres paramètres sont restés par défaut

Lorsque tous les paramètres de simulation sont entrés, on fait varier la température de 400 à 1500 °C à raison de 100 °C.

b. Résultats

La figure suivante montre la courbe de variation du débit d'air en fonction de la température de gazéification après la simulation.

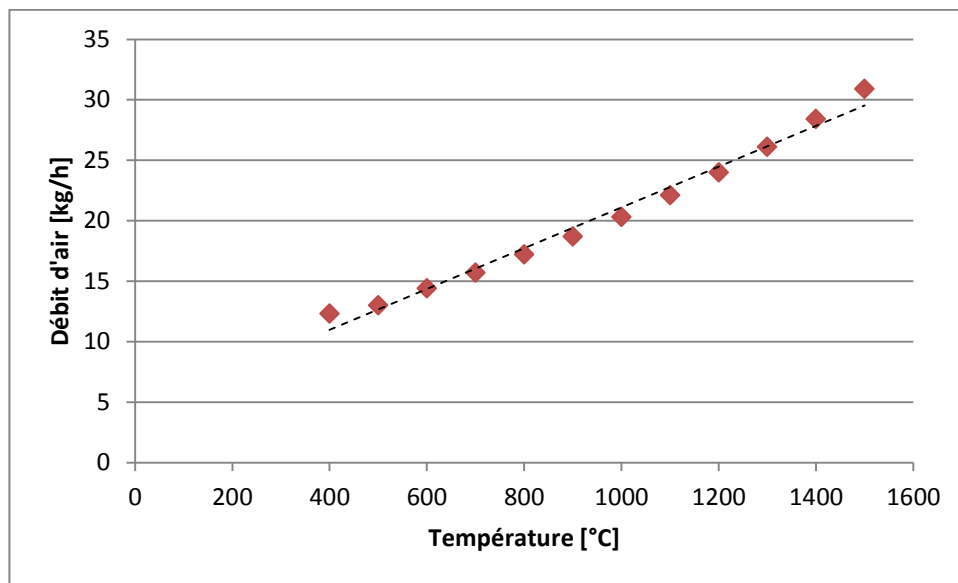


Figure 30 : Evolution du débit d'air en fonction de la température de gazéification

c. Observations

L'évolution du débit d'air présente une évolution quasiment linéaire en fonction de la température de gazéification, nous pouvons donc prendre la température comme référence pour faire varier le débit d'air (si nous gardons tous les autres paramètres constants).

7.4.2 Variation de la composition du syngas en fonction de la température

Rappelons que notre objectif à travers la simulation est de connaître la composition du syngas en fonction du débit d'air et ce débit d'air n'est pas un paramètre d'entrée du logiciel. Or nous avons établi une relation linéaire entre la température et le débit d'air donc notre objectif est atteint en utilisant la température de gazéification à la place du débit d'air.

Dans cette simulation, nous allons voir l'effet de la variation de la température de gazéification sur la composition du syngas.

a. Procédures

Avec les mêmes paramètres expérimentaux que précédemment, nous allons prélever la composition en base humide du syngas de la température 500 °C jusqu'à 1500 °C à chaque intervalle de 100 °C.

b. Résultats

Le tableau suivant résume le prélèvement des pourcentages des différents composants du syngas en fonction de la température à la sortie du gazogène.

Température [°C]	CO [% Vol]	CO ₂ [% Vol]	CH ₄ [% Vol]	H ₂ [% Vol]	H ₂ O [% Vol]
500	20,6	13,8	2	27,7	0,6
600	21,4	11,7	1,9	23,2	4,1
700	21,3	10,7	1,9	19,9	6,3
800	20,7	10,2	1,8	17,2	8,2
900	19,9	9,9	1,8	14,6	9,7
1000	18,8	9,8	1,8	12,3	11,1
1100	17,6	10	1,8	10,2	12,3
1200	16,2	10,2	1,7	8,1	13,3
1300	14,6	10,7	1,7	6,3	14,2
1400	12,8	11,3	1,7	4,5	15
1500	10,6	12,4	1,7	3,2	15,2

La figure suivante montre la variation des différents composants du syngas en fonction de la température (ou du débit d'air).

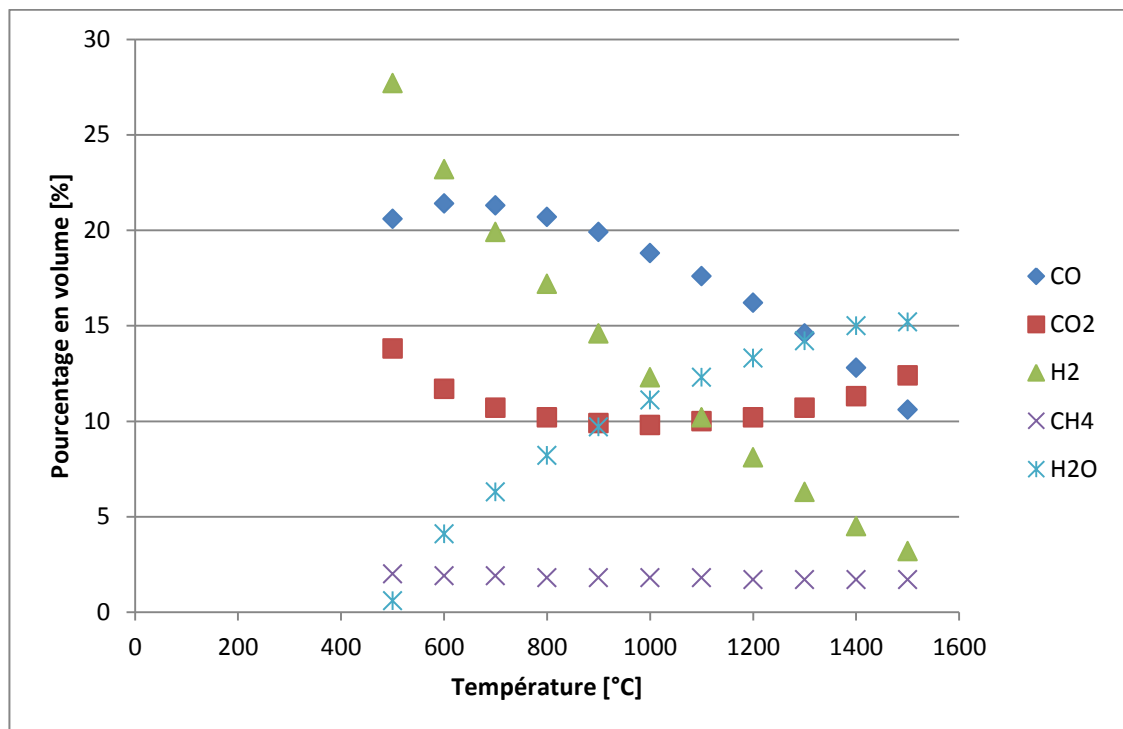


Figure 31 : Influence de la température sur la composition du syngas

c. Observations

D'après la **figure 31**, on voit que les gaz à pouvoir calorifique élevé (CO et H₂) sont beaucoup plus prépondérants à basse température (débit d'air plus faible) et au fur et à mesure que la température augmente (augmentation du débit d'air), les produits de combustion tel que CO₂ et H₂O deviennent majoritaires. Le débit d'air joue donc un rôle très important sur la qualité du syngas. Généralement, dans la pratique, la température de gazéification se situe au voisinage de 800 °C à 900°C. Dans notre simulation exactement, dans cet intervalle de température, on a un maximum de CO, un minimum de CO₂ et une proportion intéressante de H₂.

7.4.3 Influence de l'humidité de la biomasse

Zainal et al [23] ont conclu d'après leurs études que l'augmentation de l'humidité de la biomasse diminue l'efficacité énergétique ainsi que le pouvoir calorifique du gaz produit.

Nous allons donc simuler l'effet de l'augmentation de l'humidité de la biomasse sur le pouvoir calorifique du syngas.

a. Procédures

Toujours en utilisant la formule approximative de la biomasse $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$. Les paramètres sont restés aussi les mêmes que dans la première simulation (7.4.1). Nous allons, pour chaque température de gazéification (500-1500 °C), déterminer le pouvoir calorifique du syngas (composition en base sèche) pour différentes valeurs de l'humidité.

b. Résultats

Les résultats de la simulation sont illustrés par la figure ci-dessous

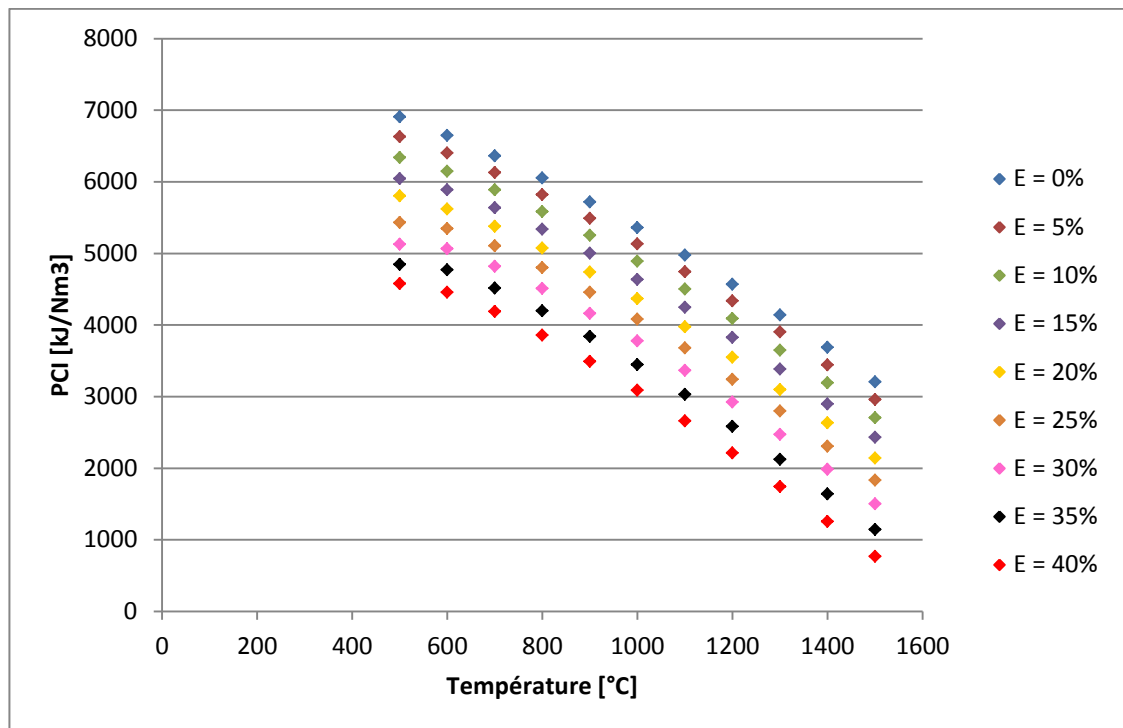


Figure 32 : Variation du PCI du syngas en fonction de la température pour différentes valeur de l'humidité

c. Observations

D'après le graphique, plus le taux d'humidité augmente, moins le gaz produit est énergétique. On observe aussi une décroissance du PCI avec la température. Donc, pour

maximiser l'efficacité du gazogène, il faut utiliser une biomasse aussi sèche possible et également travailler avec des températures plus basses.

CHAPITRE 8 : TESTS DU GAZOGENE

8.1 ETUDES TECHNIQUES PRELIMINAIRES

8.1.1 Caractérisation de la biomasse

a. La biomasse utilisée

Dans le cadre des tests du gazogène construit, nous nous intéressons spécifiquement à la biomasse lignocellulosique. Cette appellation désigne divers matériaux tels que le bois ou la paille, ayant chacun des propriétés spécifiques.

Cependant, tous ces matériaux ont des caractéristiques similaires concernant leur structure et composition. Nous avons choisi de gazéifier le bois car sa disponibilité sur le territoire est importante et ses caractéristiques physico-chimiques en font un bon représentant de la biomasse lignocellulosique. De plus son taux d'humidité est facilement contrôlable.

Le bois d'eucalyptus a été choisi pour plusieurs raisons :

- Son utilisation quotidienne comme bois de chauffe nous permet de trouver rapidement des échantillons en grande quantité.
- Son absence de résine en fait un modèle de choix pour une gazéification dont l'objectif est l'obtention d'un gaz sans suies ni goudrons.

b. Préparation de la biomasse

La biomasse utilisée lors des tests de gazéification provient des chutes de bois d'eucalyptus récupérés dans quelques scieries dans la ville d'Ambatolampy. Elles ont été coupées en petit morceaux de 1cmx1cmx5cm à la hache. La taille des échantillons devrait, en effet, être assez petite pour permettre son passage à travers l'engorgement situé dans la zone de combustion du gazogène et assez massive pour permettre son déplacement dans le gazogène par simple gravité. Les échantillons sont ensuite séchés au

soleil pendant 2 jours pour réduire son taux d'humidité. La figure suivante montre la photographie des morceaux de bois d'eucalyptus après séchage.



Figure 33 : Photographie du combustible utilisé lors des tests

c. Détermination de l'humidité du bois

L'humidité des combustibles bois représente la teneur en eau de ce combustible. L'humidité est une donnée capitale pour tous procédés de gazéification.

Deux types d'humidité sont employés :

- Humidité sur base humide (cf formule (1.1))
- Humidité sur base sèche (cf formule (1.2))

Dans ce qui suit, l'humidité se rapporte à l'humidité sur base humide ($E_{\text{base humide}}$).

La méthode d'analyse de l'humidité utilisée repose sur le principe de séchage/pesage de l'échantillon. Nous avons choisi de suivre la méthode d'analyse par déshydratation décrite par l'ADEME (2001). Le principe de la méthode est la suivante :

- Pesée de l'échantillon humide avec une précision supérieur à 0,5g.
- Séchage dans l'étuve à 103°C jusqu'à séchage complet de l'échantillon (environ 30 min pour 50 g).
- Pesée de l'échantillon après séchage.

L'humidité sur base humide en pourcentage est alors donnée par la formule (1.1)

$$E_{\text{base humide}} = 100 \times \left(\frac{\text{masse}_{\text{frais}} - \text{masse}_{\text{sec}}}{\text{masse}_{\text{frais}}} \right)$$

La température 103 °C est une température idéale pour assurer une déshydratation complète de l'échantillon, sans pour autant volatiliser d'autres produits que l'eau.

Nous avons analysé 3 échantillons pour la détermination de l'humidité. Le tableau ci-après donne les masses des échantillons humides ainsi que les masses des échantillons après séchage dans l'étuve.

Tableau 9 : *Masses des échantillons avant et après séchage dans l'étuve*

échantillon	Masse du combustible humide [g]	Masse du combustible sec [g]
Echantillon 1	52,4	46,6
Echantillon 2	56,2	49,7
Echantillon 3	50,3	45,2

Le séchage des échantillons a été fait avec l'étuve du laboratoire du Génie Chimique. La durée du séchage est de 1h30min, un temps largement suffisant pour un échantillon de 50 g. Une balance électronique de marque KERN d'une capacité de 10 000 g et avec une précision de 0,1 g a été utilisée pour la mesure des masses.

En utilisant la formule de l'humidité sur base humide, nous avons donc les valeurs de l'humidité des différents échantillons ainsi que l'humidité moyenne de notre combustible dans le tableau suivant.

Echantillon	Humidité sur base humide [%]
Echantillon 1	11,07
Echantillon 2	11,56
Echantillon 3	10,14
moyenne	10,92

d. Composition de la biomasse

Comme nous ne disposons pas des matériels nécessaires pour la détermination de la composition de la biomasse (composition immédiate et composition élémentaire), nous allons utiliser celle donnée dans les bases de données des propriétés de différentes matières premières (biomasse).

Le tableau suivant donne les valeurs moyennes des différents composants de l'eucalyptus en termes de composition immédiate et de composition élémentaire ainsi que les normes utilisées pour les analyses.

Tableau 10 : Analyse immédiate et élémentaire de l'eucalyptus

eucalyptus	Composition immédiate (base sèche)			Composition élémentaire (base sèche)				
	CF	MV	Cendre	C	H	O	N	S
Norme	ASTM D-3172	ASTM D-3175	ASTM E- 1755-95	Huffman 1	Huffman 1	Par différence	ASTM D-537	ASTM D-4239
% masse	18,4	81,2	1,2	49,89	5,71	42,29	0,05	0,01

e. Formule chimique de l'eucalyptus

Pour permettre l'entrée des caractéristiques de la biomasse dans le logiciel « gasifier », il faut convertir la composition élémentaire en formule chimique de la forme $\text{CH}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{S}_w$.

Prenons 100 g de notre combustible. Cet échantillon contient :

$$100\text{ g} \times \frac{49,89}{100} = 49,89\text{ g de C}$$

$$100\text{ g} \times \frac{5,71}{100} = 5,71\text{ g de H}$$

$$100\text{ g} \times \frac{42,29}{100} = 42,29\text{ g de O}$$

$$100\text{ g} \times \frac{0,05}{100} = 0,05\text{ g de N}$$

$$100\text{ g} \times \frac{0,01}{100} = 0,01\text{ g de S}$$

Nous avons besoin de convertir les masses en nombres de mole. Nous avons donc :

$$49,89\text{ g de C} \times \frac{1\text{ mol}}{12\text{ g}} = 4,1575\text{ mol de C}$$

$$5,71\text{ g de H} \times \frac{1\text{ mol}}{1\text{ g}} = 5,7100\text{ mol de H}$$

$$42,29\text{ g de O} \times \frac{1\text{ mol}}{16\text{ g}} = 2,6431\text{ mol de O}$$

$$0,05\text{ g de N} \times \frac{1\text{ mol}}{14} = 0,0036\text{ mol de N}$$

$$0,01\text{ g de S} \times \frac{1\text{ mol}}{32} = 0,0003\text{ mol de S}$$

D'où les rapports molaires par rapport au carbone :

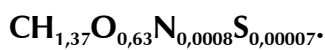
$$x = \frac{5,7100 \text{ mol de H}}{4,1575 \text{ mol de C}} = 1,37$$

$$y = \frac{2,6431 \text{ mol de O}}{4,1575 \text{ mol de C}} = 0,63$$

$$z = \frac{0,0036 \text{ mol de N}}{4,1575 \text{ mol de C}} = 0,0008$$

$$w = \frac{0,0003 \text{ mol de S}}{4,1575 \text{ mol de C}} = 0,00007$$

Finalement, nous avons la formule chimique de l'eucalyptus :



8.2 TESTS DU GAZOGENE

L'objectif des tests est de comprendre les effets des conditions opératoires sur la gazéification d'éclats d'eucalyptus par le gazogène downdraft que nous avons construit. La performance de la gazéification est évaluée par la composition du syngas, le PCI et le « cold gas efficiency ».

8.2.1 Mode opératoire

Pour réaliser les tests de gazéification des éclats d'eucalyptus, nous devons toujours suivre le protocole expérimental suivant :

- i. Avant tout démarrage, vérifier le serrage de tous les boulons ainsi que les ouvertures au fond du gazogène, sur le cyclonne et sur le refroidisseur.
- ii. Ouvrir le couvercle de la trémie si ce n'est déjà fait.
- iii. Peser le combustible.
- iv. Démarrer le moteur et régler la vitesse jusqu'au maximum.
- v. Mettre du papier journal et quelques quantités de copeaux de bois au fond de la chambre de réaction.
- vi. Allumer une autre feuille de papier journal, l'introduire dans le gazogène.
- vii. Verser une poignée du combustible pesé.

- viii. Attendre 2 minutes que le feu prenne et verser le reste du combustible.
- ix. Fermer le couvercle de la trémie.
- x. Tester l'inflammabilité du gaz avec un bruleur à gaz à la sortie du refroidisseur toutes les minutes.
- xi. Lorsque le feu se stabilise, choisir la vitesse voulue.
- xii. Attendre jusqu'à l'extinction de la flamme.
- xiii. Arrêter le moteur.
- xiv. Laisser le gazogène se refroidir.
- xv. Récupérer et peser le mélange de cendre et de charbon tombé à travers la grille qui supporte les combustibles.
- xvi. Récupérer et peser le reste de combustible imbrulé dans le gazogène.

8.2.2 Résultats et discussions

Le premier test du gazogène a été fait le 06 janvier 2014. Au total, quatre tests ont été effectués en diminuant à chaque test la vitesse au bout des pales (ix du protocole expérimental).

a. Observations visuelles

En suivant le protocole expérimental cité précédemment nous observons lors du:

❖ Test 1

Après 12 min : 48 s de marche, la fumée présente un signe d'inflammabilité. A l'approche du bruleur, quelques flammes apparaissent dans l'épaisse fumée mais ces dernières ne sont pas encore stables, elles s'éteignent aussitôt qu'on enlève le bruleur. En continuant de temps à autre de brûler la fumée, on a obtenu une belle flamme de couleur bleue à la base surmontée d'une couleur orange (témoigne de la présence de CO et H₂) au temps t = 16 min : 59 s et cette flamme ne contient aucune fumée en plus d'être capable de se maintenir par lui-même. La vitesse au bout des pâles est toujours au maximum ($V_p = 5208$ tr/min). La flamme s'est maintenue jusqu'au temps t = 2 h : 23 min 52 s, ce qui nous donne une durée de 127 min de flamme stable pour le premier test. A cet instant, lorsqu'on observe l'état du combustible dans le gazogène, les

combustibles dans la zone de séchage et la zone de pyrolyse sont tous consommés sauf ceux retenus dans les volumes morts. La zone de combustion de couleur rouge étant toujours en place.

La figure suivante montre l'évolution de l'inflammabilité du syngas :



Figure 34 : *Evolution de l'inflammabilité du syngas*

❖ Test 2

On a fait les mêmes observations que pour le test 1 mais à des moments différents. La fumée commence à être inflammable à $t = 9 \text{ min} : 30 \text{ s}$. la flamme se maintient à $t = 18 \text{ min} : 19 \text{ s}$ (La vitesse au bout des pâles est réduite à $V_p = 4284 \text{ tr/min}$) jusqu'au temps $t = 2 \text{ h} : 22 \text{ min} : 18 \text{ s}$ (durée = 124 min).

❖ Test 3

Toujours les mêmes observations : La fumée commence à être inflammable à $t = 24 \text{ min} : 15 \text{ s}$, elle se maintient à $t = 33 \text{ min} : 16 \text{ s}$ (La vitesse au bout des pâles est réduit à $V_p = 3528 \text{ tr/min}$) jusqu'au temps $t = 3 \text{ h} : 21 \text{ min} : 19 \text{ s}$ (durée = 168 min).

❖ Test 4

La fumée commence à être inflammable à $t = 17 \text{ min} : 32 \text{ s}$. Au bout de $t = 26 \text{ min} : 45 \text{ s}$, une belle flamme bleue-orange se maintient. Lorsqu'on réduit la vitesse de

rotation au bout des pales à $V_p = 2520$ tr/min, la flamme s'éteint et l'expérience est interrompue.

b. Consommation de combustible

Le débit de combustible est le rapport entre la quantité de combustible consommé par la durée de l'expérimentation. La quantité consommée étant la différence entre la masse de combustible pesé et la masse de combustible imbrulé dans le gazogène à la fin de l'expérience. La durée de l'expérimentation est comptabilisé à partir du moment où le couvercle du gazogène est fermé jusqu'à l'extinction de la flamme produit par le syngas.

Ainsi, le tableau suivant donne les différentes masses, les durées de l'expérience et les débits de bois calculés des quatre tests.

Tableau 11 : *Relevé des différentes masses et du temps pour le calcul de débit*

Date	Test	V_p	m_1	m_2	t	DB
		[tr/min]	[g]	[g]	[min]	[g/min]
06/01/14	Test 1	5208	8053	631	144	51,54
07/01/14	Test 2	4284	8158	937	142	50,85
08/01/14	Test 3	3528	8111	1212	201	34,32
09/01/14	Test 4	2520	5029	-	-	-

V_p : vitesse au bout des pales en [tr/min]

m_1 : masse du combustible utilisé en [g]

m_2 : masse de combustible imbrulé en [g]

t : durée de l'expérimentation en [min]

DB : débit de biomasse humide en [g/min]

Remarque : lors du test 4, la vitesse au bout des pales est très réduite à tel point que la flamme produite par le syngas s'éteint aussitôt que cette vitesse est atteinte. Le test est donc considéré comme un échec.

Les débits de combustible des différents tests sont illustrés par la figure ci-après.

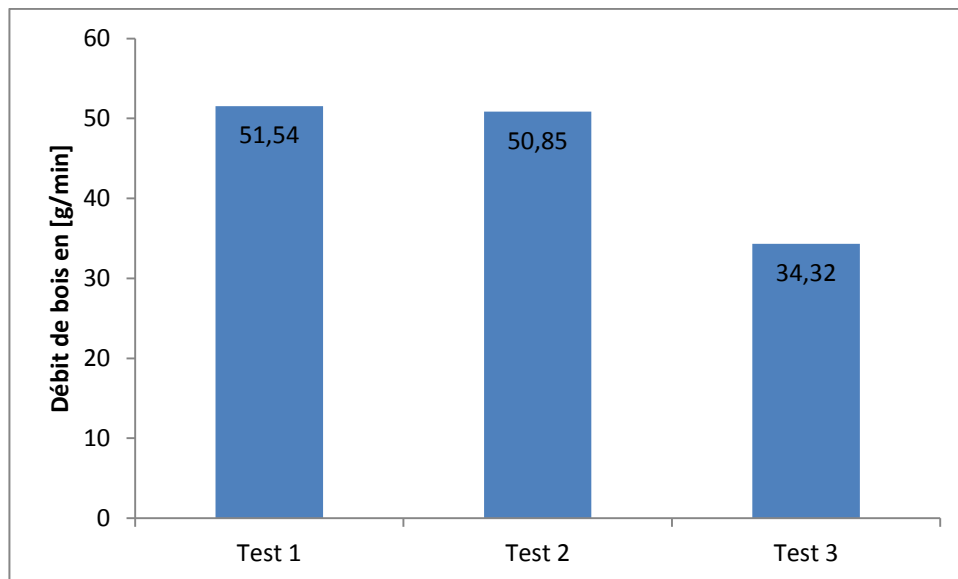


Figure 35 : débit de consommation de bois des trois premiers tests

D'après cette figure, on peut voir que le débit de biomasse DB décroît avec la diminution de la vitesse de rotation des pales. A 5208 tr/min qui est la vitesse réelle maximale qu'on peut atteindre, le débit de biomasse (éclats d'eucalyptus) est de 51, 54 g/min soit 3,09 kg/h. Avec notre gazogène qui a une capacité de 20 kg, on pourrait donc avoir une production ininterrompue de syngas pendant 6h 28min avec un seul plein.

c. Composition du syngas

La composition du syngas a été calculée à l'aide du logiciel « gasifier ». Comme notre gazogène n'est pas muni de thermocouple pour le relevé de la température de gazéification, nous allons supposer avoir une température de gazéification de 950 °C. Le choix de cette température est justifié par le fait que la température de gazéification de la biomasse lignocellulosique est généralement entre 900 °C à 1000 °C d'après la littérature. En plus lors des tests nous avons eu une flamme stable ce qui laisse supposer que nous sommes proches de la température idéale de la gazéification. A titre de rappel, la biomasse utilisée étant des éclats d'eucalyptus de formule $\text{CH}_{1,37}\text{O}_{0,63}\text{N}_{0,0008}\text{S}_{0,00007}$ avec un taux d'humidité de 10,92 % en base humide.

Vue les valeurs des rapports molaires de l'azote et du soufre par rapport au carbone, on peut faire l'hypothèse que ces deux constituants sont négligeables et qu'ils n'influencent en rien le contenu énergétique de l'eucalyptus ni la composition du syngas après gazéification. En plus l'entrée de la formule chimique de la biomasse dans le logiciel « gasifier » ne requiert que les rapports molaires des trois constituants principaux qui sont C, H et O. la formule chimique de l'eucalyptus devient alors $\text{CH}_{1,37}\text{O}_{0,63}$

Les autres paramètres d'entrée des simulations sont mis en caractère gras dans le tableau suivants :

Tableau 12 : Paramètres d'entrée des simulations

Test	DB	DB'	charbon	$T_{1 \text{ (air)}}$	$T_{2 \text{ (air)}}$	T_g
Test 1	3,09	2,76	4,04	25	25	950
Test 2	3,05	2,73	2,35	25	25	950
Test 3	2,06	1,84	3,79	25	25	950

Avec :

DB : débit de biomasse humide en [kg/h]

DB' : débit de biomasse sèche en [kg/h]

Charbon : pourcentage du charbon récupéré au fond du gazogène par rapport à la biomasse sèche en [%]

$T_{1 \text{ (air)}}$: température de l'air ambiant en [°C]

$T_{2 \text{ (air)}}$: température de l'air à l'entrée du gazogène en [°C]

T_g : température de gazéification en [°C]

Tableau 13 : Composition du syngas en base humide et base sèche des différents tests (pourcentage en volume)

Test	Composition du syngas											
	CO		CO ₂		CH ₄		H ₂		H ₂ O		N ₂	
	BH	BS	BH	BS	BH	BS	BH	BS	BH	BS	BH	BS
Test 1	18,8	21,1	10,1	11,3	1,8	2,0	13,4	15,1	11,0	0,0	44,9	50,4
Test 2	19,3	21,6	9,9	11,1	1,8	2,0	13,3	14,9	10,4	0,0	45,3	50,6
Test 3	18,9	21,2	10,1	11,3	1,8	2,0	13,4	15,0	10,9	0,0	44,9	50,4

Avec :

BH : base humide

BS : base sèche

La figure ci-après permet de voir clairement les différents pourcentages de chaque constituant du syngas.

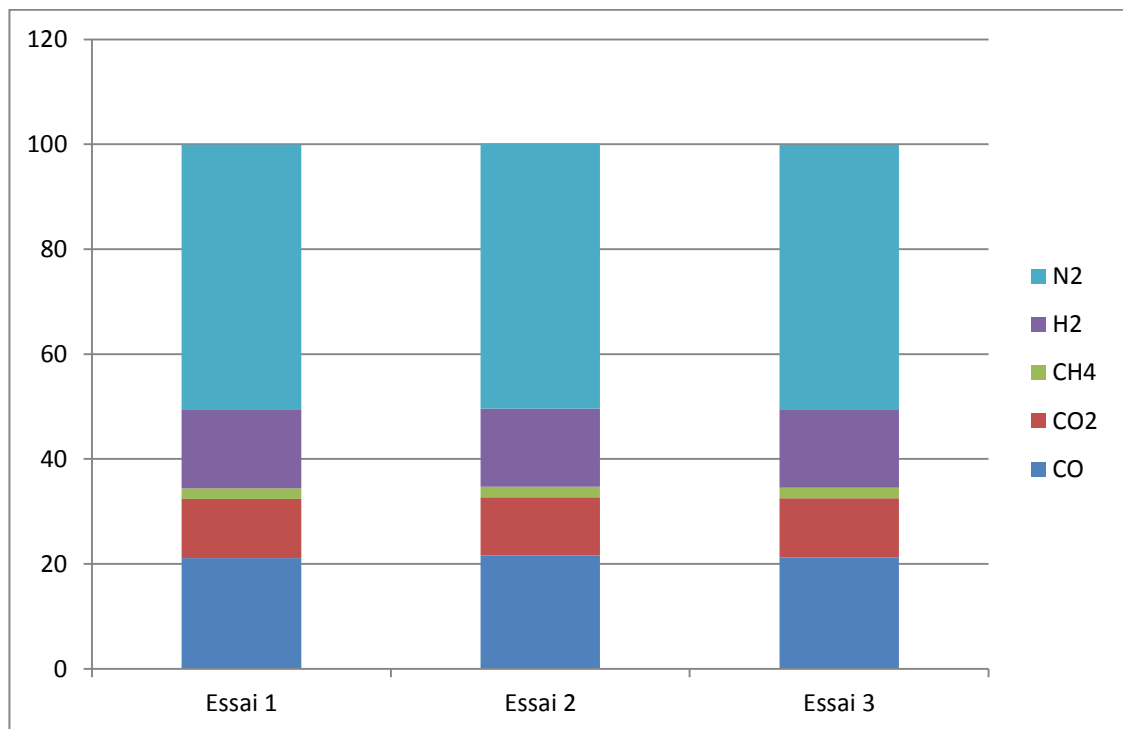


Figure 36 : *Histogramme empilé des différents constituants du syngas*

A partir de cette figure, on peut déduire que presque la moitié de la composition du syngas pour les trois Test est le diazote, ceci est dû à l'utilisation de l'air qui contient une proportion élevée de N₂ (71%) comme agent de gazéification. On remarque aussi qu'entre les trois tests, la différence de composition est moindre. La diminution du débit d'air diminue en même temps le débit de bois, ce qui permet de garder le rapport stœchiométrique à peu près la même valeur.

❖ Rapport stœchiométrique :

A partir de la formule (1.9)

$$\Phi = \frac{\text{air réel}}{\text{air stoechiométrique}}$$

On peut aussi écrire

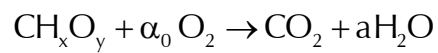
$$\Phi = \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

Avec :

$$\alpha = \frac{\text{mole d'O}_2 \text{ réel}}{\text{mole de biomasse}}$$

$$\alpha_0 = \frac{\text{mole d'O}_2 \text{ stoechiométrique}}{\text{mole de biomasse}}$$

Pour une biomasse de formule CH_xO_y , la réaction de combustion complète s'écrit :



$$\text{Conservation de H : } x = 2a \Rightarrow a = \frac{x}{2}$$

$$\text{Conservation de O : } y + 2\alpha_0 = 2 + a = 2 + \frac{x}{2}$$

$$\text{Ce qui donne : } \alpha_0 = 1 + \frac{x}{4} - \frac{y}{2}$$

$$\text{Dans notre cas } \alpha_0 = 1 + \frac{1,37}{4} - \frac{0,63}{2} = 1,03 \frac{\text{mole d'O}_2}{\text{mole de biomasse}}$$

Les valeurs de α pour les différents tests se calculent à partir des données résultant des simulations du tableau suivant :

Tableau 14 : Données pour le calcul de α

Test	biomasse		air		O ₂	α
Unité	kg/h	mole/h	kg/h	mole/h	mole/h	-
Test 1	2,76	117,70	5,80	200,00	42,00	0,36
Test 2	2,73	116,42	5,90	203,45	42,72	0,37
Test 3	1,84	78,46	3,90	134,48	28,24	0,36

La masse molaire de la biomasse étant :

$$M_{(\text{biomasse})} = 12 \times 1 + 1 \times 1,37 + 16 \times 0,63 = 23,45 \text{ g.mol}^{-1}$$

Et la composition de l'air :

$$\text{air} \begin{cases} 79\% \text{ N}_2 \\ 21\% \text{ O}_2 \end{cases}$$

D'où les valeurs des rapports stœchiométriques Φ

Tableau 15 : Rapports stœchiométriques des différents tests

Test	α	α_0	Φ
Test 1	0,36	1,03	0,35
Test 2	0,37	1,03	0,36
Test 3	0,36	1,03	0,35

d. Pouvoir calorifique inférieur

Le pouvoir calorifique se mesure à l'aide de bombe calorimétrique mais quelquefois l'utilisation de formule empirique s'impose.

Selon la formule (1.5) le PCI pour un combustible gazeux est :

$$PCI(kcal / m^3) = 2580[H_2] + 3050[CO] + 8530[CH_4] + 17000[C_nH_p]$$

A partir de cette formule, on peut calculer les PCI des gaz produits par les différents tests. Généralement, le syngas n'est utilisé qu'après avoir éliminé toute son eau, donc c'est la composition en base sèche qu'on utilise. Le tableau suivant illustre les valeurs du PCI calculé.

Tableau 16 : PCI des syngas

Test	PCI	
Unité	Kcal/Nm ³	kJ/Nm ³
Test 1	1203,7	5040,0
Test 2	1213,8	5082,3
Test 3	1204,2	5042,0

Les valeurs des PCI nous permettent de qualifier le syngas de gaz pauvre. La présence de l'azote comme inerte en grande quantité est la principale raison. Lorsqu'on substitue l'air à de l'oxygène pur, le PCI est multiplié par 3.

e. Le \square cold gas efficiency \square

Le « cold gas efficiency » est un terme anglais désignant le rapport entre l'énergie chimique contenue dans le syngas et celle contenue dans la biomasse initiale basé sur le pouvoir calorifique inférieur (à température standard pour laquelle l'eau est à l'état condensé, ce qui explique le terme « cold »). La formule permettant de calculer le cold gas efficiency est :

$$\eta_g = \frac{PCI_g \times \dot{V}_g}{PCI_{bio} \times m_{bio}} \times 100 \quad (2.6)$$

Avec :

η_g : Cold gas efficiency en [%]

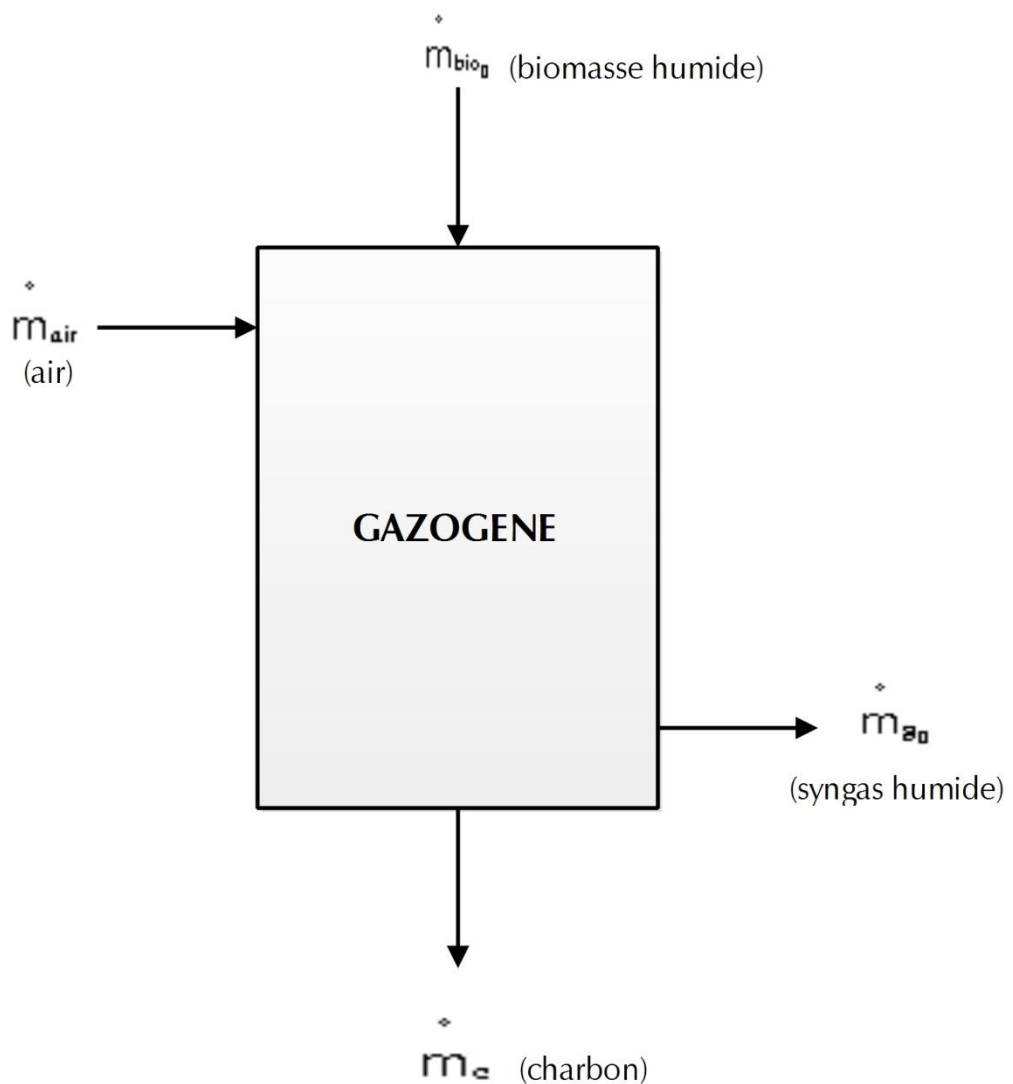
PCI_g : PCI du syngas en $[kJ/Nm^3]$

\dot{V}_g : Débit volumique du syngas en $[m^3/h]$

PCI_{bio} : PCI de la biomasse en $[kJ/kg]$

\dot{m}_{bio} : Débit massique de la biomasse en $[kg/h]$

Soit le schéma ci-dessous représentant le gazogène :



En appliquant la conservation de la masse au système, on a :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{bio}_0} + \dot{m}_{\text{air}} &= \dot{m}_c + \dot{m}_{g_0} \\ \dot{m}_{g_0} &= \dot{m}_{\text{bio}_0} + \dot{m}_{\text{air}} - \dot{m}_c \end{aligned}$$

Le débit molaire de syngas humide sera donc :

$$\begin{aligned} \dot{n}_{g_0} &= \dot{m}_{g_0} \times M_{(g_0)} \\ \dot{n}_{g_0} &= \frac{(\dot{m}_{\text{bio}_0} + \dot{m}_{\text{air}} - \dot{m}_c)}{M_{(g_0)}} \end{aligned}$$

On obtient alors le débit volumique en syngas humide :

$$\begin{aligned} \dot{V}_{g_0} &= \dot{n}_{g_0} \times Vm_{(g_0)} \\ \dot{V}_{g_0} &= (\dot{m}_{\text{bio}_0} + \dot{m}_{\text{air}} - \dot{m}_c) \times \frac{Vm_{(g_0)}}{M_{(g_0)}} \end{aligned}$$

Enfin, le débit volumique en syngas sec sera :

$$\begin{aligned} \dot{V}_g &= \dot{V}_{g_0} \times (1 - E_{\text{base humide}}) \\ \dot{V}_g &= (\dot{m}_{\text{bio}_0} + \dot{m}_{\text{air}} - \dot{m}_c) \times (1 - E_{\text{base humide}}) \times \frac{Vm_{(g_0)}}{M_{(g_0)}} \end{aligned}$$

Avec :

\dot{V}_g : Débit volumique du syngas en [Nm³/h]

\dot{m}_{bio_0} : Débit massique de biomasse humide en [kg/h]

\dot{m}_{air} : Débit massique de l'air en [kg/h]

\dot{m}_c : Débit massique du charbon en [kg/h]

$M_{(g_0)}$: Masse molaire du syngas humide en [kg/mol]

$Vm_{(g_0)}$: Volume molaire du syngas dans les CNTP en [m³/mol]

$E_{\text{basehumide}}$: Humidité du syngas en base humide

Les débits volumiques de syngas sec dans les conditions normales de température et de pression des différents tests effectués sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 17 : Débits volumiques des syngas sec

Test	\dot{m}_{bio_0}	\dot{m}_{air}	\dot{m}_c	$E_{\text{basehumide}}$	$V_{m_{(g_0)}}$	$M_{(g_0)}$	\dot{V}_g
Unité	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[%/100]	[Nm ³ /mol]	[kg/mol]	[Nm ³ /h]
Test1	3,0900	5,8000	0,1115	0,1100	0,0224	0,0248	7,0522
Test 2	3,0500	5,9000	0,0641	0,1040	0,0224	0,0249	7,1710
Test 3	2,0600	3,9000	0,0697	0,1090	0,0224	0,0248	4,7354

Toutes les données sont réunies pour le calcul du cold gas efficiency. Ainsi les valeurs de η_g sont données dans le tableau suivant.

Tableau 18 : Cold gas efficiency des différents tests

Test	PCI_g	\dot{V}_g	PCI_{bio}	\dot{m}_{bio}	η_g
Unité	[kJ/Nm ³]	[Nm ³ /h]	[kJ/kg]	[kg/h]	%
Test 1	5040,02	7,05	17963,00	2,76	71,69
Test 2	5082,26	7,17	17963,00	2,73	74,16
Test 3	5041,99	4,73	17963,00	1,84	72,24

f. La puissance véhiculée par le syngas

La puissance est définie par l'énergie par unité de temps. Donc pour un débit de syngas donnée, la puissance véhiculée est :

$$P_g [\text{kW}] = PCI_g \left[\text{kJ} / \text{Nm}^3 \right] \times \dot{V}_g \left[\text{Nm}^3 / \text{s} \right] \quad (2.7)$$

Les puissances véhiculées par les différents débits de syngas des trois tests sont données par le tableau ci-après :

Tableau 19 : *Puissances véhiculées par les syngas*

Test	P_g [kW]
Test 1	9,87
Test 2	10,12
Test 3	6,62

La puissance maximale que peut atteindre notre gazogène est de 10,12 kW si on utilise les éclats d'eucalyptus à 10,59 % d'humidité. Cette puissance est équivalente à celle de 10 résistances chauffantes de 1000 W.

CHAPITRE 9 : UTILISATIONS DU SYNGAS

Les utilisations du syngas sont variées et vont de la production de chaleur à la production d'électricité en passant par la synthèse des produits chimiques.

9.1 PRODUCTION DE CHALEUR

Le syngas est utilisé en tant que combustible pour la production de la chaleur destinée à la cuisson par combustion directe. Un bruleur doit donc être connecté à la sortie du gazogène. La figure suivante illustre un bruleur à gaz conventionnel modifié compatible avec une alimentation en syngas.



Figure 37 : *Bruleur à syngas*

9.1.1 Combustion théorique du syngas

Lors de la combustion de notre syngas par l'air, les trois grandeurs qui sont le PCI, le pouvoir comburivore et le pouvoir fumigène permettent d'évaluer la qualité de la combustion. La combustion est dite théorique lorsque les constituants d'un combustible brûlent complètement dans des conditions stœchiométriques (excès d'air nul). Comme

nous avons déjà calculé le PCI dans le chapitre précédant, il nous reste à voir les deux autres grandeurs.

a. Pouvoir comburivore Va

C'est le volume d'air nécessaire et suffisant à la combustion théorique d'une unité de combustible. Donc si on prend 1 m³ de notre syngas qui à la composition moyenne en base sèche :

CO : 21,3%

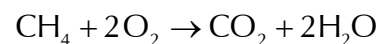
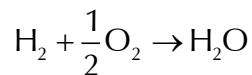
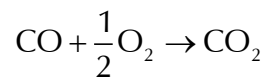
H₂ : 15%

CH₄ : 2%

CO₂ : 11,23%

N₂ : 50,47%

Les réactions de combustion des entités combustibles du syngas avec l'oxygène de l'air sont les suivantes :



On a donc :

$$V_{\text{O}_2} = \frac{[\text{CO}]}{2} + \frac{[\text{H}_2]}{2} + 2[\text{CH}_4]$$

D'où le volume d'air :

$$V_a = V_{O_2} \times \frac{100}{21}$$

$$V_a = \frac{1}{0,21} \left(\frac{[CO]}{2} + \frac{[H_2]}{2} + 2[CH_4] \right)$$

$$V_a = \frac{1}{0,21} \left(\frac{0,213}{2} + \frac{0,15}{2} + 2 \times 0,02 \right)$$

$$V_a = 1,05 \text{ m}^3 \text{ d'air} / \text{m}^3 \text{ de syngas}$$

b. Pouvoir fumigène Vf

C'est le volume de fumée produite par la combustion théorique d'une unité de combustible

$$V_f = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}$$

Avec :

$$V_{CO_2} = [CO] + [CH_4] + [CO_2]$$

$$V_{H_2O} = [H_2] + 2 \times [CH_4]$$

$$V_{N_2} = [N_2] + \frac{79}{100} V_a$$

D'où :

$$V_f = 3[CH_4] + [CO] + [CO_2] + [H_2] + [N_2] + 0,79 V_a$$

$$V_f = 3 \times 0,02 + 0,213 + 0,1123 + 0,15 + 0,5047 + 0,79 \times 1,05$$

$$V_f = 1,87 \text{ m}^3 \text{ de fumée} / \text{m}^3 \text{ de syngas}$$

9.2 PRODUCTION D'ELECTRICITE

La production d'électricité à partir du syngas nécessite la connexion d'un moteur, pouvant fonctionner au gaz pauvre comme le moteur diesel, couplé à un alternateur. Le syngas peut être aussi alimenté un simple groupe électrogène fonctionnant à l'essence. Cette option est intéressante pour les unités de petite capacité due à la grande mobilité.

9.3 SYNTHÈSE DE PRODUITS CHIMIQUES

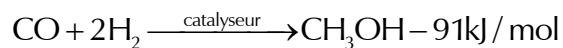
Le syngas est un élément important pour la synthèse d'une foule de produits chimiques. Commercialement, il trouve son utilité dans deux grands domaines :

- Les alcools (méthanol, éthanol ...)
- Les autres (glycérol, acide fumarique, ammoniac ...)

La section suivante décrit la production de certains de ces produits.

9.3.1 Production de méthanol

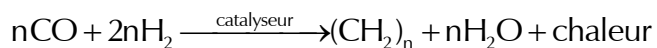
Le méthanol est produit à partir du syngas en présence de catalyseur selon la réaction :



En l'absence d'un catalyseur approprié, le rendement réel est très faible, de sorte que les catalyseurs à base de Zn, Cu, Al et Cr sont utilisés.

9.3.2 Synthèse Fischer-Tropsh

La synthèse Fischer-Tropsh (FTS) est une méthode très efficace pour la production d'hydrocarbures liquides à partir de syngas. La réaction FTS qui est menée dans la plage de 200-300 °C et sous une pression de 20-300 atm, peut être écrite sous une forme générique :



CONCLUSION

Compte tenu des perspectives vers lesquelles se dirige notre société, pour satisfaire ses besoins énergétiques, la gazéification de la biomasse commence à émerger. Dans les prochaines décennies, elle va sans doute jouer un rôle de première importance.

Aux termes de la préparation de ce mémoire de fin d'études en génie chimique, nous avons conçu et testé un gazogène à lit fixe de type downdraft pour la gazéification des éclats d'eucalyptus en vue de son utilisation pour la cuisson.

Avant tous travaux de fabrication, nous avons passé en revue la littérature pour la synthèse des connaissances sur la filière gazéification. Nous avons consacré quelques chapitres pour la bibliographie, allant des généralités sur la biomasse à la gazéification de cette dernière.

La constatation des gaspillages d'énergie générés par les cuiseurs traditionnels largement utilisés à Madagascar a motivé la confection du gazogène. Le choix s'est porté sur le type downdraft pour sa souplesse du point de vue combustibles mais aussi de l'utilisation du syngas produit. Le gazogène construit contient les éléments suivants : la chambre de réaction, son enveloppe et la trémie (qui constituent le corps du gazogène) mais aussi du cyclone, du ventilateur centrifuge, du moteur, du variateur de vitesse et du refroidisseur de gaz (qui constituent les équipements auxiliaires). Nous avons ensuite utilisé le logiciel « gasifier », un logiciel libre de simulation pour les gazogènes downdraft. Les tests du gazogènes ont été effectués avec des éclats d'eucalyptus avec une humidité de 10,92% et de formule $\text{CH}_{1,37}\text{O}_{0,63}$. A vitesse maximale, on a obtenu un débit de biomasse de 3,09 kg/h qui décroît avec la diminution de la vitesse et se retrouve à 2,06 kg/h à vitesse minimale. La composition du syngas ne présente pas de différence majeure pour les trois tests concluants, la composition moyenne est (CO : 21,3%, H_2 : 15%, CH_4 : 2%, CO_2 : 11,23%, N_2 : 50,47 %) en base sèche, qui donne un PCI moyen de 1207,25 kcal/kg. Tous calculs faits, on a obtenu une puissance maximale de 10,12 kW pour le gazogène, un rendement maximal de 74,16 % et un rapport stœchiométrique de 0,35. Ces résultats se sont donc avérés très concluants pour les éclats d'eucalyptus. Il faudra

d'abord effectuer des tests avec d'autres combustibles avant de pouvoir apprécier le vrai potentiel de l'appareil.

Dans ce projet, le gazogène conçu se limite encore à un usage domestique mais combiné à un groupe électrogène il servira à la production d'électricité. Son utilisation pourra ainsi s'étendre vers l'électrification rurale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **BASU Prabir**. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction : Pratical design and theory. 2^e edition. Academic Press, 2013. 548 pages
- [2] **MOROT-GAUDRY Jean-François et FARINEAU Jack**. La photosynthèse : Processus physiques, moléculaires et physiologiques. Edition Quae, 2011. 403 pages
- [3] **C. BROWN Robert**. Thermochemical Processing of biomass : conversion into fuels, chemicals and power. John Wiley & Sons, 2011. 348 pages
- [4] **T.Reed, B. Thomas et DAS Agua**. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. Biomass energy foundation, 1988. 140 pages
- [5] **QUAAK Peter, KNOEF Harrie et STASSEN Hubert**. Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies. World Bank Publications, 1999. 78 pages
- [6] **JANSEN Tessa**. Gasification of woody biomass. Rapport de stage effectué à SINTEF Energi AS, 2011. 49 pages
- [7] **RAKOTONDRAMANANA Samuel**. Cours sur la combustion, 4^e année génie chimique. ESPA
- [8] **MOLETTA René**. Méthanisation de la biomasse. Techniques de l'ingénieur, 2008. 21 pages
- [9] **GOURDON Rémy**. Traitement biologique des déchets. Techniques de l'ingénieur, 2007. 14 pages
- [10] **BALLERINI Daniel**. Les biocarburants: état des lieux, perspectives et enjeux du développement. Editions OPHRYS, 2006. 348 pages
- [11] **DAHLQUIST Erik**. Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: Combustion, Gasification, Pyrolysis, Torrefaction and Fermentation. CRC Press, 2013. 520 pages
- [12] **L. KLASS Donald**. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic Press, 1998. 651 pages

- [13] **CROCKER Mark.** Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals. Royal Society of Chemistry, 2010. 532 pages
- [14] **HIGMAN Christopher et VAN DER BURGT Maarten.** Gasification. Gulf Professional Publishing, 2011. 456 pages
- [15] **ABDOUNI El Houcine.** Etude de la valorisation énergétique de la biomasse locale par gazéification. Mémoire de Master, Ecoles des Mines de Nantes, 2009. 64 pages
- [16] **SHRIVASTAVA Vynay.** Design and development of downdraft gasifier for operating CI engine on dual fuel mode. Mémoire de master, National Institute of Technology ROURKELA, 2012. 78 pages
- [17] **M. A. Chawdhury et K. Mahkamov.** Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries. Journal of scientific research, 2010. 14 pages
- [18] **MC CARTY Arthur.** The effect of biomass, operating conditions, and gasifier design on the performance of an updraft biomass gasifier. Mémoire de master, Kansas State University, 2012. 138 pages
- [19] **CHAUVIN Alice et FARAUD Victor.** Simulation de la gazéification de bois et vérification expérimentale avec un gazéificateur 10 kW. Rapport de stage, Ecole Polytechnique de Marseille, 2008. 82 pages
- [20] Diagnostic du secteur énergie à Madagascar. Rapport du WWF, 2012. 141 pages
- [21] De l'électricité verte pour un million de ruraux à Madagascar. Fondation Energie pour le Monde, 2010. 60 pages
- [22] **FOCK Felicia & al.** Modelling a biomass gasification system by means of "EES". Scandinavian Simulation Society, 2000. 7 pages
- [23] **Z Zainal, A Rifau et G Quadir.** Experimental investigation of downdraft gasifier. Biomass and bioenergy, Volume 23, 2002. Page 283-289

WEBOGRAPHIE

- [w1] http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biomasse.php4 (consulté le 08 octobre 2013)
- [w2] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse> (consulté le 08 octobre 2013)
- [w3] <http://biologie.wikispaces.com/La+Photosynthese> (consulté le 08 octobre 2013)
- [w4] <http://verte-energie.voila.net/defbiomasse.html> (consulté le 08 octobre 2013)
- [w5] <http://bpe.epfl.ch/page-34012-en.html> (consulté le 08 octobre 2013)
- [w6] http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_%28%C3%A9nergie%29 (consulté le 08 octobre 2013)
- [w7] <http://www.handbook.ifrf.net/handbook/cf.html?id=23> (consulté le 09 octobre 2013)
- [w8] <http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thanisation> (consulté le 09 octobre 2013)
- [w9] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz%C3%A9ification> (consulté le 10 octobre 2013)
- [w10] <http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e0e.htm> (consulté le 01 novembre 2013)

ANNEXES

Annexe 1 : Conversion d'unités

Masse

1 kg = 2,204 lb = 15,432 grains = 32,105 oz (troy) = 0,984x10⁻³ ton (long) = 1,1023x10⁻³ ton (short)

Pression

1 atm = 1,0133 bar = 101,33 kPa = 14,7 psia = 29,921 in. Hg = 1419 in. H₂O = 760 mm Hg

Vitesse

1 m/s = 3,281 ft/s = 3,6 km/h = 2,237 mph

Energie

1 Btu = 1,055 kJ = 252 cal = 778,2 foot pound force

1 kWh = 3,6 MJ = 3413 Btu

1 cal = 4,187 J

Masse volumique

1 g/cm³ = 1000 kg/m³ = 62,43 lb/ft³

1 lb/ft³ = 0,01602 g/cm³ = 16,02 kg/m³

Puissance

1 watt = 1 J/s = 3,43 Btu/h = 0,2389 cal/s = 3,6 kJ/h = 1,341x10⁻³ hp

Température

K = °C + 273,5

°R = °F + 459,67 = 1,80 K

°F = 1,8 °C + 32

Longueur

$$1 \text{ in} = 2,54 \text{ cm}$$

Volume (gaz comprimé)

$$1 \text{ Nm}^3 (0^\circ \text{C}) = 35,85 \text{ scf} (77^\circ \text{F}) = 37,32 \text{ scf} (60^\circ \text{F}) = 3790 \text{ scf} (68^\circ \text{F})$$

Volume (non compressible)

$$1 \text{ m}^3 = 35,315 \text{ ft}^3 = 1000 \text{ l}$$

$$1 \text{ ft}^3 = 0,02831 \text{ m}^3 = 7,48 \text{ gal}$$

$$1 \text{ gal (U.S.)} = 3,785 \text{ liters} = 0,1336 \text{ ft}^3 = 231 \text{ in}^3$$

$$1 \text{ l} = 0,353 \text{ ft}^3 = 0,2642 \text{ gal} = 33,82 \text{ fl oz} = 61,02 \text{ in}^3$$

Débit de gaz

$$1 \text{ Nm}^3/\text{h} = 0,632 \text{ scfm} (68^\circ \text{F})$$

Surface

$$1 \text{ m}^2 = 10,76 \text{ ft}^2 = 1550 \text{ in}^2 = 1,30 \text{ yd}^2$$

Contenu énergétique de gaz

$$1 \text{ Btu/sfc} (68^\circ \text{F}) = 9,549 \text{ kCal/Nm}^3 (0^\circ \text{C}) = 39,98 \text{ kJ/Nm}^3 (0^\circ \text{C})$$

Contenu énergétique de combustible solide

$$1 \text{ Btu/lb} = 0,5555 \text{ cal/g} = 2,326 \text{ J/g}$$

$$1 \text{ cal/g} = 1,8 \text{ Btu/lb} = 4,187 \text{ J/g}$$

Annexe 2 : Procédés de fabrication de l'éthanol

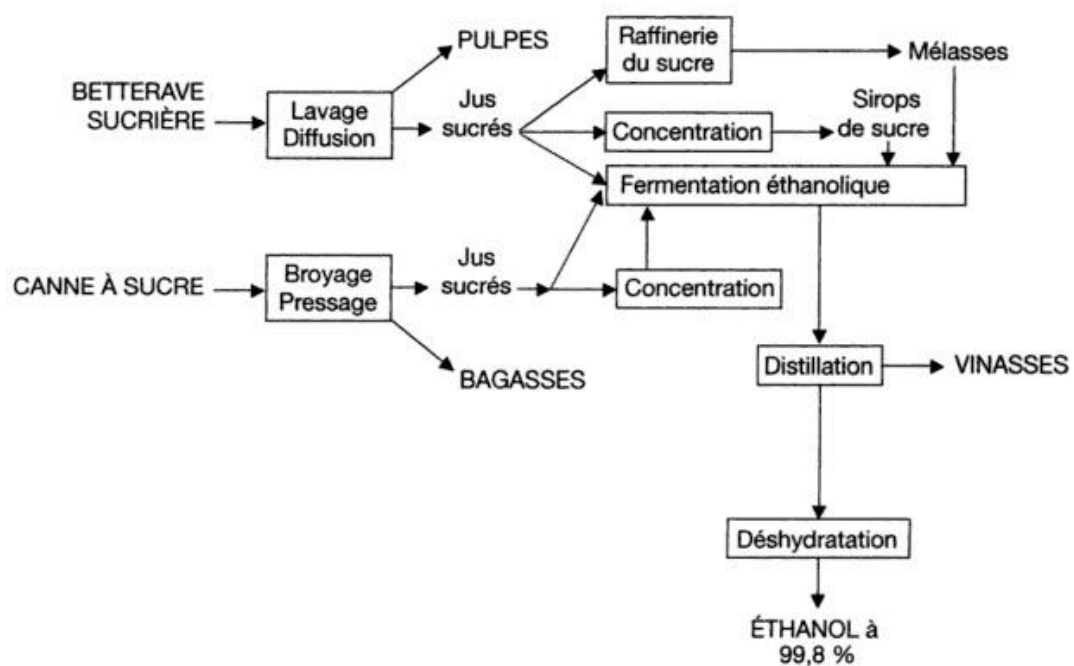


Figure 38 : Production d'éthanol ex-plantes sucrières [10]

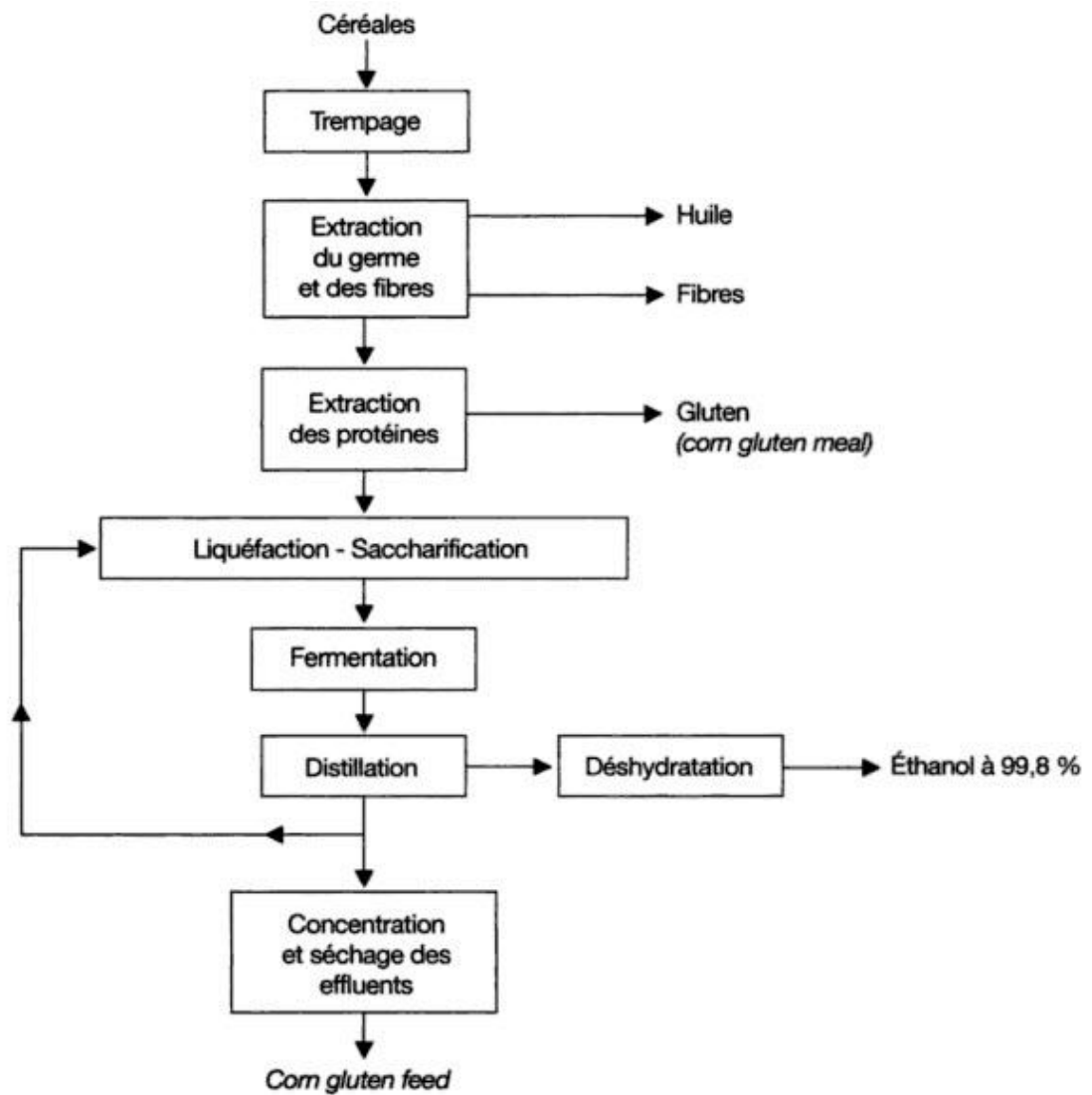


Figure 39 : Production d'éthanol à partir de céréales (wet milling) [10]

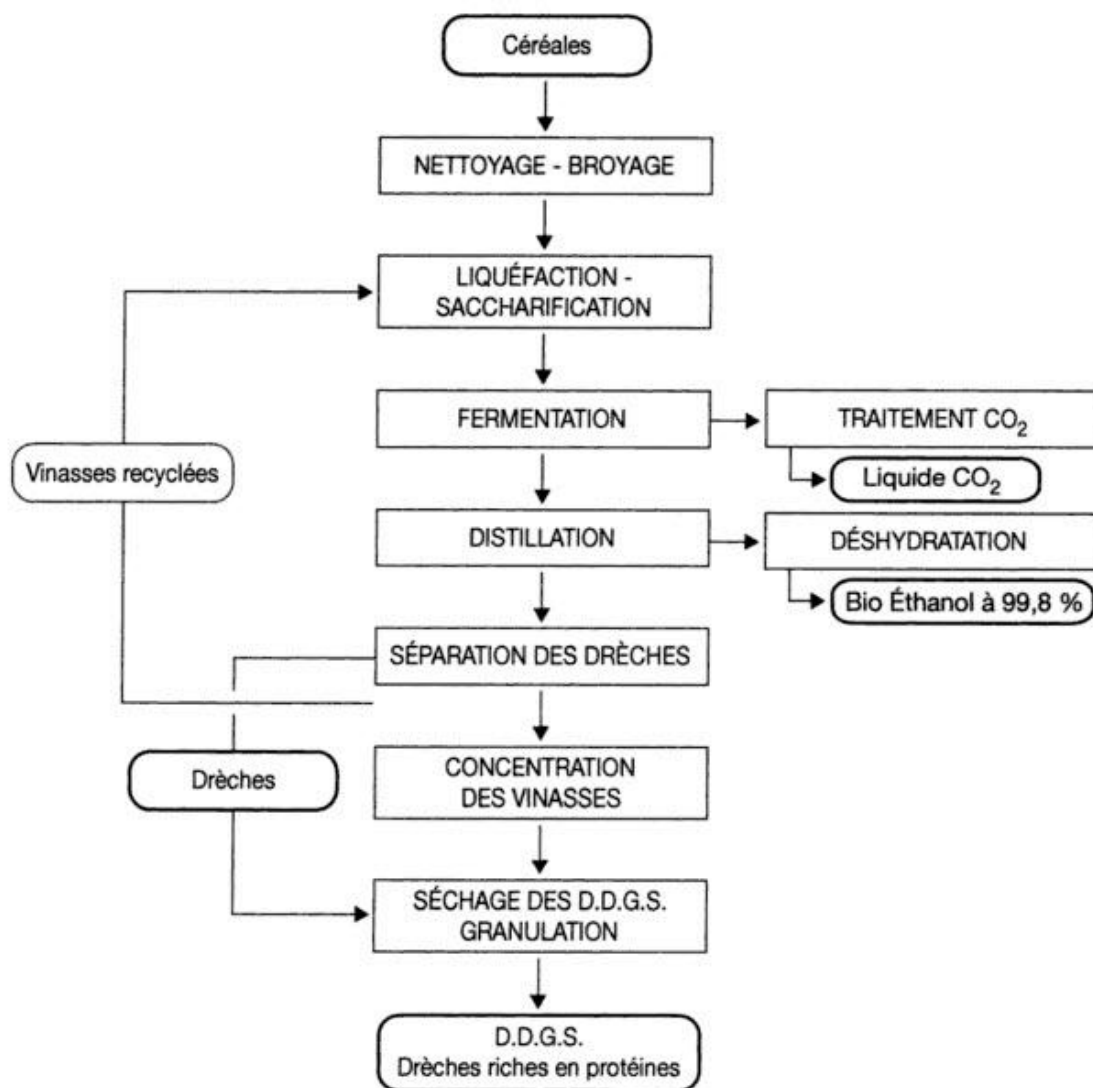


Figure 40 : Production d'éthanol à partir de céréales (dry milling) [10].

Annexe 3 : Contenu énergétique sur base sèche de divers combustibles (biomasse)

Fuel type & source	English			Metric ^b			
	Higher Heating Value			Higher Heating Value		Lower Heating Value	
	Btu/lb ^c	Btu/lb	MBtu/ton	kJ/kg	MJ/kg	kJ/kg	MJ/kg
Agricultural Residues							
Corn stalks/stover (1,2,6)	7 487	7,587 - 7,967	15.2 - 15.9	17,636 - 18,519	17.6 - 18.5	16,849 - 17,690	16.8 - 18.1
Sugarcane bagasse (1,2,6)	7 031	7,450 - 8,349	14.9 - 16.7	17,317 - 19,407	17.3 - 19.4	17,713 - 17,860	17.7 - 17.9
Wheat straw (1,2,6)		6,964 - 8,148	13.9 - 16.3	16,188 - 18,940	16.1 - 18.9	15,082 - 17,659	15.1 - 17.7
Hulls, shells, prunings (2,3)		6,811 - 8,838	13.6 - 17.7	15,831 - 20,543	15.8 - 20.5		
Fruit pits (2-3)		8,950 - 10,000	17.9 - 20.0				
Herbaceous Crops	7 791						
Miscanthus (6)				18,100 - 19,580	18.1 - 19.6	17,818 - 18,097	17.8 - 18.1
switchgrass (1,3,6)		7,754 - 8,233	15.5 - 16.5	18,024 - 19,137	18.0 - 19.1	16,767 - 17,294	16.8 - 18.6
Other grasses (6)				18,185 - 18,570	18.2 - 18.6	16,909 - 17,348	16.9 - 17.3
Bamboo (6)				19,000 - 19,750	19.0 - 19.8		
Woody Crops	8 852						
Black locust (1,6)		8,409 - 8,582	16.8 - 17.2	19,546 - 19,948	19.5 - 19.9	18 464	18,5
Eucalyptus (1,2,6)		8,174 - 8,432	16.3 - 16.9	19,000 - 19,599	19.0 - 19.6	17 963	18,0
Hybrid poplar (1,3,6)		8,183 - 8,491	16.4 - 17.0	19,022 - 19,737	19.0 - 19.7	17 700	17,7
Willow (2,3,6)		7,983 - 8,497	16.0 - 17.0	18,556 - 19,750	18.6 - 19.7	16,734 - 18,419	16.7 - 18.4
Forest Residues	7 082						
Hardwood wood (2,6)		8,017 - 8,920	16.0 - 17.5	18,635 - 20,734	18.6 - 20.7		
Softwood wood (1,2,3,4,5,6)		8,000 - 9,120	16.0 - 18.24	18,595 - 21,119	18.6 - 21.1	17,514 - 20,768	17.5 - 20.8
Urban Residues							
MSW (2,6)		5,644 - 8,542	11.2 - 17.0	13,119 - 19,855	13.1 - 19.9	11,990 - 18,561	12.0 - 18.6
RDF (2,6)		6,683 - 8,563	13.4 - 17.1	15,535 - 19,904	15.5 - 19.9	14,274 - 18,609	14.3 - 18.6
Newspaper (2,6)		8,477 - 9,550	17 - 19.1	19,704 - 22,199	19.7 - 22.2	18,389 - 20,702	18.4 - 20.7
Corrugated paper (2,6)		7,428 - 7,939	14.9 - 15.9	17,265 - 18,453	17.3 - 18.5	17 012	
Waxed cartons (2)		11,727 - 11,736	23.5 - 23.5	27,258 - 27,280	27,3	25 261	

Source : http://www1.eere.energy.gov/biomass/feedstock_databases.html

Annexe 4 : Avantages et inconvénients des différents procédés de gazéification de la biomasse

AVANTAGES	INCONVENIENTS
DOWNDRAFT	
<ul style="list-style-type: none"> • Simple de conception • Epruvé pour divers combustibles • Syngas relativement propre 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustible homogène et de taille significative • Taille des installations très limitée (350 kW) • Faible humidité des combustibles nécessaire
UPDRAFT	
<ul style="list-style-type: none"> • Construction simple et robuste • Rendement thermique élevé • Plus grande souplesse vis-à-vis de l'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> • Syngas très chargé en goudron • Inadapté à la production d'électricité
LIT FLUIDISE DENSE	
<ul style="list-style-type: none"> • Bon contrôle des températures • Vitesses de réaction élevées • Bon contact solide-gaz • Pas de limite de taille 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille minimale pour être économique (20 mW) • Taux de particules dans le syngas élevé • Nécessité des particules de taille très fine • Faible humidité des combustibles nécessaire • Taux de goudron moyen à élevé

AVANTAGES	INCONVENIENTS
LIT FLUIDISE CIRCULANT	
<ul style="list-style-type: none"> • Bon contrôle des températures et vitesses de réaction • Grande tolérance par rapport au combustible (type, taille) • Taux de goudron dans le syngas modéré • Taux de conversion élevée • Pas de limite de taille 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille minimale pour être économique (20 mW) • Taux de particules dans le syngas élevé • Nécessité des particules de taille très fine • Faible humidité des combustibles nécessaire • Taux de goudron moyen à élevé • Perte de carbone dans les cendres
LIT ENTRAINE	
<ul style="list-style-type: none"> • Bon contact solide-gaz • Vitrification des cendres • Pas de limite de taille • Taux de conversion élevé • Syngas propre par rapport au goudron 	<ul style="list-style-type: none"> • Cout de préparation de la biomasse élevé • Gaz de bonne qualité mais de faible PCI (température élevée) • Inventaire des combustibles limité • Taille minimale pour être rentable (50 mW)

Source : [19]

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTES DES ACRONYMES ET SYMBOLES	vii
INTRODUCTION.....	1

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA BIOMASSE3

1.1 DEFINITION DE LA BIOMASSE	3
1.2 FORMATION DE LA BIOMASSE	3
1.3 LES DIFFERENTS TYPES DE BIOMASSE	4
1.3.1 <i>Biomasse lignocellulosique</i>	4
a. La cellulose	4
b. L'hémicellulose	5
c. La lignine	6
1.3.2 <i>Biomasse à glucide</i>	7
1.3.3 <i>Biomasse oléagineuse</i>	8

CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES DE LA BIOMASSE9

2.1 STRUCTURE DE LA BIOMASSE	9
2.2 PROPRIETES	9
2.2.1 <i>La composition</i>	10
a. La composition élémentaire.....	10
b. La composition immédiate	11
2.2.2 <i>Le pouvoir calorifique</i>	12
a. Pouvoir calorifique supérieur (PCS).....	13
b. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	13
2.2.3 <i>La masse volumique</i>	14
2.3 CLASSIFICATION GENERALE DES COMBUSTIBLES	14
2.3.1 <i>Le rapport atomique</i>	15

2.3.2	<i>Le diagramme ternaire</i>	15
-------	------------------------------------	----

CHAPITRE 3 : LES DIFFERENTES VOIES DE VALORISATION

ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE17

3.1	CONVERSIONS BIOCHIMIQUES DE LA BIOMASSE	18
3.1.1	<i>La digestion anaérobie</i>	18
c.	L'hydrolyse et l'acidogenèse	19
d.	L'acétogenèse	19
e.	La méthanogenèse	19
3.1.2	<i>La digestion aérobie</i>	20
3.1.3	<i>La fermentation</i>	22
3.2	CONVERSIONS THERMOCHIMIQUES	23
3.2.1	<i>La combustion directe</i>	23
3.2.2	<i>La pyrolyse</i>	23
f.	Les mécanismes de la pyrolyse.....	24
g.	Les principaux paramètres réactionnels.....	26
3.2.3	<i>La gazéification</i>	27

CHAPITRE 4 : LA GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE.....28

4.1	HISTOIRE ET SITUATION ACTUELLE	28
4.2	DEFINITION	30
4.3	ASPECTS THEORIQUES DE LA GAZEIFICATION	30
4.3.1	<i>Les différentes étapes de la gazéification</i>	30
a.	Le séchage	30
b.	La pyrolyse	30
c.	L'oxydation	31
d.	La réduction.....	31
4.3.2	<i>Les réactions gouvernant la gazéification</i>	31
4.3.3	<i>Les différents agents de gazéification</i>	32
a.	L'oxygène	32
b.	La vapeur d'eau	33
4.4	CLASSIFICATION DES GAZOGENES	33
4.4.1	<i>Les gazogènes à lit fixe</i>	33
a.	Procédé à contre-courant ou « updraft »	33

b. Procédé co-courant ou « downdraft »	34
c. Procédé « crossdraft »	35
4.4.2 Les gazogènes à lit fluidisé	36
4.4.3 Les gazogènes à lit entraîné	38
4.5 CHAMPS D'APPLICATION DES DIFFERENTS TYPES DE GAZOGENE	39
4.6 EFFETS DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR LE PROCESSUS DE GAZEIFICATION	40
4.6.1 La teneur en humidité	40
4.6.2 Le rapport stœchiométrique	40
4.6.3 La température	42
4.6.4 La taille des particules	43

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 5 : MOTIVATION DU PROJET45

5.1 CONTEXTE GENERAL	45
5.1.1 Renouvelable	45
5.1.2 Bénéfices environnementaux	45
5.1.3 Bénéfices sociopolitiques	46
5.2 LE CONTEXTE ENERGETIQUE MALGACHE	46
5.2.1 Le bilan énergétique actuel	46
5.2.2 Le secteur électricité à Madagascar	48
5.2.3 Solutions pour l'électrification rurale	48
5.3 OBJECTIFS DE L'ETUDE	49

CHAPITRE 6 : CONCEPTION ET REALISATION DU GAZOGENE50

6.1 CHOIX DU TYPE DE GAZOGENE.....	50
6.2 CHOIX DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION	50
6.3 QUELQUES CONTRAINTES ETABLIES	51
6.4 LES COMPOSANTS DU GAZOGENE.....	51
6.4.1 Le corps du gazogène.....	51
a. La chambre de réaction avec la trémie.....	51
b. L'enveloppe	55
6.4.2 Les équipements auxiliaires	57

a.	Le cyclone.....	57
b.	Le ventilateur centrifuge	59
c.	Le moteur	62
d.	Le variateur de vitesse	62
e.	Le refroidisseur.....	67
6.5	EVALUATION DU COUT DE FABRICATION	68

CHAPITRE 7 : MODELISATION PAR LE MODELE « GASIFIER » SOUS ENGINEERING EQUATION SOLVER (EES)70

7.1	INTRODUCTION.....	70
7.2	PRESENTATION DE EES ET DU MODELE	70
7.3	FAMILIARISATION AVEC LE LOGICIEL	70
7.4	EXPLOITATION DU LOGICIEL	72
7.4.1	<i>Variation du débit d'air en fonction de la température de gazéification...</i>	73
a.	Procédures.....	73
b.	Résultats.....	73
c.	Observations	74
7.4.2	<i>Variation de la composition du syngas en fonction de la température.</i>	74
a.	Procédures.....	75
b.	Résultats.....	75
c.	Observations	76
7.4.3	<i>Influence de l'humidité de la biomasse.....</i>	76
a.	Procédures.....	77
b.	Résultats.....	77
c.	Observations	77

CHAPITRE 8 : TESTS DU GAZOGENE.....79

8.1	ETUDES TECHNIQUES PRELIMINAIRES	79
8.1.1	<i>Caractérisation de la biomasse</i>	79
a.	La biomasse utilisée.....	79
b.	Préparation de la biomasse.....	79
c.	Détermination de l'humidité du bois	80
d.	Composition de la biomasse	82
e.	Formule chimique de l'eucalyptus	83

8.2	TESTS DU GAZOGENE.....	84
8.2.1	<i>Matériels et méthodes</i>	84
8.2.2	<i>Résultats et discussions</i>	85
a.	Observations visuelles.....	85
b.	Consommation de combustible	87
c.	Composition du syngas	88
d.	Pouvoir calorifique inférieur	93
e.	Le « cold gas efficiency ».....	94
f.	La puissance véhiculée par le syngas	97
CHAPITRE 9 : UTILISATIONS DU SYNGAS.....		99
9.1	PRODUCTION DE CHALEUR	99
9.1.1	<i>Combustion théorique du syngas</i>	99
a.	Pouvoir comburivore V_a	100
b.	Pouvoir fumigène V_f	101
9.2	PRODUCTION D'ELECTRICITE	101
9.3	SYNTHESE DE PRODUITS CHIMIQUES	102
9.3.1	<i>Production de méthanol</i>	102
9.3.2	<i>Synthèse Fischer-Tropsh</i>	102
CONCLUSION		103
BIBLIOGRAPHIE		105
ANNEXES.....		
Annexe 1	Conversion d'unités.....	A
Annexe 2	Procédés de fabrication de l'éthanol.....	C
Annexe 3	Contenu énergétique sur base sèche de divers combustibles	F
Annexe 4	Avantages et inconvénients des différents procédés de gazéification	G

TABLE DES MATIERES

Auteur : RAKOTOMALALA ROBINSON Mbolantenaina

Adresse : Lot A 143 Ambodiriana AMBATOLAMPY 104

Tel : 0331370283 **Email :** mbolantenaina@yahoo.fr

Titre du mémoire : « CONCEPTION ET REALISATION D'UN GAZOGENE DOWNDRAFT A USAGE DOMESTIQUE: APPLICATION A LA GAZEIFICATION D'ECLATS D'EUCALYPTUS »

Nombre de pages : 107

Nombre de figures : 39

Nombre de tableaux : 18

Nombre d'annexes : 4

RESUME

La gazéification est un procédé thermochimique qui convertit la biomasse solide en un mélange de gaz combustibles destiné à plusieurs usages. Ce projet est axé sur la conception d'un gazogène à usage domestique permettant d'obtenir un gaz de synthèse constitué majoritairement de CO et H₂ à partir d'éclats d'eucalyptus. Il a été confectionné à partir de matériaux de récupération qui sont disponible dans le pays. Une modélisation avec le logiciel « gasifier » a été aussi réalisée pour déterminer les compositions des gaz obtenus en fonction du débit d'air entrant.

Mots clés : biomasse, eucalyptus, gazogène, gazéification, conversion thermochimique

ABSTRACT

Gasification is a thermochemical process which converts solid biomass into a mixture of combustible gases that can be used in various applications. This project concerns the design of a downdraft gasifier that allows obtaining a synthesis gas mainly consisting of CO and H₂ by using eucalyptus splinter. It is manufactured with scraps that are available all over the country. A modeling with software "gasifier" was also conducted to determine the compositions of the gases obtained according to the input air flowrate.

Key words : biomass, eucalyptus, gasifier, gasification, thermochemical conversion

Encadreur : Docteur RAKOTOSAONA Rijalalaina