

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER'S TRAINING
COLLEGE

DEPARTMENT OF PHYSICS

**CONTRIBUTION À LA MODELISATION ET LA
SIMULATION DES PROCESSUS THERMOCHIMIQUES DE
GAZÉIFICATION EN VUE D'OPTIMISER LE GAZ DE
SYNTHÈSE PRODUIT À PARTIR DES RÉSIDUS DE BOIS
AU CAMEROUN : CAS DU BIODIESEL**

Mémoire présente en vue de l'obtention du diplôme de professeur de l'enseignement secondaire
général deuxième grade : **D.I.P.E.S II**

Par
NOAH ANDRE JUNIOR
Matricule 09w0726
Licencie en Physique
Sous la direction du :

Professeur **BEGUIDE BONOMA**
Maitre de conférences
Année Académique 2015-2016

Année Académique : 2015-2016



Je dédie ce mémoire à :

- Mon père, MVILONGO Germain, qui m'a offert les moyens et les conditions nécessaires à mon épanouissement.
- Ma maman, LEKA Marguerite Marceline qui a accepté des peines et des privations énormes, pour m'apporter tout son soutien au cours de ces deux dernières années de formations.
- Mes tantes, FIALAIRE AYOUNG Cécile Véronique et TCHOUALAK KEYI Angèle Claire qui m'ont encadré comme un fils dès ma tendre enfance.
- Mes oncles, AYANGMA Désire et OKOA Marius pour leur contribution dans mon éducation.



Ce travail est le fruit des efforts intenses que ma modeste personne ne peut prétendre avoir fourni seule. Qu'il me soit permis d'exprimer toute ma gratitude :

- À L'éternel, Dieu vivant, qui nous guide et nous instruit chaque jour.
- Au chef de département de physique, le Professeur BEGUIDE BONOMA, qui m'a encadré dans mes recherches.
- Au doctorant FANMOE FEPEUSSI MARIUS WILLY qui a disposé son précieux temps pour m'aider dans ce travail.
- Au Président et aux honorables Membres du jury pour avoir accepté de juger mon travail.
- À tous les Enseignants du Département de Physique de l'École Normale Supérieure, qui ont ménagé beaucoup d'efforts pour nous dispenser des enseignements de qualité.
- À tous mes camarades de promotion pour la solidarité et la chaleur entre nous.

Je tiens à remercier vivement tout ce qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail. À cet effet, je remercie :

- Ma grand-mère ONANENA MPOULEND Marie,
- Mon oncle BIFOULE Henri,
- Mes frères et sœurs : FOU DA Jean, BILOA Cécile, NGONO Marie, MINDJENG Damaris, ENGONO Véronique, MVILONGO Leslie etc.
- Tous mes amis : NDEME Esther, BEMELINGUE Edmond, BOMBOCK Romeo, BESSEGUE Roméo, KEUBOU Lionel, NGANTCHOU Justin, MINOUMISSECK Cédric, BISSAI NKAA Sante Junior.



RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est de montrer :

- d'une part qu'à partir des données expérimentales obtenues dans la littérature et d'une simulation numérique de l'étape de la gazéification sur différents résidus de bois au Cameroun, on peut estimer sur une tonne, la quantité de biodiesel produit à partir de son potentiel biomasse Lignocellulosique résiduelle.

- d'autre part que ce biocarburant obtenu à partir des résidus de bois est de bonne qualité avec un rendement élevé et pouvant être une alternative à substituer le carburant fossile. Cette étude contribue numériquement et principalement à la production du biodiesel de deuxième génération. En effet, il existe deux principales voies de production de ce biocarburant : la voie biochimique qui permet de produire principalement le bioéthanol, et la voie thermochimique qui permet de produire à partir de la réaction de synthèse FT principalement le biodiesel de bonne qualité sans soufre ni Produits aromatiques et avec un indice de cétane supérieur à 74 suivant les conditions opératoires et les types de catalyseur utilisés.

Mots clés : *gazéification, résidus de bois, biocarburant, thermochimique, synthèse FT.*

ABSTRACT

The aim of this work is to show that:

-firstly with experimental fact obtain in the literature and numerical simulation step of gasification on different woods residues in Cameroun, we can estimate on one ton, the quantity of product biomass with this lignocellulosic biomass potential residual.

-on the other hand show that this biofuel is the best quality with high yield and could be an alternative to replace the fossil fuel, this is numerically contributed and principally on second generation of biodiesel production. In effect there exist two principal ways of biofuel production: the biochemical way that enable to principally produce the bioethanol and the thermochemical that enable from FT synthesis reaction produce the biodiesel principally of good quality without sulphur neither aromatics products and with the cetane index number greater than 74 following the operations conditions and the kinds of catalysts

Key words: *gasification, Wood residues, biofuel, thermochemical, FT synthesis.*



TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACES	i
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ/ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiii
NOMENCLATURE	xv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1	1
PRODUCTION DE L'ÉNERGIE À PARTIR DE LA BIOMASSE	1
Introduction	2
1.1 Généralités sur les résidus de bois au Cameroun	2
1.1.1 Sites de concentration des résidus de bois au Cameroun	3
1.1.1.1 Résidus obtenus lors de la coupe et du transport en forêt	3
1.1.1.2 Résidus dans les usines de première transformation	3
1.1.2 Étude descriptive du bois : un matériau hétérogène et anisotrope	4
1.1.2.1 structures du bois	5
1-1-2-2 Composition chimique du bois	5
1.1.2.3 Propriétés physiques du bois	7
1.2 Les essences de bois les plus exploitées au Cameroun : cas de deux types	9
1.2.1 Ayous	10
1.2.2 Fraké	11
1.3 Biocarburants de seconde génération	11
1.3.1 Définition	11
1.3.2 États de lieux sur les biocarburants de seconde génération	12
1.3.3 Les avantages des biocarburants de seconde génération	13
1.3.4 Les inconvénients des biocarburants de seconde génération	13
Conclusion partielle	14
CHAPITRE 2 :	15
MODÉLISATION ET SIMULATION DES ÉTAPES DE PRODUCTION DU BIODIESEL	15
Introduction	16
2.1 Les différentes voies de valorisation de la biomasse	16
2.1.1 La voie biochimique	17
2.1.2 La voie thermochimique	17
2.1.2.1 Pré-conditionnements de la biomasse lignocellulosique résiduelle	17
2.1.2.2 Les différents types de réacteurs de gazéification	18

2.1.2.2.1 Les réacteurs à lit fixe	18
2.1.2.2.2 Réacteur à lit fluidise	20
2.1.2.3 Les différentes étapes de la gazéification	20
2-1-2-4 Prévisions des concentrations des gaz de synthèse	24
2-1-2-5 Déroulements de la purification du gaz de synthèse	24
2-1-2-6 Réactions de synthèse Fischer-Tropsch	25
2-1-2-7 Amélioration des carburants de synthèse : cas du biodiesel	27
2.2 Hypothèse du modèle	28
2.2.1 Exposé sur l'équilibre du modèle	29
2.2.2 Les réactions	29
2.3 Étude de la Simulation du modèle	33
2.3.1 Organigramme	33
Conclusion partielle	33
CHAPITRE 3 :	34
RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	34
Introduction	35
3.1 Sélectivité du gaz de synthèse	35
3.1.1 Influence de la teneur en eau sur la composition du gaz de synthèse	36
3.2 Optimisation de la productivité en biodiesel	39
3.2.1 Comparaison des rendements des produits	39
3.2.1.1 Rendement en biodiesel	39
3.3 Calcul du rendement du réacteur de gazéification	42
conclusion partielle	45
IMPLICATION DANS LE SYSTÈME ÉDUCATIF	46
4.1 Fiche pédagogique	47
4.2 Intérêt didactique	47
4.2.1 Définition des concepts	47
4.2.2 Objectif de l'étude	48
4.2.3 Méthodologie	48
4.2.4 Les problèmes de cette étude	48
4.3 Rapport avec l'enseignement du secondaire	49
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE	50
BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXE	50



Figure I.1 : Coupe transversal d'un tronc de Chêne.....	8
Figure I.2 : Les trois plans de référence du bois.....	8
Figure I.3 : Structure de la cellobiose.....	9
Figure I.4 : Principaux constituants de la lignine.....	10
Figure I.5 : Le fut, le houppier et la section de l'AYOUS.....	14
Figure I.6 : Le fut, le houppier et la section du FRAKE.....	14
Figure II.1 : Différentes filières de valorisations énergétique de la biomasse.....	19
Figure II.2 : Principe d'un réacteur à contre-courant.....	21
Figure II.3 : Principe d'un réacteur à co-courant.....	22
Figure II.4 : Principe d'un réacteur à lit fluidisé.....	23
Figure II.5 : Mécanisme mis en jeu lors du processus de gazéification de la biomasse résiduelle	24
Figure II.6 : Les étapes de la purification et du conditionnement du gaz produit.....	28
Figure II.7 : Différentes étapes de production du diésel FT à partir des résidus de bois (Source : IFP)	30
Figure III.1 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 900°C (gazéifié à l'oxygène)	39
Figure III.2 : Effet de la teneur en eau dans le bois dur la composition du gaz à 800°C.....	40
Figure III.3 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifié à l'oxygène)	40
Figure III.4 : Evolution des volumes de gaz produits au cours de la réaction à différentes températures. (DUF0UR, 2007)	41
Figure III.5 : Distribution massique des produits en fonction de α	42
Figure III.6 : Schématisation du passage du gaz au liquide FT en situation expérimentale.	48



Tableau I.1 : Résidus de la forêt et scieries au Cameroun en 2006.....	7
Tableau I.2 : Composition élémentaire du bois.....	8
Tableau I.3 : Principales espèces les plus exploitées par région entre 2002 et 2005.....	13
Tableau III.1 : Récapitulatif de la composition du gaz de synthèse, la quantité de biodiésel produit à partir des différentes formes de résidus de bois	43
Tableau III.2 : Caractéristiques du gaz brut obtenu à 1073 °K et à 10% de la teneur en eau.....	45
Tableau III.3 : Concentration maximum permise des impuretés dans le syngaz	47



NOMENCLATURE

m³ : mètre cube

H : teneur en hydrogène

N : teneur en azote

Ca : calcium

K : potassium

C₅ : cinq atomes de carbones

W (%) : teneur en eau contenue dans le bois

W : watt

R : constante thermodynamique

m : quantité d'oxygène par Kmol de bois

r_p : vitesse de propagation de la chaîne

r_t : vitesse de terminaison de la chaîne

E : Énergie d'activation

C_{pm} : capacité calorifique moyenne.

K1, k2 : constantes d'équilibre thermodynamique

m_r : masse (r=s : sèche,)

a, b, c : constante des capacités calorifiques.

C : teneur en carbone

O : teneur en oxygène

MM : matière minérale

Si : silicium

C₆ : six atomes de carbone

M_s : masse bois sec

M : masse bois humide

g: gramme

NOMENCLATURE

CO₂ : dioxyde de Carbone

T : température

H₂ : dihydrogène

kW : kilowatt

CO : monoxyde de carbone

CH₄ : méthane

H₂O : eau

O₂ : dioxygène

Cal : calorie

Nm³ : mètre cube

ΔH : variation d'enthalpie

I, J : constantes d'intégrations



LISTE DES ABREVIATIONS

AIE : Agence Internationale de l'Énergie

AFEX: Ammoniac Fiber Explosion.

ASF: Anderson-Schulz-Flory

BTL: Biomass To Liquid

CEMAGREF: Centre National Du Machinisme Agricole, Du Génie Rural, Des Eaux Et Des Forêts.

CTL : Coal To Liquid

CIRAD: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

EMHV: Ether Méthylique Huile Végétale.

ETBE: Ethyl-Tertio-Buthyl-Éther.

FAO: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

FT: Fischer-Tropsch

Gtep: Giga Tonne Equivalent Pétrole

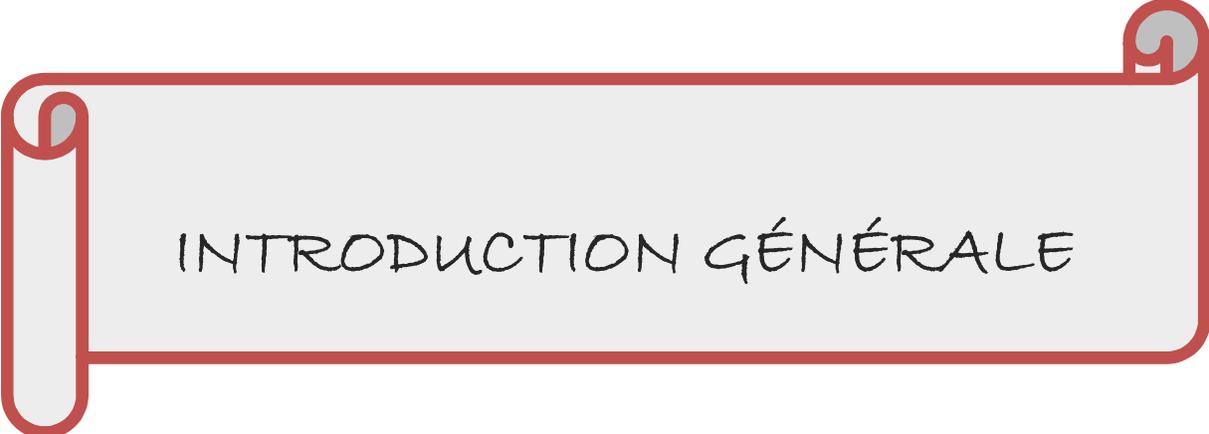
HTFT: High Temperature Fischer-Tropsch

HRGP: Hydroxyproline Rich Glyco Proteines.

IFP : Institut Française de Pétrole.

LTFT: Low Temperature Fischer-Tropsch

OCDE : Organisation de la Coopération et de Développement Economique.



INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Le Cameroun a un potentiel de biomasse lignocellulosique résiduel estimé à 4,95 millions de m³ en 2006 (Equipe Technique du GTZ, 2008). La maîtrise de la consommation énergétique fait partie des défis majeurs de notre siècle dans le contexte de développement durable. La lutte contre le réchauffement climatique dû aux émissions des gaz à effet de serre produits par les combustibles fossiles non renouvelables est causée par l'épuisement prévisible de ces ressources 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 mondiaux tout en préservant l'environnement.

Au cours de la dernière décennie, les biocarburants ont suscité un intérêt et des attentes considérables. Ceci était dû en particulier à leur potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre à travers leur contribution à la sécurité énergétique et les opportunités offertes aux producteurs agricoles à travers le monde. Ces différents objectifs ont justifié au sein de nombreux gouvernements la mise en place de politiques actives encourageant la production et l'utilisation des biocarburants. C'est ainsi qu'aujourd'hui plus qu'hier, l'approvisionnement en énergie est l'un des problèmes cruciaux dont l'humanité fait face. La diminution des ressources en énergie fossile et la prise de conscience de l'impact des émissions des gaz à effet de serre sur l'environnement qui créent la nécessité de trouver des sources d'énergie alternatives aux sources d'énergie traditionnelles est la cause de ce problème. Cependant, depuis quelques années, nous assistons au développement de plusieurs filières de production d'énergies renouvelables existant sous plusieurs formes. Nous pouvons citer entre autres, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie marine, l'énergie géothermique et la biomasse développée par la production des biocarburants sous la mise en œuvre des mesures politiques appropriées à l'échelle nationale et internationale.

Par définition, un biocarburant (forme d'énergie utilisée dans le secteur des transports) produit à partir de la matière végétale ou animale non fossile est appelé « biomasse ». Malgré sa facilité d'utilisation, la phase liquide est de loin la forme la plus utilisée, la forme gazeuse commence également à avoir passablement du succès dans le monde notamment aux États-Unis et en Europe. On distingue les biocarburants issus des substituts à l'essence (bioéthanol) et ceux issus des substituts du carburant diesel (biodiesel). À l'instar de la production du bioéthanol, la production du biodiesel soulève plusieurs enjeux de nature environnementale et socio-économique.

Cependant, il est souhaitable d'augmenter sensiblement la part des sources d'énergie renouvelables, telles que le bioéthanol et principalement le biodiesel produit à partir des résidus de bois tels que l'AYOUS et le FRAKE et bien d'autres.

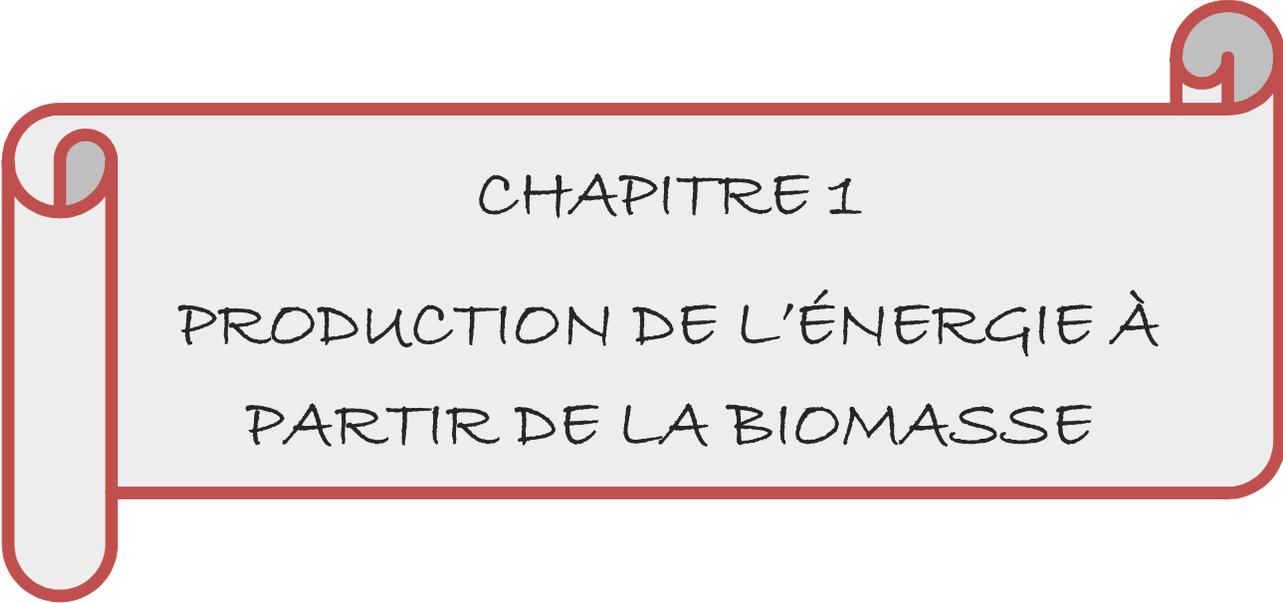
INTRODUCTION GENERALE

- Quels sont les gisements de biomasse disponibles pour la production des biocarburants de deuxième génération ?

- Quels sont les problèmes rencontrés dans la production des biocarburants de deuxième génération ?

- Quels bénéfices environnementaux peut-on attendre de la seconde génération et par conséquent quel est leur impact dans l'environnement ?

Pour apporter des réponses à ces questions posées, le présent mémoire en dehors de l'introduction et de la conclusion s'articule autour de quatre chapitres. Le premier est consacré à une étude bibliographique de la caractéristique de la biomasse résiduelle et à la généralité des biocarburants. Le second nous permet de décrire les phénomènes de gazéification d'une particule lignocellulosique à l'oxygène et les différents phénomènes de cinétique chimique observés. Ce chapitre nous impose sans doute une projection sur la quantité de biodiesel produit tout en parlant de sélectivité des produits dans le réacteur de SFT. Il s'agit également par cette partie de notre travail de procéder à la modélisation et à la simulation de l'étape de la gazéification pour ensuite estimer numériquement les proportions de différentes espèces dans le gaz naturel de synthèse en utilisant la biomasse résiduelle et pour réacteur similaire, le réacteur à lit fixe. Le troisième nous procèderons à des observations et à des interprétations des résultats établis. Enfin dans le quatrième chapitre nous présenterons la portée pédagogique de notre investigation.



CHAPITRE 1

PRODUCTION DE L'ÉNERGIE À PARTIR DE LA BIOMASSE

Introduction

Tout au long de ce mémoire, nous faisons référence à la notion de « biodiesel ». Elle renvoie directement à un biocarburant, étymologiquement constitué du mot grec « bios » faisant référence à la vie et du terme « carburant », indiquant que ce carburant est obtenu à partir de la matière organique (biomasse), par opposition aux carburants issus de ressources fossiles. Elle exprime un biocarburant propre, issu de la deuxième génération et de meilleure qualité proche du diesel fossile. Ceci obtenu à partir des réactions de synthèse Fischer-Tropsch qui est un réacteur complexe permettant de convertir le gaz de synthèse en hydrocarbures en présence d'un catalyseur (Jonsson, 2007). Cette réaction exothermique exige des conditions sur le gaz de synthèse pour une meilleure sélectivité des hydrocarbures et ainsi que la production de meilleur carburant (B.Madini, 2005 ; M.V. Ramanan, E. Lakshmanan, R. Sethumadhavan and S.Renganarayanan, 2008). Ceci nous amène à comprendre qu'une étude minutieuse de cette étape de production du gaz est très importante. Ainsi, dans le présent chapitre, nous présenterons d'abord les gisements de biomasse disponibles au Cameroun pour la production du biodiesel de deuxième génération. Ensuite nous parlerons de façon générale des biocarburants et les problèmes rencontrés dans la production des biocarburants de deuxième génération. Enfin les bénéfices et les impacts sur l'environnement seront exposés.

1.1 Généralités sur les résidus de bois au Cameroun

Le phénomène de photosynthèse qui a pour origine le soleil, crée différents matériaux énergétiquement exploitables ; c'est l'énergie de la biomasse dont les courants sont le bois, le biogaz et les biocarburants. La biomasse forestière présente une importante source d'énergie renouvelable au Cameroun. Celui-ci possède le 2e potentiel forestier dans le bassin du Congo (et en Afrique) ; inégalement réparti entre le nord et le sud du pays (Globale Village Cameroun, 1997). La biomasse de résidus de bois issu de l'exploitation forestière, composée de résidus de parcs à bois (cimes, branches, souches, racines, coursons, etc.) et de tous les résidus de la scierie (sciure, dosses, copeaux, délignures, aubier, défaut de cœur, etc.) était estimée en 2006 à 2,45 millions de m³ (Loi 98/005 du 14 Avril 1998). Contrairement aux autres ressources renouvelables, la biomasse jouit d'une disponibilité importante. Dans les milieux où les énergies éolienne, hydraulique, solaire ou géothermique sont limitées par des contraintes liées au milieu environnant, la biomasse est une alternative plus souple.

L'estimation du potentiel de ressource mobilisable est primordiale pour avoir une vision claire des possibilités de développement de la biomasse énergie. Une extension importante de l'utilisation énergétique de la biomasse peut se heurter rapidement à des problèmes de coût,

de disponibilité et de compétition avec les autres filières. Au Cameroun, la biomasse forestière est principalement constituée des résidus forestiers et des résidus de transformation de bois.

1.1.1 Sites de concentration des résidus de bois au Cameroun

1.1.1.1 Résidus obtenus lors de la coupe et du transport en forêt

Les sous-produits d'exploitation forestière constituent un gisement important de bois énergie. Ils ont trois origines : les bois éliminés lors de la création de pistes forestières, les grumes non valorisables par la filière bois œuvré à cause de défauts rédhibitoires (arbres creux, problèmes sanitaires, fentes, défauts de forme...) et les rebus de l'exploitation. Le volume de bois récupérable en forêt, dans de bonnes conditions techniques et économiques, dépend de la composition de la forêt, de la configuration du terrain et la distance de transport du bois (Equipe Technique du GTZ, 2008).

L'exploitation forestière au Cameroun utilise encore la technique de la tronçonneuse à chaîne, avec ébranchement et découpe sur place. Le débardage s'effectue avec un tracteur et une remorque équipée ou non d'un grappin jusqu'à une route carrossable, à partir de laquelle le bois est évacué par camion vers les centres de consommation. Alors que le potentiel de la cime et des branches peut être déduit du volume des grumes récoltées, il est souvent difficile d'évaluer celui des arbres défectueux et des arbustes endommagés ou abattus en même temps que le peuplement principal. On peut estimer que le Cameroun en 2006, avait une disponibilité de production de **5 millions de m³** de bois sur pied par an. Les cimes, les branches, les souches, les racines, les coursons abandonnés dans les parcs à bois représentent environ 50 % du volume sur pied ; **soit 2,5 millions de m³**. La production annuelle de la matière ligneuse est estimée avant entrée usine à **2,5 millions de m³** (Equipe Technique du GTZ, 2008).

1.1.1.2 Résidus dans les usines de première transformation

Sur une valeur estimée entrée usine de **2,5 millions de m³**, il en ressort au Cameroun en 2006 que seulement 0.748 million de m³ de bois ont été produits. Soit un rendement matière de 30 %. La quantité des résidus de première transformation peut donc être estimée à **1.752.000 m³**. Le tableau (I.1) ci-dessous résume à la fois les rémanents forestiers et les résidus issus de la première transformation.

Tableau I.1 : Résidus de la forêt et des scieries au Cameroun en 2006 (Equipe technique du GTZ, 2008)

Volume de bois sur pied disponible annuellement	5.000.000 m ³
Résidus Forêt parc (environ 14% du volume de bois sur pied)	700.000 m ³
Entrée usine	2.500.000 m ³
Bois produit	748.000 m ³
Rendement matière	30%
Résidus scierie (sciure, dosses, copeaux, délignures, aubier, défaut de cœur...)	1.752.000 m ³ (70% de déchets en scierie)
Résidus Forêt parc et scierie	2.45 million m ³

En 2006, l'activité a généré **2.45 millions m³** de résidus de bois, soit environ 1.82 million de tonnes pour une masse volumique moyenne à 12 % d'humidité de 741,1 kg/m³ (Equipe Technique du GTZ, 2008).

1.1.2 Étude descriptive du bois : un matériau hétérogène et anisotrope

Le bois est un matériau naturel et vivant. Il est caractérisé par une très forte hétérogénéité de ses propriétés d'une essence à l'autre, d'un arbre à l'autre de la même essence, et également au sein d'un même arbre. Le bois est constitué d'un ensemble de tissus cellulaires fibreux, organisés en une structure complexe résultant du mécanisme de croissance de l'arbre. Il garde les stigmates de sa période de croissance par une structure orientée, et l'agencement cellulaire apparait différemment selon qu'on l'observe dans le plan transversal, radial, ou tangentiel (**figure 1.2**). Les caractéristiques physiques et mécaniques du bois varient donc suivant ces directions, conférant au loin un caractère fortement anisotrope.

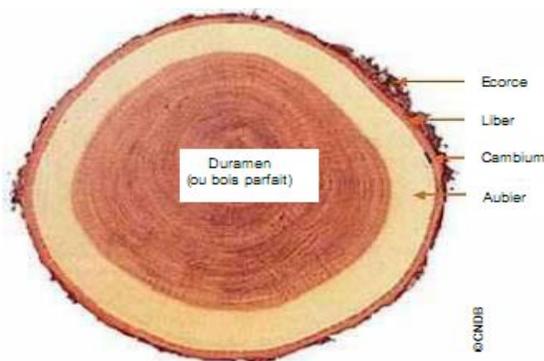


Figure I.1 : Coupe transversale d'un tronc de Chêne (Rousset).

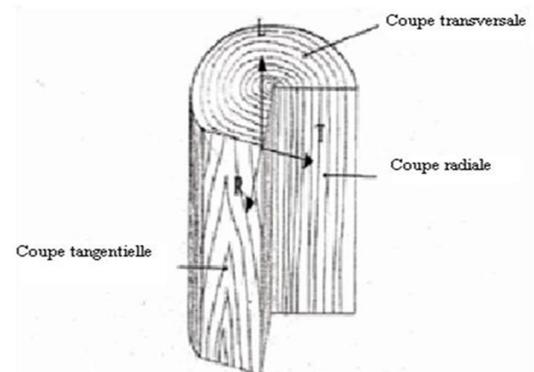


Figure I.2 : Les trois plans de référence du bois. (Rousset).

Source : CIRAD

1.1.2.1 structures du bois

ROUSSET a fait une description complète de l'anatomie d'un arbre. Le bois est essentiellement constitué : de vaisseaux conduisant la sève pour nourrir les parties vivantes de l'arbre, et de fibres ligneuses, assurant sa résistance mécanique.

La majorité des éléments présents dans un tronc sont morts. En observant la coupe d'un tronc de chêne (**figure I.1**), on distingue différentes couches successives (de l'extrémité vers l'extérieur) :

- L'écorce et le liber ont un rôle de protection imperméable pour l'arbre.
- Le cambium est une couche de cellules vivantes assurant la division cellulaire.
- L'aubier est une partie vivante de l'arbre, dans laquelle circule la sève. Il se forme sous le cambium. La croissance de l'arbre se fait par extension progressive du diamètre du tronc. Les vaisseaux qui composent l'aubier cessent peu à peu d'alimenter le cœur de l'arbre au fur et à mesure de sa croissance, transformant le cœur de l'arbre en partie « morte »
- Le bois parfait ou duramen, qui constitue le cœur du tronc, est le résultat de cette transformation. C'est la partie de l'arbre que l'on valorise lors de son abattage.

1-1-2-2 Composition chimique du bois

- composition chimique élémentaire

Le bois sec est principalement composé de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote. Il présente également un faible taux de matières minérales qui constituent les cendres. Les proportions des différents composés sont variables d'une essence à l'autre. **Le tableau I.2** rapporte des valeurs de la composition élémentaire moyenne des feuillus et résineux.

Table I.2: Composition élémentaire du bois (Energy research center of the reaction of the Netherland, 2003)

	Fraction massique sur sec (%)	
C	50,9	(± 2,0)
H	6,1	(± 0,4)
O	42,6	(± 2,6)
N	0,37	(± 0,43)
cendres	2,5	(± 4,4)

La forte teneur en oxygène du bois entraîne une diminution de son pouvoir calorifique par rapport à celui des combustibles fossiles. Le bois contient très peu d'azote et seulement des traces de soufre (au contraire des combustibles fossiles). Sa teneur en cendre est très faible en comparaison à celle des autres biomasses et des charbons minéraux : le taux de cendres des déchets agricoles s'étale entre 10 et 15 % (Energy research center of the reaction of the Netherland, 2003), celui des charbons minéraux peut atteindre 20 % (Erincin, D., Sing et al, 2005 ; Wu, Z., Sugimoto, 2003 ; Ye, D.P., Agnew 1998). La composition des cendres du bois varie également en fonction de l'essence, mais les principaux constituants restent le calcium, le potassium, le magnésium et le sodium.

- Teneur en eau ou humidité

Avant séchage, le bois peut contenir jusqu'à 50 % d'eau. Après séchage, il conserve une humidité comprise entre 10 et 20 % suivant les conditions de stockage. En effet, les propriétés hygroscopiques le rendent très sensible à la température et à l'hygrométrie ambiante.

- constituants du bois

ROUSSET a décrit précisément la structure des trois polymères principaux composant le bois. Il s'agit de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine, qui sont étroitement liées.

La cellulose, qui constitue la paroi des cellules, est le composé majeur du bois : elle représente 40 à 50 % de sa masse totale. C'est un polymère de glucose (polysaccharide) de formule générale $(C_6H_{10}O_5)_n$. Elle est formée de longue chaîne dont le degré de polymérisation peut atteindre 3000 pour le bois. La chaîne, dont le motif répétitif est la cellobiose (**figure I.3**), a une structure linéaire qui confère au bois son caractère fibreux.

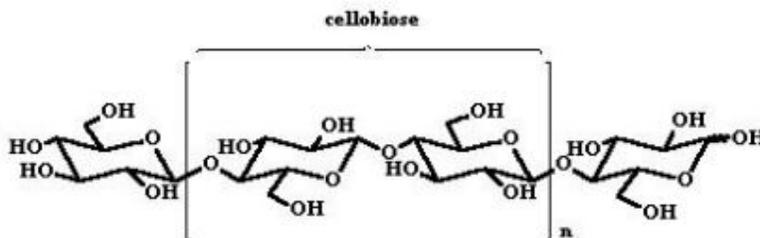


Figure I.3: Structure de la cellobiose (Energy research center of the reaction of the Netherland, 2003)

Les hémicelluloses comptent pour 15 à 25 % dans la masse totale du bois. Ce sont également des polysaccharides, mais de structure plus complexe que la cellulose. Les polymères sont formés de

différents types de monomères et leur composition est variable en fonction des espèces. Les chaînes sont moins longues que celles de la cellulose (avec un degré de polymérisation inférieur à 200), mais sont par contre davantage ramifiées. Lors de la pyrolyse, les hémicelluloses sont les premières à être dégradées : elles présentent une très forte instabilité thermique.

La lignine, qui constitue la matière rigide du bois, représente 20 à 30 % de la masse totale. Elle résulte de la polymérisation des trois alcools phénoliques (**figure I.4**) et présente une masse moléculaire élevée. La structure de la lignine est complexe et encore mal connue à ce jour, en raison de la difficulté à l'isoler des autres composés du bois sans les dégrader. C'est le composé le plus stable thermiquement.

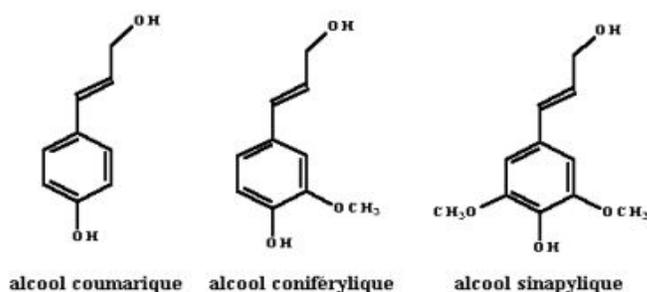


Figure I.4: Principaux constituants de la lignine (Energy research center of the reaction of the Netherland)

1.1.2.3 Propriétés physiques du bois

- pouvoir calorifique

On appelle pouvoir calorifique du bois, la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de masse de bois. Elle s'exprime en calories par gramme (cal/g).

Le pouvoir calorifique est dit pouvoir calorifique supérieur (**PCS**) quand la combustion s'effectue à volume constant et quand l'eau formée au cours de la combustion est condensée. Ces conditions sont celles des mesures à la bombe calorimétrique.

Le pouvoir calorifique est dit pouvoir calorifique inférieur (**PCI**) quand la combustion est effectuée à pression constante c'est-à-dire à l'air libre. Dans ce cas l'eau de combustion n'est pas condensée.

Le PCI se déduit par le calcul du PCS en connaissant le nombre de molécules d'eau formée et la chaleur nécessaire au passage de l'état vapeur d'eau à 100° à l'état liquide à 15°. Certains

auteurs (Garth Williamson, Murray McCurdy, 2009) donnent, pour du bois sec, la formule moyenne suivante :

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 600 \times 9\text{H} \quad (\text{I-1})$$

Où **H** est la teneur en hydrogène dans l'échantillon considéré.

Le PCI s'obtient aussi directement si on connaît la teneur des éléments constitutifs du combustible utilisé (Garth Williamson, Murray McCurdy, 2009)

$$\text{PCI} = 34,8\text{C} + 93,9\text{H} + 10,5\text{S} + 6,3\text{N} + 10,8\text{O} - 2,5\text{W} \quad (\text{en MJ/kg}) \quad (\text{I-2})$$

Avec **w** la teneur en eau.

Dans la pratique, le pouvoir calorifique d'un corps varie dans de fortes proportions suivant son degré d'humidité. La quantité de chaleur fournie diminue quand la teneur en eau du bois augmente.

- Hygrométrie et rétractabilité

Le taux d'humidité dans le bois est variable d'une espèce à une autre, des conditions climatiques et du moment d'abattage. La teneur en eau du bois est le rapport entre la masse de bois humide et la masse du bois à l'état sec, d'où l'équation suivante :

$$\text{W}(\%) = \frac{\text{M} - \text{Ms}}{\text{Ms}} * 100 \quad (\text{I-3})$$

Généralement nous avons un taux inférieur de 18 % pour les bois secs et supérieur de 30 % pour le bois vert ou ressuyé. Pour la rétractabilité, l'importance des variations dimensionnelles n'est pas la même suivant les espèces, mais variable suivant les directions considérées. Ainsi nous aurons un retrait pratiquement négligeable dans le sens de l'axe, 5 ou 6 % dans le sens radial et pouvant atteindre trois (3) fois le retrait du sens transversal et dans le sens tangentiel.

- masse volumique

La masse volumique peut varier de manière importante d'une essence à l'autre : on relève des valeurs de 50kg.m⁻³ pour un bois tendre comme le pin et de 800 kg.m⁻³ pour un bois dur comme le chêne. La masse volumique du bois dépend également beaucoup de son humidité et de sa granulométrie : pour une même essence, la masse volumique passe du simple au double selon que le bois est sous forme de sciure, de plaquette forestière ou de rondin.

- Conductivité thermique

Le bois est mauvais conducteur de chaleur à cause de sa forte porosité : sa conductivité thermique

dans le sens des fibres varie entre 0,15 et 0,30 $\text{w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ pour les essences courantes et augmente avec son humidité. La structure fibreuse du bois lui confère des propriétés fortement anisotropes : la conductivité thermique est jusqu'à 2,5 fois plus importante dans le sens des fibres que dans le sens perpendiculaire aux fibres. (Rousset)

- Densité

La connaissance de la densité du bois est très utile. Elle nous renseigne sur d'autres propriétés fondamentales, notamment sur la dureté et la résistance à la compression. Il faut distinguer entre la densité réelle ou absolue du bois (qui est la densité de la matière ligneuse) et la densité apparente de la masse du bois, qui est très variable et fonction de l'espèce de bois, des conditions du climat, de la nature du sol, et de l'exposition à la lumière des diverses parties du bois ainsi, le cœur sera plus dense que l'aubier.

I.2 Les essences de bois les plus exploitées au Cameroun : cas de deux types

La gestion des ressources forestière est une préoccupation majeure de toutes les parties qui interviennent dans la filière bois (Etude Fao Forêts n°141, 76p). La planification des activités d'exploitation par les administrations en charge des forêts est devenue incontournable (TropForm, a décision support model). L'inventaire des ressources ligneuses constitue une étape indispensable vers cette planification, en ce sens qu'il permet d'estimer le potentiel du bois sur pied.

De 2002 à 2005, ce sont 328 844 tiges présentant 175 espèces différentes qui ont été extraites des forêts camerounaises, assises sur les phases d'inventaires concernées par l'étude dans les régions du sud, du centre, du littoral et de l'est. Le nombre de tiges exploitées varie en fonction des régions ; il est de 190 946, 82 282, 29 411, 26 205 respectivement dans les régions du centre, de l'est, du littoral et du sud (CENADEFOR, 1985).

Le tableau I.2 présente le classement des principales essences en nombre décroissant de pieds abattus dans les régions étudiées. Il en ressort que les dix essences les plus exploitées diffèrent d'une région à l'autre. Il faut noter que certaines essences occupent des places de choix dans la plupart des régions. C'est notamment le cas du **Fraké**, classé parmi les essences les plus exploitées dans toutes les régions, et de **l'Ayous** qui occupe la première place dans le centre et l'est et la quatrième dans le sud.

Tableau I.3 : principales espèces les plus exploitées par région entre 2002 et 2005
(CENADEFOR, 1985)

Rang	Région			
	Centre	Est	Littoral	Sud
1	Ayous/obéché	Ayous/obéché	Azobé	Tali
2	Iroko	Sapelli	Illomba	Movingui
3	Fraké	Tali	Fraké	Azobe
4	Sapelli	Assamela	Bilinga	Ayous/obéché
5	Lotofa/nkanang	Fraké	Tali	Fraké
6	Azobé	Sipo	Eyong	Padouk rouge
7	Doussié blanc	Iroko	Iroko	Okan/adoum
8	Movingui	Lotofa/nkanang	Naga	Ekaba
9	Illomba	Kossipo	Padouk blanc	Kossipo
10	Eyong	Bosse clair	Doussié rouge	Iroko

1.2.1 L'Ayous

De par son nom scientifique *triplochiton scleroxylon* et de son nom pilote Obeche, il appartient à la famille des *sterculiaceae*. C'est un arbre imposant mesurant parfois jusqu'à 50 mètres de haut et 2 mètres de diamètre, l'ayous présente des contreforts ailés et minces. Son fut est rarement cylindrique et seules les plus belles billes sont bien conformées. Les anomalies de conformité sont particulièrement présentées juste au-dessus des empattements. Son écorce très fine de couleur grisâtre est rugueuse et très fibreuse. C'est un bois qui malheureusement est muloté en fonction de sa situation géographique. Le feuillage est dense et caduc en saison sèche avec des feuilles alternes et lobées. Les fruits sont des samares groupées par 5.

L'aspect du bois présente un aubier non différencié, le duramen est blanc crème à jaune clair. Très tendre et peu durable, il nécessite un traitement de surface pour éviter les attaques diverses. Son grain va de moyen à grossier et le bois peut parfois présenter un fil irrégulier. Sur quartier, il peut prendre un aspect rubané.



Figure 1.5 : le fut, houppier et la section de L'AYOUS (D. Schell et al. 1998)

1.2.2 Fraké

Son nom scientifique est le *Terminalia superba*, de nom pilote Limba issu de la famille des combretaceae. Le fraké est un arbre très élancé dont le fut peut atteindre plus de 30 mètres de haut. Il présente un empatement important s'élevant à plusieurs mètres de la base et de conformation triangulaire. Son fut est généralement cylindrique et son écorce très fine est grise souvent crevassée en longueur et pouvant se détacher en larges plaques. Le houppier est composé de branches maitresses étagées et d'un feuillage dense caducs en saison sèche. Ses fruits sont des petites samares qui sont regroupées en un axe commun. Leurs ailes permettent ainsi au fraké de disséminer ses graines via la force du vent.

Le fraké est un bois à aubier non différencié de couleur blanche crème pouvant devenir jaune paille et pouvant être veiné de noir en fonction de sa provenance. On retrouve du cœur mou ainsi que des piqures noires à l'origine de ses différents aspects : moiré bariolé, flammé. Le lit est généralement droit et le grain grossier.



Figure 1.6 : le fut, le houppier et la section du FRAKE (D. Schell et al. 1998)

1.3 Biocarburants de seconde génération

1.3.1 Définition

Les biocarburants de seconde génération sont ceux issus des filières qui utilisent la plante tout entière (de la racine aux feuilles), ce qui le rend moins concurrentiel vis-à-vis des produits

alimentaires. Ce sont des carburants produits à partir de la biomasse lignocellulosique, non plus par des organes de réserve des plantes, mais par la plante tout entière. Ils peuvent se trouver à l'état liquide, à l'état gazeux, et à l'état solide.

1.3.2 États de lieux sur les biocarburants de seconde génération

Le développement des biocarburants s'inscrit dans un contexte caractérisé par la conjonction de plusieurs défis majeurs : la substitution de carbone renouvelable issu de la photosynthèse au carbone fossile, non seulement pour des usages énergétiques dans le domaine des transports pour lequel on manque de dispositifs efficaces de stockage de l'énergie, mais surtout pour des usages chimiques pour lesquels il n'existe pas, sur de très longs termes, des sources alternatives à la biomasse.

Généralement, le développement des biocarburants témoigne d'un basculement d'une logique de valorisation subsidiaire de la biomasse à des fins non alimentaires, la compétition entre usages des terres, l'efficacité énergétique par unité de surface des différents systèmes de production de biomasse. De par la nature des ressources mobilisées, les biocarburants de deuxième génération concernent au premier plan les forêts.

Les opérations actuelles de production de biocarburants de deuxième génération sont encore considérées comme des opérations pilotes. À l'heure actuelle, seule l'entreprise Choren en Allemagne (Freiberg) est une usine pilote au stade préindustriel. Le développement des biocarburants de deuxième génération suscite aussi des questions systémiques à savoir :

Comprendre et évaluer leurs impacts et bilans environnementaux (sur les sols et la biodiversité, par exemple) et énergétiques pour lesquels on mobilise et raffine les méthodes d'analyse de cycle de vie.

D'analyser les changements d'usage des terres que leur production induit. Ces derniers nécessitent de prêter une grande attention aux effets éventuels de compétition entre les destinations alimentaires et non alimentaires de la biomasse aussi bien qu'à des effets plus subtils de substitution à distance (la mobilisation de terres agricoles pour une fonction particulière peut en effet induire qu'il faut assurer la production supprimée en un autre endroit, entraînant ainsi une cascade de conséquences dont la traçabilité n'est pas facile à assurer).

1.3.3 Les avantages des biocarburants de seconde génération

Proprement dit, on estime que l'exploitation des résidus forestiers permettrait de supprimer 80 à 90 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'essence. Cependant, l'expérience acquise est très faible et la transformation de ce type de matière première est plus complexe.

- La compétition limitée avec la filière alimentaire,
- le faible coût des matières premières,
- peu de coproduits et volumes de biocarburants produits plus importants
- le bilan CO₂ plus favorable.

1.3.4 Les inconvénients des biocarburants de seconde génération

En effet, alors que le monde s'indigne de la destruction du poumon de la terre, les industriels doivent réapprendre à exploiter la forêt, mais également à la cultiver. La gestion des déchets est alors une problématique à résoudre. Cela pourrait être le moyen pour l'industrie forestière de créer une source de revenue par leurs ventes, mais également de permettre le développement du biocarburant.

Bien que les biocarburants de deuxième génération offrent des avantages considérables, ils ont également quelques inconvénients à savoir :

- Le coût de production très élevé.
- Pour une consommation non contrôlée, on assisterait à une déforestation, qui contribuera au réchauffement climatique.
- Une technologie de production plus énergivore et complexe que celle de la première génération.

Comparés aux biocarburants de première génération, les biocarburants de deuxième génération présentent un bilan socio-environnemental très favorable, car les biocarburants de deuxième génération ne compétissent pas avec la filière alimentaire, qui est l'une des filières les plus importantes dans le monde, car l'alimentation des hommes restera toujours prioritaire, également ne présentent aucun inconvénient complexe à résoudre à long terme.

Conclusion partielle

Les biocarburants de deuxième génération produits à partir de la biomasse lignocellulosique et plus largement, le développement de la biomasse en tant qu'énergie renouvelable auront un potentiel plus large à des coûts de production plus faibles (J-L. Duplan). Ils apparaissent ainsi, au moins en théorie, comme une voie plus prometteuse, efficace pour diminuer la pression sur les surfaces et les prix en utilisant des technologies plus performantes permettant d'utiliser toute la plante et des ressources plus abondantes que les matières premières utilisées pour la première génération.



CHAPITRE 2 :
MODÉLISATION ET
SIMULATION DES ÉTAPES
DE PRODUCTION DU
BIODIESEL

Introduction

Dans ce chapitre, nous parlerons premièrement des différentes filières de valorisation de la biomasse ainsi que les modes de production du biodiesel. Ensuite, nous allons modéliser cette étape de la gazéification pour ensuite estimer numériquement les proportions des différentes espèces dans le syngaz en utilisant pour biomasse les résidus forestiers et pour réacteur similaire, le réacteur à lit fixe (il est préférable ici d'utiliser le réacteur à lit entraîné, car il conduit à un gaz de synthèse riche et exempt du goudron).

Enfin nous estimerons les différentes proportions des espèces dans le gaz de synthèse après purification et ensuite nous ferons une projection sur la quantité de biodiesel produit tout en parlant de la sélectivité des produits dans la réaction de SFT.

2.1 Les différentes voies de valorisation de la biomasse

Les deux principales voies actuellement explorées pour la production des biocarburants à partir de la matière première lignocellulosique sont la voie biochimique et la voie thermochimique ; la première repose sur les biotechnologies alors que la seconde recourt à des procédés thermiques comme le montre la (**figure II.1**) suivante :

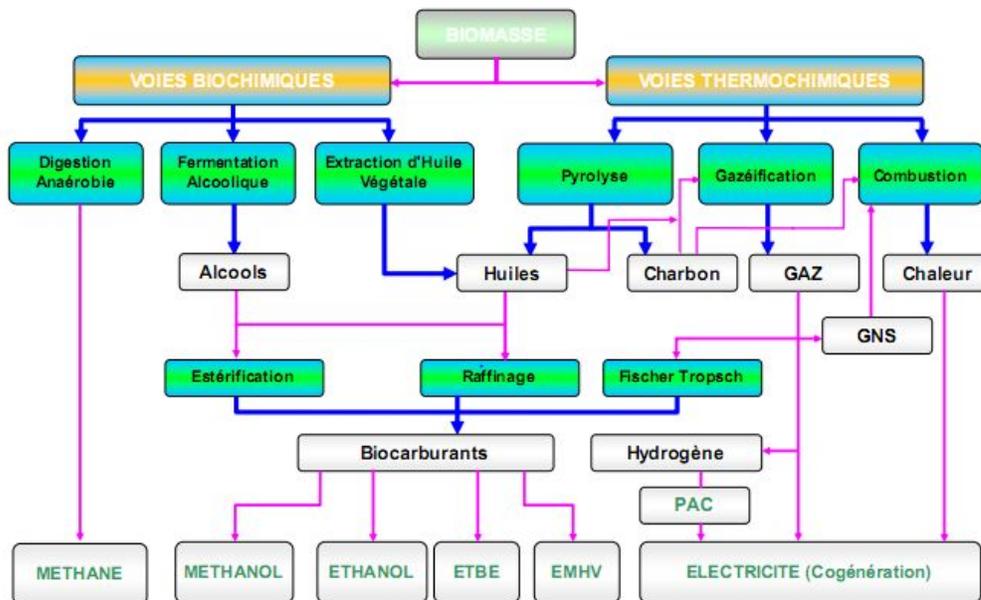


Figure II.1 : Différentes filières de valorisation énergétique de la biomasse (Bridgewater, A.V., 2003)

2.1.1 La voie biochimique

La voie biochimique utilise généralement les produits de cultures oléagineuses (palmier à huile, coprah, colza, tournesol, arachide, soja, coton), céréalières (maïs, sorgho, blé) ou sucrières (canne à sucre, betterave) et produit actuellement les biocarburants dits de première génération. Cependant, une filière de cette voie émerge aujourd'hui avec beaucoup d'espoir (éthanol cellulose) pour la production de carburant de seconde génération.

Rappelons que les biocarburants de première génération sont ceux issus des filières qui utilisent seulement une partie de la plante (huile, grains, tubercules, extraits) par ailleurs sollicitée pour l'alimentation ; en revanche, les biocarburants de seconde génération sont ceux issus des filières qui utilisent la plante tout entière (de la racine aux feuilles).

2.1.2 La voie thermochimique

Nous nous intéressons ici à la voie thermochimique et plus particulièrement au procédé de gazéification. Sans aucune ambiguïté, les biocarburants générés par ces filières thermochimiques sont ceux de seconde génération. Elle repose sur le craquage des molécules sous l'action de la chaleur des différentes conditions physico-chimiques de transformation. Dans le cadre de la production de biocarburants G2, cette voie de conversion vise à convertir la biomasse lignocellulosique en deux gaz élémentaires : le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H₂). Ce mélange gazeux nommé gaz de synthèse est obtenu par vaporeformage pour des molécules légères (par exemple, méthane et éthanol) ou par gazéification pour tout type de charge. Le gaz de synthèse est purifié et ajusté, puis utilisé pour synthétiser des carburants liquides, en particulier par synthèse de Fischer-Tropsch qui permet produire notamment des hydrocarbures (Latif FAGBEMI, 1984).

2.1.2.1 Pré-conditionnements de la biomasse lignocellulosique résiduelle

L'essence utilisée ici est la biomasse résiduelle de bois pouvant avoir une teneur en eau comprise entre 40-50 %. Avant l'introduction dans le gazéificateur, le bois est séché, torréfié et écrasé. L'utilisation de l'excès de chaleur obtenu à partir de la torréfaction et du chauffage des plantes à partir de 90°C permet de sécher la biomasse, la teneur en eau peut être alors réduite à 10 %, avec une température de torréfaction allant de 250-270°C. La quantité de volatiles dans le bois torréfié est faible comparé au bois non traité, ces volatiles sont retirés de la biomasse durant la torréfaction. Après le refroidissement du bois torréfié (maintenant à 120°C par exemple), il est introduit dans une machine à écraser ou il est écrasé en fonction de la taille souhaitée.

L'étape de pré-conditionnement a pour but d'homogénéiser la matière première, de

concentrer la matière première (augmentation de la densité énergétique) et de rendre la matière plus facilement injectable dans un réacteur.

2.1.2.2 Les différents types de réacteurs de gazéification

On peut classer les gazogènes en trois différents types suivant leur mode de fonctionnement :

- Les réacteurs à lit fixe
- Les réacteurs à lit fluidisé

2.1.2.2.1 Les réacteurs à lit fixe

Dans les procédés à lit fixe, le combustible est introduit par la partie supérieure du gazéificateur et descend par gravité dans le réacteur où les diverses réactions chimiques de gazéification ont lieu. Les cendres issues de la gazéification de la biomasse sont récupérées dans la partie basse de ces gazéificateurs. C'est ensuite le design du gazéificateur qui diffère, on peut alors distinguer les gazéificateurs à lit fixe, à contre-courant et à co-courant.

- Réacteur à lit fixe à contre-courant : « Updraft »

Les réacteurs de type « Updraft » se présentent sous la forme suivante :

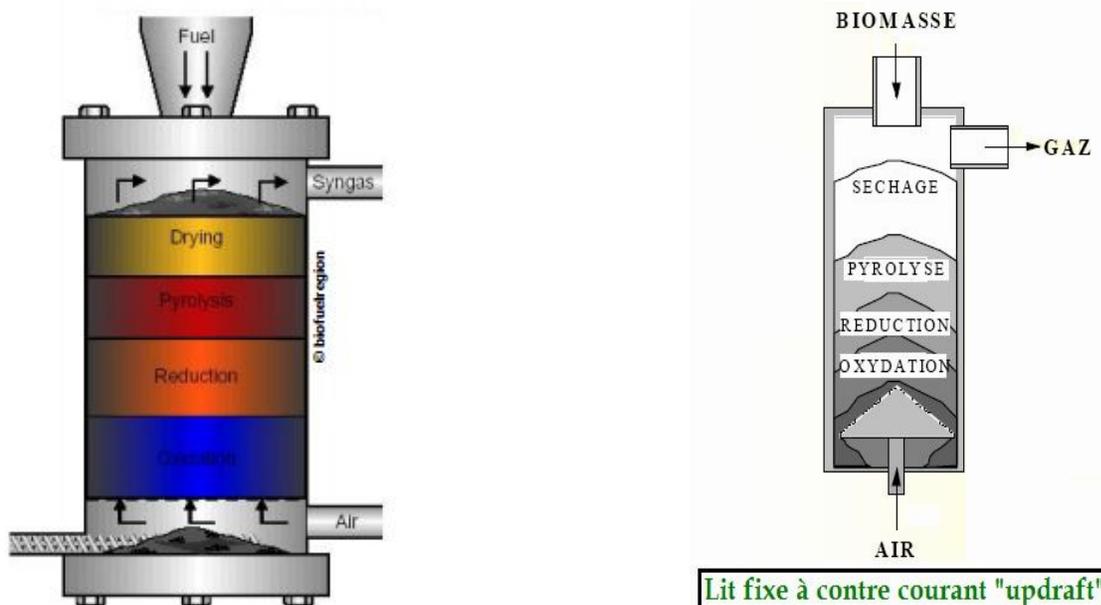


Figure II.2 : principe d'un réacteur à contre-courant (Mc Kendry, P., 2002)

Chapitre 2 : Modélisation et simulation des étapes de production du biodiésel

Les gaz synthétiques formés quittent le réacteur en partie haute du gazéificateur. Ils passent alors dans la zone de pyrolyse avant de sortir. Le syngas comporte alors un taux élevé en produits de pyrolyse, goudrons et particules, ce qui est positif du point de vue énergétique (car ces composants ont un fort pouvoir calorifique), mais plutôt négatif du point de vue sanitaire, car certains de ces produits sont cancérigènes.

- Réacteur à lit fixe à co-courant : Downdraft

Les réacteurs de type « downdraft » se présentent sous la forme suivante :

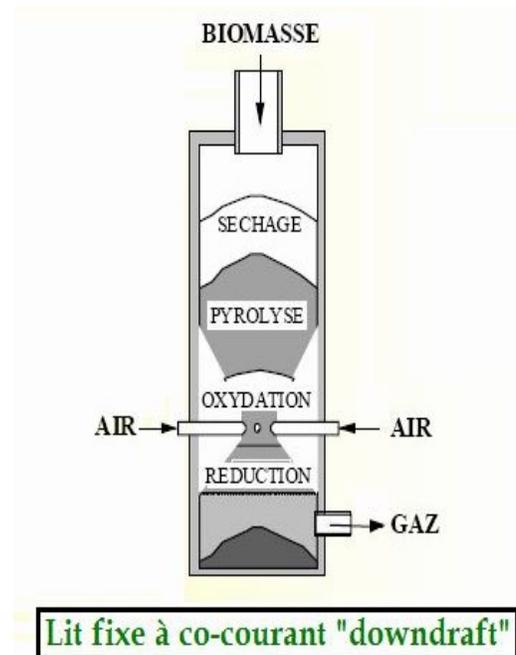
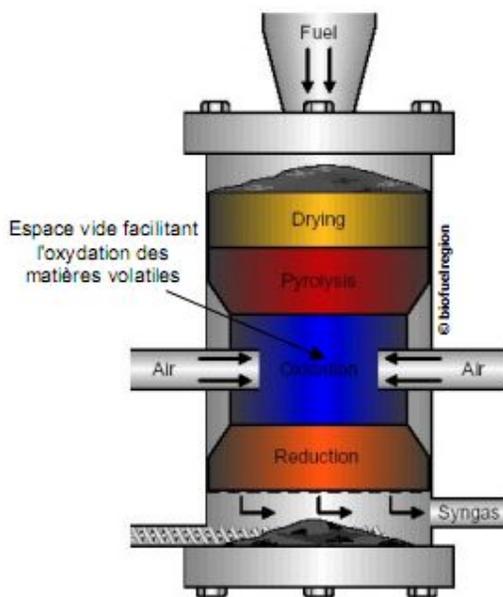


Figure II.3 : principe d'un réacteur à co-courant (Mc Kendry, P., 2002)

Le syngas formé lors de la gazéification sortira dans la partie basse du gazéificateur contrairement aux gazéificateurs de type « updraft » (où le syngas sort dans la partie haute).

Cette caractéristique permet aux composants volatils émis lors de la phase de pyrolyse de passer à travers la zone la plus chaude : des réactions chimiques ont alors lieu et les chaînes carbonées pourront alors être cassées. Le syngas sortant du gazéificateur à lit fixe à co-courant est donc plus propre qu'un gazéificateur à contre-courant, car la teneur en produits volatils de pyrolyse est diminuée. Les appareils de gazéification à lit fixe ont comme principal avantage leur facilité de construction.

2.1.2.2.2 Réacteur à lit fluidisé

Par définition, un lit fluidisé est constitué d'un ensemble de particules solides traversées par un fluide (air, eau...) ascendant, dont le débit est tel que le poids des grains est compensé par le frottement du fluide sur eux. Pour fluidiser un lit de biomasse, il faut donc avoir préalablement réduit la biomasse en taille (quelques dizaines de millimètres au maximum). Les fins copeaux de biomasse vont ensuite être préalablement séchés et introduits dans du sable afin d'augmenter les transferts de chaleur et de matière.

Les trois types de gazéificateur à lit fluidisé se distinguent par la variation du débit du fluide. On peut recenser les gazéificateurs à lit fluidisé dense, à lit fluidisé circulant et à lit fluidisé entraîné. Le schéma ci-après décrit le fonctionnement général d'un gazéificateur à lit fluidisé.

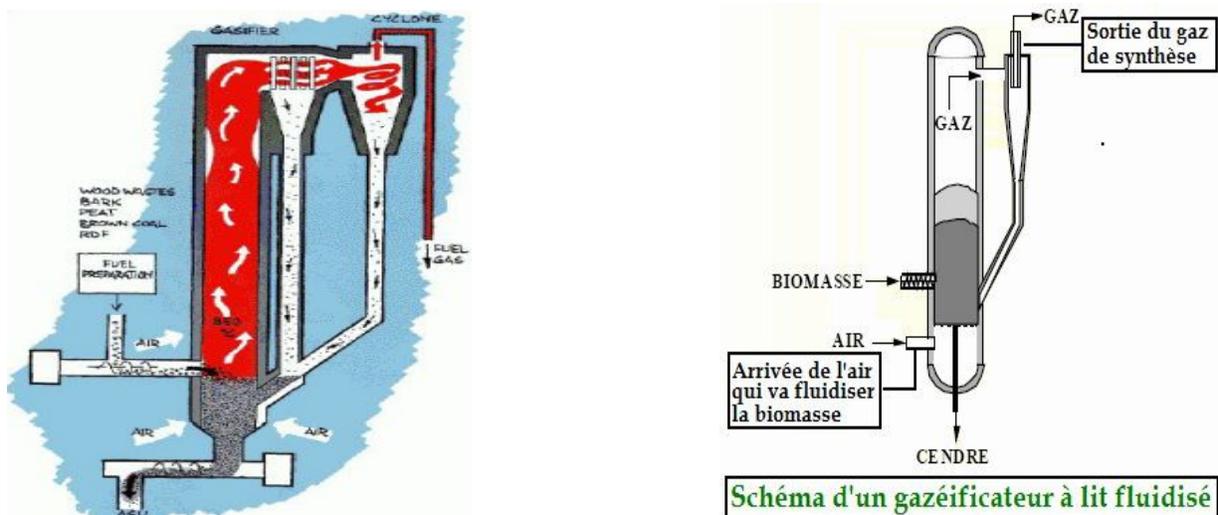


Figure 2.3 : principe d'un réacteur à lit fixe fluidisé (Mc Kendry, P., 2003)

La principale contrainte d'un gazéificateur à lit fluidisé est la réduction en taille de la biomasse avant son introduction dans l'appareil. Toutefois ce type de gazéificateur possède comme avantage de pouvoir développer des puissances assez importantes.

2.1.2.3 Les différentes étapes de la gazéification

La gazéification de la biomasse peut se s'effectuer dans divers types de procédés. Quel que soit le type de procédé, de nombreux mécanismes sont mis en jeu (**figure II.5**), à savoir : le séchage, la pyrolyse, la combustion des matières volatiles, la gazéification du charbon de bois (à l'oxygène et

à l'air), ainsi que la combustion (à l'oxygène) d'une faible partie de charbon de bois issue des résidus de bois. La gazéification est un processus qui consiste à réagir un combustible avec une très petite quantité d'oxydant (O_2 , H_2O , CO_2 ...) pour produire un gaz riche en énergie appelée gaz de synthèse constitué majoritairement du CO et du H_2 , la gazéification recouvre de multiples réactions chimiques qui ne peuvent se dérouler qu'après une étape importante : la pyrolyse, en effet, celle-ci doit être complète pour permettre les réactions entre le résidu carboné ainsi produit et les gaz libérés.

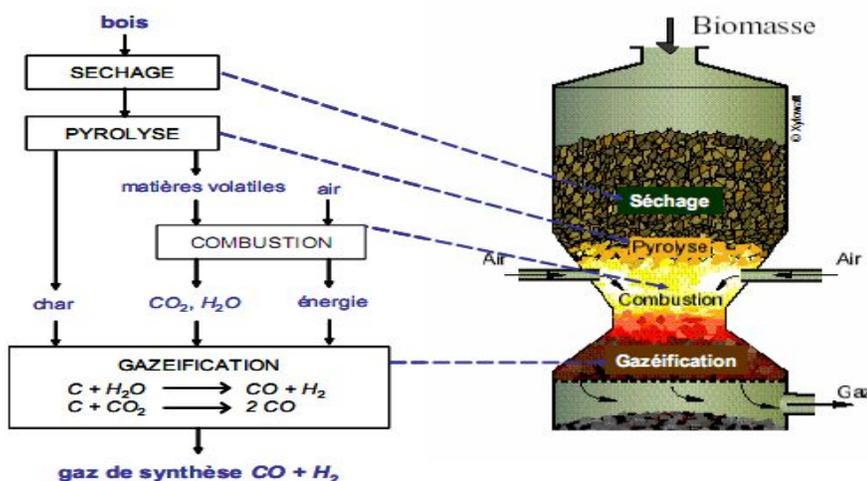


Figure II.4 : mécanisme mis en jeu lors du processus de gazéification de la biomasse résiduelle (Knoef, H.A.M., 2005)

➤ Le séchage

Avant toute transformation thermique, les résidus de bois subissent une phase de séchage durant laquelle l'humidité naturellement présente dans le bois (ou due à son stockage) est évacuée par évaporation. Cette phase endothermique se produit à une température inférieure à $200\text{ }^\circ\text{C}$.

➤ La pyrolyse

La pyrolyse signifie la décomposition thermique de la matière cellulosique en absence totale d'oxygène. Cette phase est encore appelée carbonisation ou dévolatilisation. Sous l'effet du chauffage entre 300 et $700\text{ }^\circ\text{C}$, les volatiles se forment à l'intérieur de la particule à partir de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone présents, puis sont évacués. On aboutit ainsi à une matrice fortement carbonée et très poreuse : le charbon de bois.

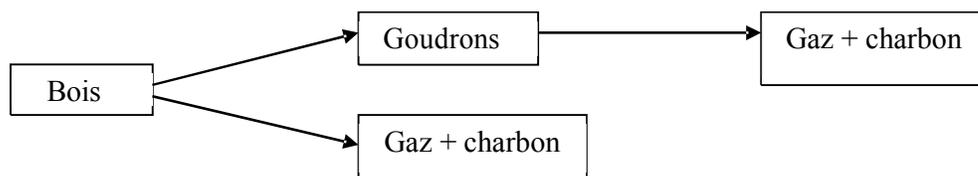
Les matières volatiles regroupent des espèces gazeuses condensables (les goudrons) et incondensables. Le processus de formation des matières volatiles est très complexe. Si on exclut l'énergie nécessaire au chauffage, cette phase peut être considérée comme globalement athermique.

Elle produit :

- ✓ un mélange gazeux (CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄...);
- ✓ un résidu carboné;
- ✓ un extrait pyroligneux ou goudron.

Les proportions des produits dépendent de nombreux facteurs, tels que la température, la nature chimique de la matière, la vitesse de chauffe, et également le temps de séjour du gaz dans le réacteur qui est un facteur aussi important, car il accentue la réaction secondaire de la pyrolyse qui est la décomposition du goudron en gaz et en charbon.

Les réactions thermiques de pyrolyse se résument par le mécanisme suivant :



- Influence de la vitesse de chauffe

La vitesse de chauffe de la matière lignocellulosique et la taille des particules (granulométrie) permettent de classer la pyrolyse en deux catégories extrêmes : pyrolyse éclair et pyrolyse lente.

Selon les travaux de (DIEBORD et al., 2003), ils ont proposé une série de constantes dont les valeurs permettent de caractériser le régime de pyrolyse : ce sont la diffusivité thermique du matériau, la conductibilité thermique, la capacité calorifique et la densité de l'échantillon. La vitesse de chauffe dans le cas d'une pyrolyse flash est de 8×10^5 fois plus élevées que pour une pyrolyse lente.

- Influence de la nature du bois

Les trois principaux constituants du bois sont : la cellulose, les hémicelluloses, et la lignine dont la teneur varie suivant la variété du bois. La proportion des matières extractibles (tannins, gomme) est de 5 % à 10 %, la composition moyenne du bois est la suivante :

- a) Bois feuillus : cellulose 43 %, hémicellulose 35 %, lignine 22 % ;
- b) Bois résineux : cellulose 43 %, hémicellulose 28 %, lignine 29 %.

Cette composition influe sur la vitesse de pyrolyse, en effet à partir des travaux de (AKITA et al), la vitesse de décomposition des hémicelluloses est la plus rapide, celles-ci sont donc les composés

les plus réactifs, par contre la lignine diminue assez considérablement la vitesse de pyrolyse. La nature du bois influe aussi sur la composition des gaz produits, du goudron et du charbon, le pouvoir calorifique de la biomasse est en effet lié à sa composition élémentaire (teneur en carbone, azote, oxygène, soufre, hydrogène).

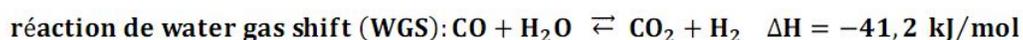
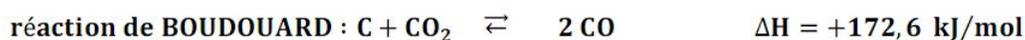
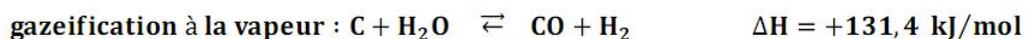
- Influence de la température

Une pyrolyse commence aux environs de 200 °C et est complète à 500 °C. La température est le facteur qui contrôle la cinétique de la pyrolyse (Razvan VIJEU 2010). La température est aussi un facteur important dans la composition de produits de pyrolyse. Une augmentation de température provoque une augmentation du volume des gaz, une diminution des goudrons et du résidu carboné.

➤ La réaction de gazéification (à l'oxygène et à l'air)

Cette phase est couramment appelée réduction du char par abus de langage. Elle se produit à haute température (800-1200 °C) sous l'effet de gaz oxydants, qui sont en général la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le dioxygène et l'air contenus dans les fumées de combustion des matières volatiles. Cette réaction endothermique nécessite un apport supplémentaire de chaleur pour maintenir la température suffisante. Celui-ci est en général fourni par un excès d'air permettant la combustion d'une partie du carbone du charbon de bois. La gazéification du charbon de bois produit un gaz combustible essentiellement formé d'hydrogène et monoxyde de carbone, dans des proportions variables.

La gazéification est le prolongement de la pyrolyse, la zone de gazéification est le siège de multiples réactions entre le résidu carboné et les gaz libérés par la pyrolyse et l'agent gazéifiant. Les principales réactions sont :



Les réactions de Boudaoud et de la gazéification à l'eau sont des réactions de réduction

endothermiques. L'énergie nécessaire à ces réactions est généralement fournie par la combustion d'une partie du résidu carboné ou du gaz. Seulement quatre de ces réactions sont indépendantes : l'oxydation, gazéification à la vapeur, la réaction de Boudaoud et de méthanisation. La réaction de water gas shift peut être considérée comme une substitution de la réaction de gazéification à la vapeur et de la réaction de Boudaoud. Selon (Elliot et al.) la réaction d'oxydation est typiquement supposée être très rapide et complète.

2-1-2-4 Prévisions des concentrations des gaz de synthèse

L'évaluation théorique des concentrations des gaz produits par un processus de gazéification est importante. En effet, elle permet la connaissance a priori du rendement énergétique de l'opération, la méthode classique utilisée dans cette approche est proposée par GUMZ (J-L. Duplan).

Ce modèle est basé sur trois concepts :

- L'équation traduisant la conservation de masse des composés élémentaires de la biomasse ;
- Un bilan énergétique supposant un fonctionnement adiabatique du système ;
- L'hypothèse des équilibres thermodynamiques des réactions de gazéification.

Ces principales hypothèses aboutissent à un système d'équations non linéaires. La résolution de ce système permet d'évaluer les concentrations des gaz produits (CO, CO₂, H₂, CH₄ et autres), la quantité de biomasses et de l'agent gazéifiant par unité de volume du gaz. Ces grandeurs sont donc calculées en fonction de la composition élémentaire du combustible, de la température et de la pression du réacteur. Ainsi, on peut donc théoriquement calculer la composition des gaz à partir des équilibres thermodynamiques des réactions de gazéification. Cependant, pour de nombreux réacteurs, les conditions de l'équilibre ne sont pas atteintes.

2-1-2-5 Déroulements de la purification du gaz de synthèse

En réalité le gaz obtenu après gazéification contient une quantité importante de contaminants tels que les particules de matière, les goudrons, l'azote, le soufre. Qu'on doit extraire pour respecter les spécifications du syngaz pour la réaction de synthèse Fischer-Tropsch. Cette étape de nettoyage du gaz de synthèse nécessite des dispositifs tels que :

- Le filtre cyclonique ;
- Les barrières de filtres (retrait des particules de 0.5 à 100um de diamètre) les filtres électrostatiques,

- Un échangeur de chaleur ;
- Les compresseurs
- Un nettoyeur complet à base de l'eau, ZnO et, etc. ;

La purification à haute pression est utilisée pour réduire les besoins des compresseurs et égaler la pression du gazéificateur et le réacteur FT. L'étape de purification consiste à séparer le gaz de synthèse dans un cyclone des éventuelles particules de cendre, et ensuite la passe dans un condenseur immergé dans la glace ou il est refroidit permettant d'éliminer la vapeur d'eau et les éventuels goudrons du gaz de synthèse, le goudron est également retiré par un craquage catalytique à une température de 800-900°C à partir d'un processus de reformage à vapeur pour produire le CO et le H₂ permettant augmenter le pouvoir calorifique du syngaz, ensuite ce gaz passe dans une zone où s'effectue la réaction de WGS permettant d'améliorer le rapport H₂/CO. Les autres impuretés telles que le soufre, l'azote et les halogènes agissant comme des poisons des catalyseurs et pouvant causé la désactivation prématurée et l'échec du catalyseur sont également retirées dans un nettoyeur de gaz. Cette étape de purification prépare le gaz de synthèse pour la réaction de synthèse FT. Comme nous le montre précisément à l'étape 2 de la figure II.6 suivante :

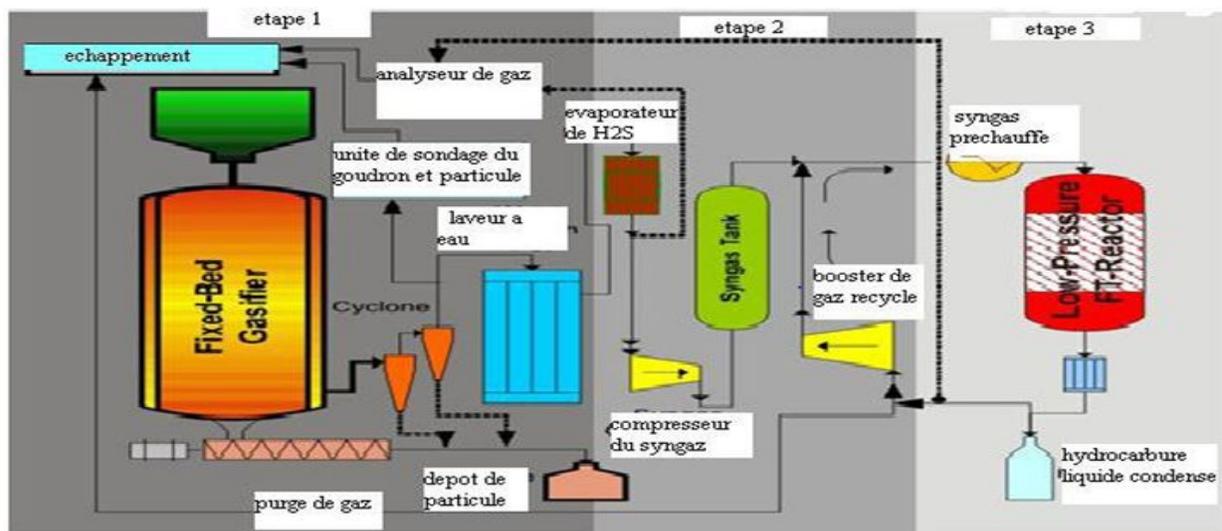
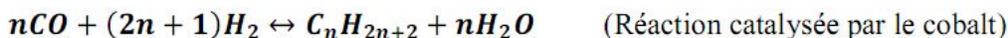


Figure II.5 : Les étapes de la purification et du conditionnement du gaz produit (Latif FAGBEMI, 1984)

2-1-2-6 Réactions de synthèse Fischer-Tropsch

La synthèse Fischer-Tropsch permet d'obtenir à partir d'un gaz de synthèse constitué majoritairement d'un mélange de CO et H₂ différents produits tels que les hydrocarbures (majoritairement paraffines et oléfines), les alcools et de l'eau. Son intérêt est de produire des hydrocarbures à longues chaînes, sources d'un gazole propre sans produits aromatiques et sans

soufre, les hydrocarbures à longues chaînes sont obtenus suivant la réaction :



Cette synthèse constitue un enjeu économique important à l'heure actuelle surtout en présence des fluctuations importantes du prix du pétrole, car elle apparaît comme l'un des moyens de valoriser la biomasse lignocellulosique, le gaz naturel et le gaz associé au pétrole, sur les gisements pétroliers. De plus, elle permet une valorisation du gaz associé qui se situe loin des zones d'exploitation et contribue à la diminution de la pollution atmosphérique due au dégagement de CO₂ en constituant une alternative au torchage.

La réaction de SFT implique l'hydrogénation catalytique du CO sur les sites métalliques localisés à l'intérieur de la porosité du support, et ce en présence d'un film d'hydrocarbures liquides dans les conditions réactionnelles. La vitesse de la réaction ainsi que la sélectivité des produits obtenus sont en général contrôlées par la faible vitesse d'approvisionnement des réactifs ainsi que la faible vitesse d'extraction des produits.

En général, la réaction de synthèse Fischer-Tropsch peut être réalisée à basse (LTFT) ou haute (HTFT) température en fonction des produits de réaction désirés.

➤ Synthèse de FT à basse température (LTFT)

La réaction de synthèse LTFT est la plus adaptée à la production des hydrocarbures à longue chaîne et favorise donc la production de coupes liquides et solides par rapport aux coupes gazeuses, il existe plusieurs avantages à l'utilisation de la synthèse LTFT. Les hydrocarbures linéaires constituant la coupe diesel (obtenue à partir de transformations des produits issus de la synthèse FT) ont un indice de cétane proche de 75 (l'indice de cétane des diesels est généralement compris entre 40 et 50) (M.V. Ramanan et al, 2008) et moins de produits aromatiques par rapport à la convention US (2 % produits aromatiques au lieu de 32 %) (M.V. Ramanan et al, 2008). La coupe naphta formée pendant la réaction LTFT ne contient pas de produits aromatiques et la formation d'alcane linéaires est importante.

La température de réaction dépend fortement de la formulation du catalyseur utilisé (Co ou Fe), mais elle est toujours inférieure à 260 °C afin d'éviter la formation du CH₄, CO₂ et maximiser la sélectivité vers les hydrocarbures à longue chaîne (notamment en évitant le craquage des

hydrocarbures liquides) (M.V. Ramanan et al, 2008). Le réacteur le plus employé pour la synthèse LTFT est le réacteur multitubulaire fonctionnant en mode « lit fixe » (TFBR = Tubulaire Fixed Bed Reactors).

➤ Synthèse de FT à haute température (HTFT)

Les produits de la synthèse FT à haute température (HTFT) sont plus légers et contiennent un nombre plus important de molécules branchées par rapport à ceux obtenus à basse température. Ce phénomène peut être attribué à une existence de réactions secondaires plus importantes sur la surface du catalyseur avec une insertion du CH_x sur les carbones non-terminaux. Ceci peut être également favorisé par une plus faible énergie d'adsorption du CO sur la surface du catalyseur à cause de la température de réaction plus élevée. La température idéale pour cette synthèse est comprise entre 250 °C et 350 °C, l'indice de cétane est de 55 dans cette synthèse, la quantité d'alcènes formée (surtout des C₃-C₅) est relativement importante (70 % au total). Les oxygénés, alcools, aldéhydes, cétones, aromatiques et acides sont les produits secondaires formés à haute température, leur pourcentage augmente avec la température (Bridgewater, A.V., 2003) , comme la majorité des produits sont des hydrocarbures légers, cette méthode de synthèse serait intéressante pour la production d'essence.

2-1-2-7 Amélioration des carburants de synthèse : cas du biodiesel

Le rang des hydrocarbures produits à partir de la réaction de synthèse FISCHER-TROPSCH. Il est largement reparti et alors amélioré pour contenir plus la partie importante désirée. Le modèle simplifié de craquage est utilisé ou toutes les chaînes de cire sont réduites jusqu'à ce que plus rien ne reste. Isomérisation, la distillation fractionnée et hydrocraquage sont combiné pour créer une bonne qualité de biodiesel, puisque nous voulons que le produit final ressorte la partie du diesel sur le spectre des hydrocarbures.

La figure (II.8) montre les différentes étapes de production du diesel FT à partir des résidus de bois par la voie thermochimique indirecte.

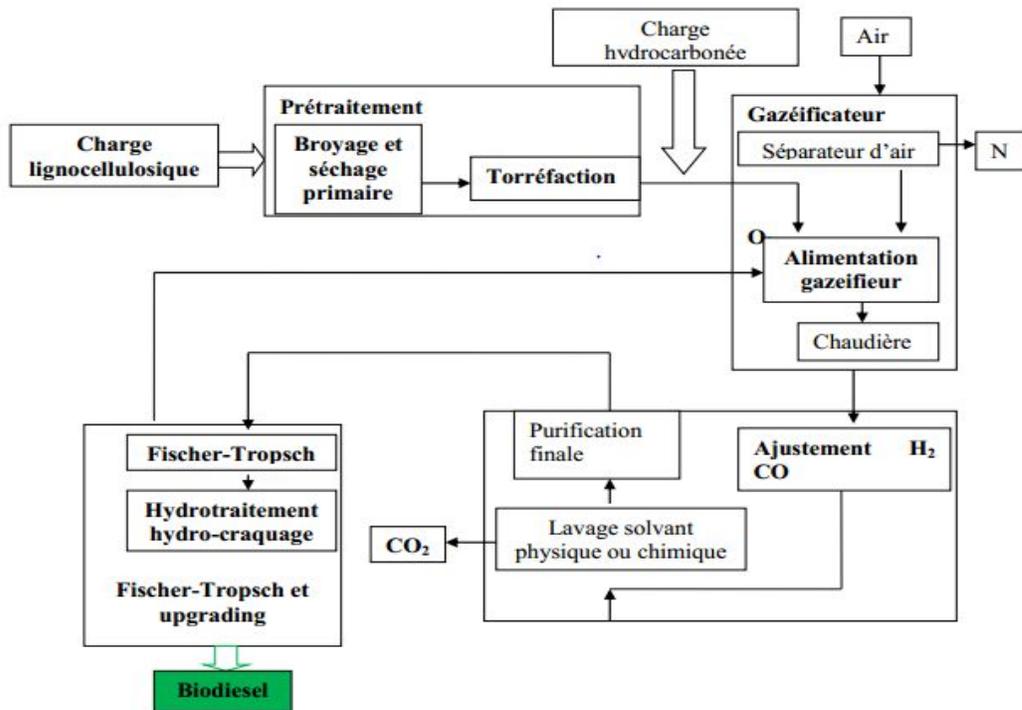


Figure II.6: différentes étapes de production du diesel FT à partir des résidus de bois. (Source : IFP)

2.2 Hypothèse du modèle

La formule chimique typique des résidus forestiers secs obtenue à partir du tableau (III.1) et basée sur un seul atome de carbone est donnée par : $\text{CH}_{1.407}\text{O}_{0.605}\text{N}_{0.008}$. Et l'équilibre de la modélisation est ressorti sur ces formules de base pour la prédiction des caractéristiques de gazéification.

Les suppositions suivantes sont faites dans l'approche de la modélisation (M. Venkata Ramanan et al ,2008) :

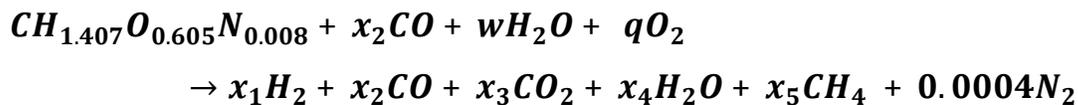
- Les lois de gaz idéal sont validées
- Toutes les réactions sont en équilibre thermodynamique.
- Les gaz sont en équilibre durant l'écoulement à travers le lit de charbon.
- La pression dans le lit de charbon est atmosphérique et constante.
- Les réactions procèdent de façon adiabatique.
- L'azote présent soit dans le combustible, soit dans l'air est inerte.
- La cendre est inerte et n'est impliquée dans aucune réaction, ni comme une espèce chimique

ou comme un catalyseur.

- Pas de gradient de température radiale.
- Aucun gaz n'est accumulé dans le lit de charbon.
- Il n'y a pas une résistance de conduction de chaleur et de diffusion de masse à l'intérieur des particules de charbon.
- Il n'y a pas de goudron dans la zone de gazéification
- Efficacité de conversion du carbone est de 100 %.
- Le gaz produit comprend uniquement le CO₂, CO, H₂, CH₄, H₂O, N₂.

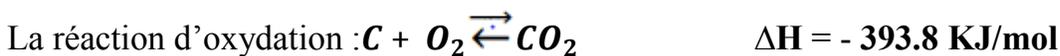
2.2.1 Exposé sur l'équilibre du modèle

Basée sur les suppositions précédentes, l'équation de la réaction globale de résidus forestiers secs avec l'oxygène peut s'écrire comme :



2.2.2 Les réactions

La réaction globale ci-dessus représente l'ensemble des réactions, mais le nombre de compétitions intermédiaire prend place durant le processus, les réactions suivantes sont prédominantes.



La réaction de gazéification à la vapeur :



La réaction de BOUDOUARD :



La réaction de méthanisation



La réaction de water gas shift (wgs):



Les réactions de Boudouard, gazéification à la vapeur et la méthanisation sont en équilibre. Comme observation la réaction de water gas shift est une combinaison de la réaction de Boudouard et de la réaction de gazéification à la vapeur d'où la réaction de WGS et la réaction de méthanisation peuvent être considérées comme étant en équilibre. Les constantes d'équilibre pour la réaction de méthanisation et de WGS sont respectivement :

$$K_1 = \frac{[P_{CH_4}]}{[P_{H_2}]^2} ; K_2 = \frac{[P_{CO_2}][P_{H_2}]}{[P_{CO}][P_{H_2O}]} \quad (\text{II.1})$$

Dans la réaction globale il y a six inconnus x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 et m donc les « x_i » représentent la composition molaire dans le gaz produit et « m » la teneur en oxygène pour la réaction. D'où pour prédire les constituants du gaz produit, l'ensemble des six équations formulées par l'équilibre de différents constituants impliqués sont à évaluer :

- Équilibrage du carbone :

$$1 = x_2 + x_3 + x_5 \quad (\text{II.2})$$

- Équilibrage de l'hydrogène :

$$1.407 + 2w = 2x_1 + 2x_4 + 4x_5 \quad (\text{II.3})$$

- Équilibrage de l'oxygène :

$$0.605 + w + 2q = x_2 + 2x_3 + x_4 \quad (\text{II.4})$$

- Constante d'équilibre à partir de la méthanisation :

$$K_1 = \frac{x_5}{x_1} \quad (\text{II.5})$$

Constante d'équilibre à partir de la méthanisation :

$$K_2 = \frac{x_3 \times x_1}{x_2 \times x_4} \quad (\text{II.6})$$

La teneur en eau dans la biomasse est donnée par :

$$t_e = 100 \times \frac{18w}{(n \times M_{rb} + 18w)}$$

Quand la teneur en eau est connue, la valeur de w est une constante. Le processus de la réaction étant supposé adiabatique, l'équilibre de chaleur des réactifs et des produits de la réaction globale se résume dans l'équation suivante :

➤ À l'oxygène :

$$\begin{aligned}
 H_{f_{rb}}^0 + w \left(H_{f_{H_2O_l}}^0 + H_{f_{H_2O_v}}^0 \right) + q \times H_{f_{O_2}}^0 \\
 = x_1 \times H_{f_{H_2}}^0 + x_2 \times H_{f_{CO}}^0 + x_3 \times H_{f_{CO_2}}^0 + x_4 \times H_{f_{H_2O}}^0 + x_5 \\
 \times H_{f_{CH_4}}^0 + \Delta T (x_1 \times C_{p_{H_2}} + x_2 \times C_{p_{CO}} + x_3 \times C_{p_{CO_2}}) + \Delta T (x_4 \\
 \times C_{p_{H_2O}} + x_5 \times C_{p_{CH_4}} + 0.004 \\
 \times C_{p_{N_2}}) \quad (II.7)
 \end{aligned}$$

La valeur de l'enthalpie du combustible est déterminée expérimentalement avec une bombe calorimétrique. La chaleur de formation des différents gaz peut être donnée à partir des tables thermochimiques de JANAF (M. Venkata Ramanan et al., 2008) et la variation d'enthalpie pour la constitution du gaz est représentée dans le tableau III.2, la dépendance de la chaleur spécifique sur la température est donnée par différentes équations empiriques donc la version la plus simplifiée (Robert et al.) est :

$$C_{pm} = R \times \left[a + b \times T_m + c \times (4 \times T_m^2 + T_i \times T) + \frac{d}{T_i \times T} \right] \quad (II.8)$$

Les valeurs de la constante de la capacité calorifique pour notre étude sont données dans le tableau (III.3). (Zainal et al, 2001) montrent que la constante d'équilibre k est une fonction de la température et peut être exprimée comme :

$$RT \ln k = \Delta G^0 ; \quad \frac{d \ln k}{dT} = \frac{\Delta H^0}{RT^2} \quad (II.9)$$

Les valeurs standard de formation des fonctions de Gibbs pour différente composition de gaz impliquée sont représentées dans le tableau (III.2). La chaleur de formation est explicitement une fonction de la température et d'où on peut écrire :

$$\ln k = \int \frac{\Delta H^0}{RT^2} \times dT + I \quad (II.10)$$

Selon (Robert et al 1984) $\frac{\Delta H^0}{R}$ Peut également être égalé comme ci-dessous :

$$\frac{\Delta H^0}{R} = \frac{J}{R} + \Delta a T + \Delta b \frac{T^2}{2} + \Delta c \frac{T^3}{3} - \frac{\Delta d}{T} \quad (\text{II.11})$$

En substituant cette équation dans l'équation précédente, on trouve :

$$\ln k = \frac{-J}{RT} + \Delta a \ln T + \frac{\Delta b T}{2} + \frac{\Delta c T^2}{6} + \frac{\Delta d}{2T^2} + I \quad (\text{II.12})$$

La dépendance de ΔG^0 sur la température peut être analysée comme ci-dessous :

$$\Delta G^0 = J - R \times T \left(\Delta a \ln T + \Delta b \frac{T}{2} + \Delta c \frac{T^2}{6} + \frac{\Delta d}{2T^2} + I \right) \quad (\text{II.13})$$

Les valeurs de I et J sont respectivement calculées à partir de l'équation intégrale précédente et de la dernière équation à la température de 298 °K. Deux équations d'équilibre sont requises pour déterminer les constantes d'équilibre et permettent d'évaluer les valeurs Δa , Δb , Δc et Δd suivant les équations ci-dessous :

Pour le cas de la réaction 2, WGS

$$\Delta a = a_{H_2} + a_{CO_2} - a_{H_2O} - a_{CO}$$

$$\Delta b = b_{H_2} + b_{CO_2} - b_{H_2O} - b_{CO}$$

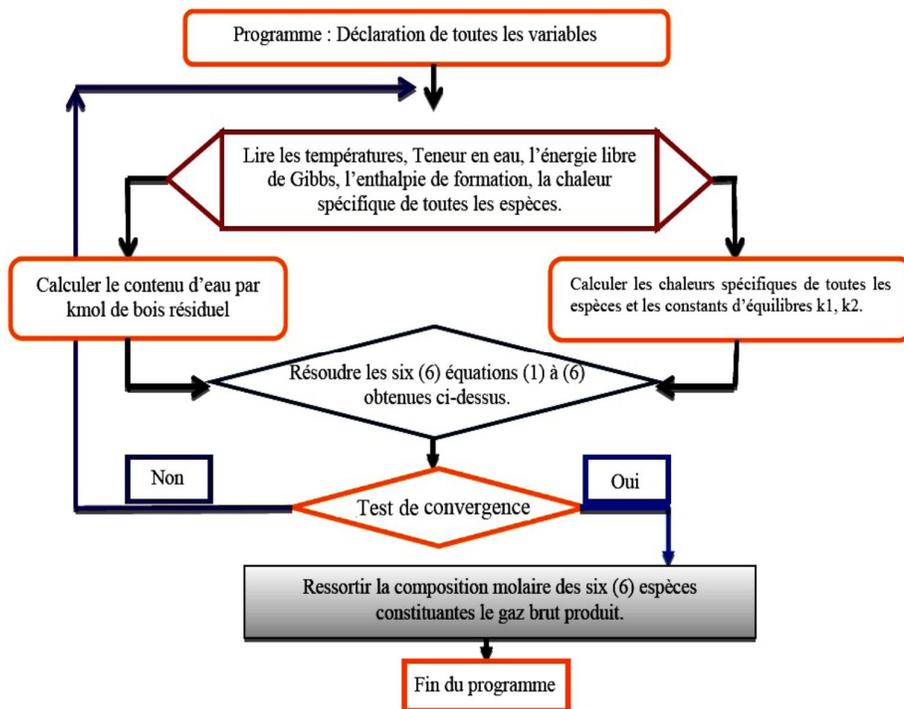
$$\Delta c = c_{H_2} + c_{CO_2} - c_{H_2O} - c_{CO}$$

$$\Delta d = d_{H_2} + d_{CO_2} - d_{H_2O} - d_{CO}$$

L'application de ces équations relève la constante d'équilibre K_2 . Similairement K_1 peut être obtenue en adoptant la même procédure. La concentration molaire des espèces peut être prédite en utilisant K_1, K_2 et en résolvant les six premières équations. La figure (III.1) présente l'organigramme du programme écrit en fortran 90, et nous renseigne en détail sur la procédure de calcul pour le modèle d'équilibre thermodynamique de la réaction de gazéification des résidus forestiers.

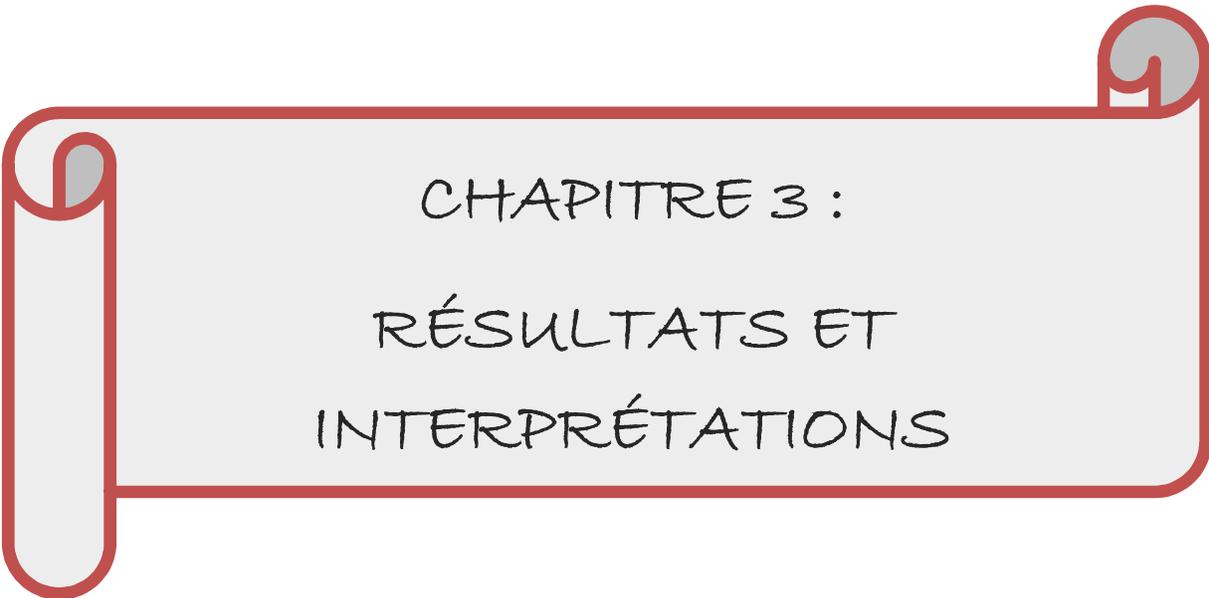
2.3 Étude de la Simulation du modèle

2.3.1 Organigramme



Conclusion partielle

Nous venons de montrer la simulation de la gazéification de la biomasse lignocellulosique qui nous a permis de comprendre le principe même de cette technologie, de montrer les différents facteurs qui influencent cette gazéification. L'étape de production du gaz de synthèse est l'étape la plus déterminante dans la synthèse du BTL, car elle permet de produire ce gaz pour la réalisation de la synthèse FT. En effet ce gaz produit par le réacteur de gazéification possède des impuretés qui peuvent être des poisons pour les catalyseurs, d'où une étape de purification est nécessaire. Cette étape permet de conditionner le gaz pour respecter les spécifications de la SFT. Pendant la réaction de SFT, en fonction de la température, de la pression dans le réacteur et du catalyseur utilisé (cobalt), on obtient plusieurs types de produits constitués majoritairement des hydrocarbures lourds saturés et une grande quantité de chaleur qui suite à une amélioration (upgrading), on peut obtenir le produit désiré principalement le biodiesel de très bonne qualité.



CHAPITRE 3 :
RÉSULTATS ET
INTERPRÉTATIONS

Introduction

Le biodiesel de deuxième génération est un biocarburant propre et de meilleure qualité proche au diesel fossile. Obtenu à partir de la réaction de synthèse Fischer-Tropsch qui est une réaction complexe, permettant de convertir le gaz de synthèse en hydrocarbures en présence d'un catalyseur. Cette réaction exothermique exige des conditions sur le gaz de synthèse tel que le rapport $H_2/CO = 2$ utilisant pour catalyseur le cobalt à une faible température FT (CO-LTFT), ou le rapport $H_2/CO \geq (0.5 \text{ ou } 1)$ utilisant pour catalyseur le fer à faible température Fischer-Tropsch et en favorisant la réaction de WGS (Fe-LTFT (in-situ WGS)), la proportion des gaz inertes (N_2 , CO_2 , CH_4) doit être préférablement inférieure de 10-15%, le soufre également doit être très inférieur à 1 ppm, et également pas de chlorure (Cl), de brome (Br) ni de métaux lourds (Ar, Hg) dans le gaz de synthèse et la pression doit être comprise entre 20-60 bars pour une meilleure sélectivité des hydrocarbures et ainsi que la production de meilleur carburant (Behrang MADANI,2005). Ceci nous amenant à comprendre qu'une étude minutieuse de cette étape de production du gaz est importante. Ainsi, dans cette partie nous ferons des observations et des interprétations des résultats.

Dans ce présent chapitre, nous allons exposer les différents résultats des principales étapes de productivité du biodiesel de deuxième génération par voie thermochimique (pyrolyse, liquéfaction directe et gazéification), tout en tenant compte de la sélectivité et l'optimisation du gaz de synthèse, à partir des résidus de bois. Les hypothèses de prétraitement de la biomasse lignocellulosique se sont réalisées sans perte de matière sèche. Les solutions obtenues par le programme nous permettent de tracer (avec Excel) les courbes.

3.1 Sélectivité du gaz de synthèse

Afin de mettre en évidence le caractère sélectif dans la composition des différents gaz obtenus, nous nous sommes appesanties sur deux propriétés importantes de la biomasse :

- La teneur en eau
- La température

3.1.1 Influence de la teneur en eau sur la composition du gaz de synthèse

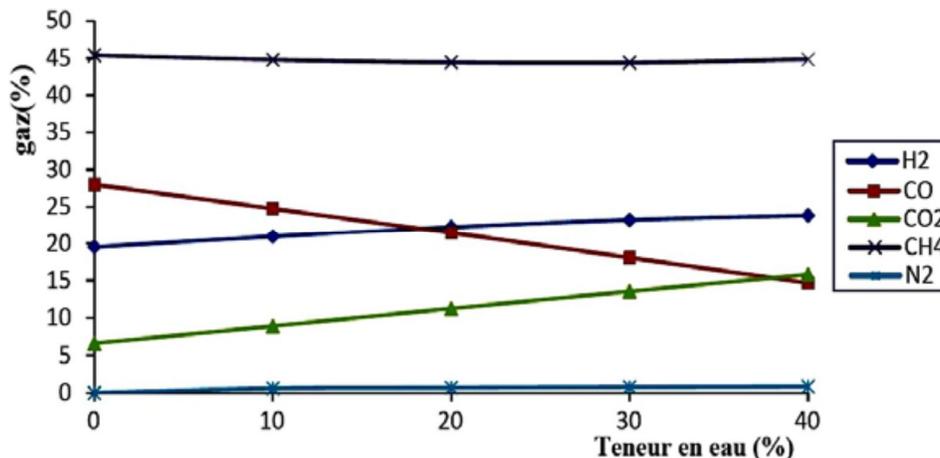


Figure III.1: Pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 900 °C (gazéifiée à l'oxygène)

Le modèle d'équilibre décrit ci-dessus est utilisé pour la gazéification des résidus de bois, les résultats obtenus par la gazéification à l'oxygène sont présentés dans la figure (III.1) ci-dessus. Elle présente l'effet de la teneur en eau dans le bois sur la composition du gaz brut produit quand le lit fonctionne à 800^o C. À partir de celle-ci nous pouvons remarquer que la composition de l'azote inerte est presque constante avec la teneur en eau, comme espérée. La proportion du méthane produit est presque constante à un très faible pourcentage, le pourcentage du dihydrogène dans le gaz brut augmente presque continuellement avec la teneur en eau. La tendance similaire est aussi observée pour le dioxyde de carbone.

Cependant l'augmentation est à partir de 6-16 %, il est intéressant de noter que le pourcentage du monoxyde de carbone diminue à partir de 27-14 % pour la même variation de la teneur en eau due à l'augmentation du dioxyde de carbone.

Pour la gazéification à l'oxygène en fonction de la teneur en eau le gaz n'est plus dilué du diazote et on observe presque le même phénomène à la seule différence que les proportions de H₂, CO, CH₄ sont importante

(Zainal *et al*, 2001) ont utilisé un autre type de bois et ont obtenu les variations des compositions des espèces (dans le gaz brut produit) en fonction de la teneur en eau comme suit:

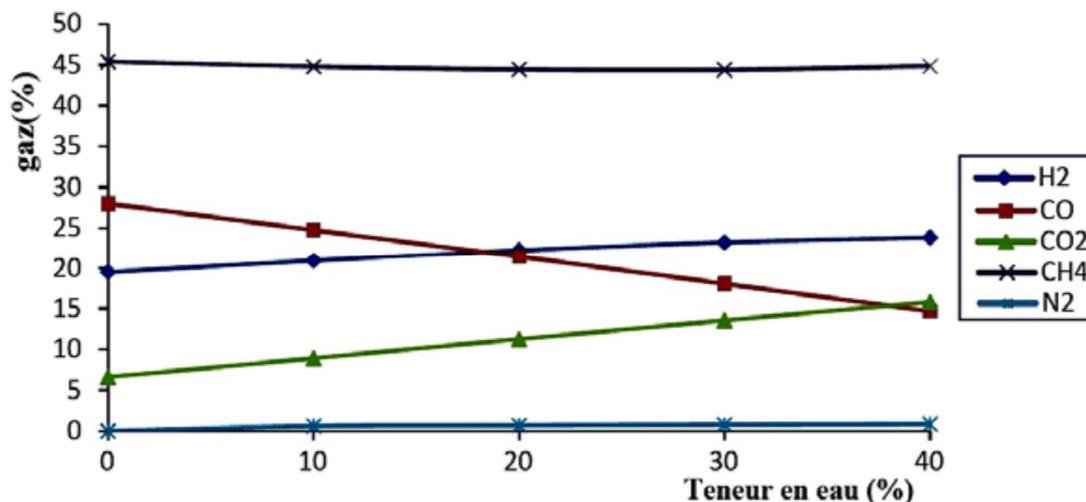


Figure III.2 : Effet de la teneur en eau dans le bois sur la composition du gaz à 800

3.1.2 Influence de la température sur la composition du gaz

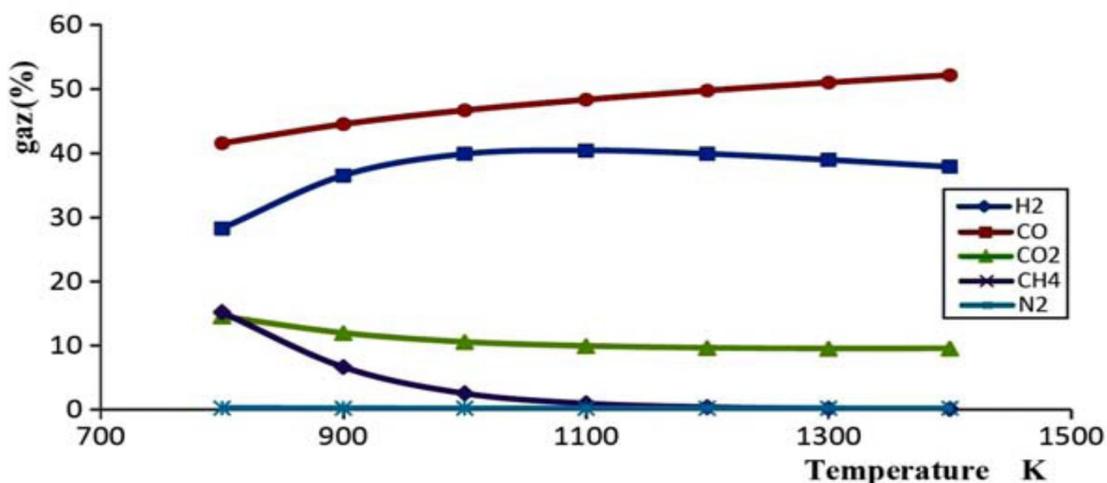


Figure III.3: Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéfié à l'oxygène)

Nous constatons premièrement que le gaz n'est pas dilué du N_2 et la concentration des divers produits est plus élevée d'où la réaction se produit plus efficacement, la composition du gaz de synthèse est plus énergétique (notamment pour produire du biodiesel selon le procédé Fischer-Tropsch) :

- Pour le CO_2 , dans le gaz obtenu grâce à l'oxygène, on constate une baisse quasi-constante tant que l'on augmente la température (ce qui devrait se répercuter positivement sur la composition énergétique de notre gaz brut)
- Quant au CO , nous avons observé à l'air une décroissance, mais présentement le CO croit

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

quasi-continuellement avec la température. Nous nous intéressons du CO parce qu'il est l'un des acteurs principaux dans la réaction FT, et le H₂ est également élevé. Les produits combustibles de la réaction sont bien plus présents lors de la gazéification à l'oxygène.

La température finale de pyrolyse n'influence pas que la répartition entre le gaz, les huiles et le charbon, elle a aussi une influence sur la composition des gaz et des goudrons produits. Les travaux de DUFOUR (2007) menés sur le même dispositif de laboratoire que notre étude ont permis d'extraire certaines tendances illustrées sur la **Figure 16**

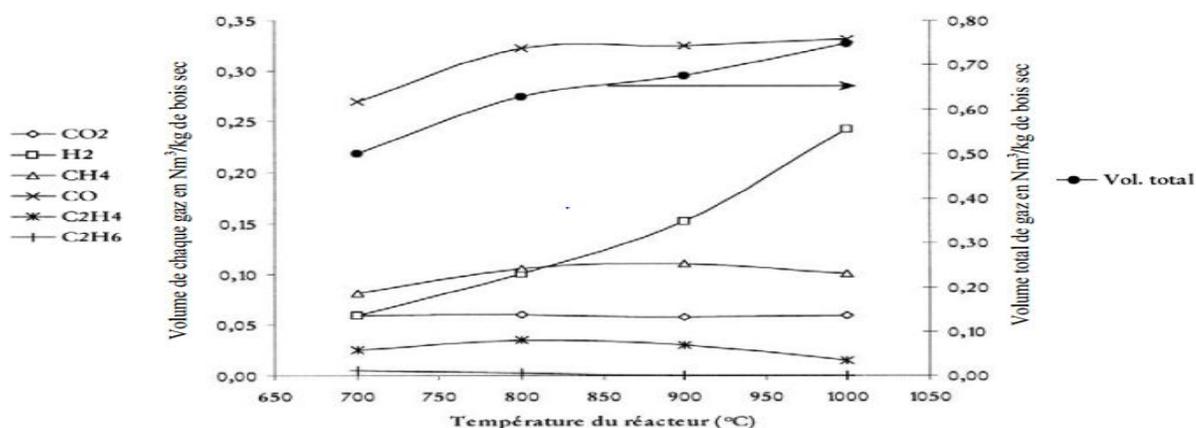


Figure III.4 : Évolution des volumes de gaz produits au cours de la réaction à différentes températures. (DUFOUR, 2007)

Lors de l'accroissement de la température, on observe une diminution des hydrocarbures légers tels que l'éthylène et l'éthane. Le volume de CO₂ produit reste relativement constant, celui de méthane augmente entre 700 °C et 800 °C puis diminue entre 900 °C et 1000 °C. Le volume de CO produit augmente de façon importante entre 700 °C et 800 °C et finit par stagner entre 800 °C et 1000 °C. Le volume d'hydrogène produit subit, quant à lui, une augmentation nette de 700 °C à 1000 °C. L'accroissement du volume gazeux total produit est donc surtout imputé à l'augmentation du volume d'hydrogène. L'augmentation de la température de pyrolyse provoque une amélioration du rendement gazeux de la transformation.

3.2 Optimisation de la productivité en biodiesel

3.2.1 Comparaison des rendements des produits

Dans le réacteur FT, les produits sont caractérisés par la distribution de ASF. Cette distribution est définie par la constante de probabilité de la croissance des chaînes des hydrocarbures. Notre étude reposant sur la production du biodiesel, nous allons retrouver de valeur de α pour laquelle la production du biodiesel est plus probable à partir de cette distribution. Les valeurs de α et de W_n (la probabilité d'obtenir un hydrocarbure de longueur n) obtenue à partir du programme Fortran nous permettent de tracer avec Excel les courbes des différents hydrocarbures dans la figure III.9 :

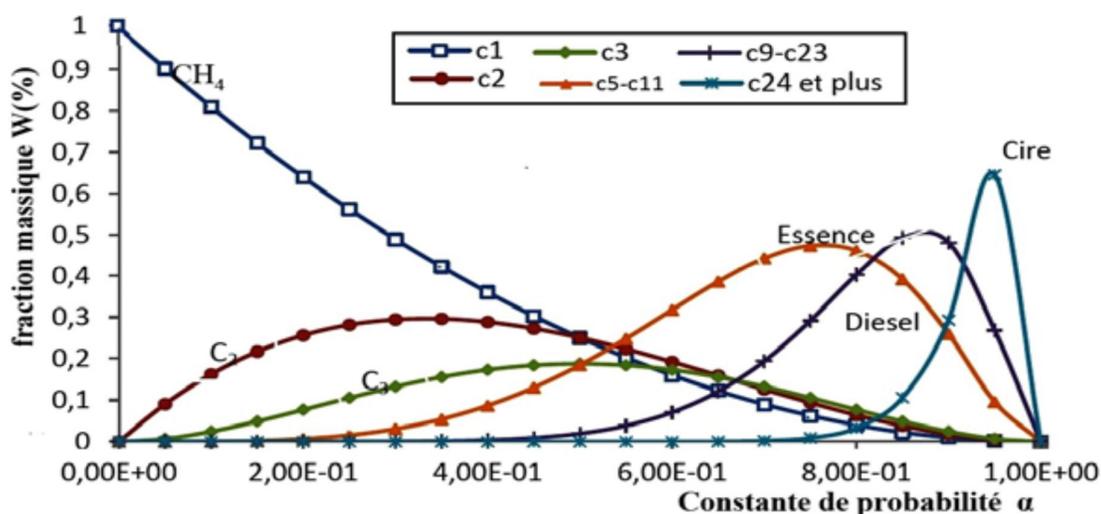


Figure III.5: Distribution massique des produits en fonction de α .

Nous observons que pour une valeur de $\alpha=0,89$ correspond à un maximum de sélectivité en diesel.

3.2.1.1 Rendement en biodiesel

Avec pour objectif la production du biodiesel, les conditions du processus peuvent être sélectionnées pour produire une quantité maximale de produits dans la coupe diesel. Cependant le rendement (η_{FT}) du biodiesel est dans ce cas limité à approximativement 40 % (H.Boer). Un rendement élevé du biodiesel peut être obtenu quand la synthèse FT est optimisée vers la production des cires. Les cires peuvent être sélectivement hydro craquée dans la coupe du biodiesel. Au cours de cet hydrocraquage, l'addition de l'hydrogène est requise, lequel peut être produite à partir du syngaz via la réaction de WGS. La sélectivité maximale du biodiesel qui peut être produit à partir du syngaz est approximativement $\eta_{FT} = 70\%$ (efficacité énergétique du syngaz au liquide en général) (H. Boer).

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

Le syngaz convertit dans le réacteur de synthèse FT est de 95 % seulement 80 % de l'énergie de l'énergie dans le gaz sont retenues pour la production des produits FT sature le reste est libéré comme la chaleur de réaction, la sélectivité du processus FT pour la production de C₅+ (liquide +cires) est de 95 % et les autres 5 % sont les produits de gaz C₁-C₄. Les produits lourds de FT peuvent être sélectivement convertis en carburant dans une étape d'hydrocraquage avec 98 % d'efficacité (H. Boer). L'énergie contenue dans le gaz sortant peut être utilisée pour générer de l'électricité.

À partir de ces données nous pouvons déduire le rendement global du processus BTL pour la synthèse FT non optimisée et optimisée comme suit :

$$\eta_{\text{global}-i} = \eta_{\text{gazéification}} \times \eta_{\text{purification}} \times \eta_{\text{FT}}$$

Qui nous donne les valeurs respectives $\eta_{\text{global}-\text{N.O.}} = 15.19 \%$ et $\eta_{\text{global}-\text{O.}} = 29.52 \%$

(i= N.O. : non optimisée, O. : optimisée) connaissant le pouvoir calorifique net du biodiesel qui est calculé dans le programme. On peut déduire le volume du biodiesel produit par l'expression.

$$V_{\text{biodiesel}-i} = \eta_{\text{global}-i} \times \frac{m_{\text{rbois}} \times \text{PCS}_{\text{moyrbois}}}{100 \times \text{PCS}_{\text{net biodiesel}}}$$

Pour un kilogramme de résidus de bois, on trouve respectivement

$$v_{\text{biodiésel}-\text{N.O.}} = 0.110 \text{ l et } v_{\text{biodiésel}-\text{O.}} = 0.214 \text{ l.}$$

La production du diesel FT par tonne de résidu forestier de bois est environ 110.47 litres et avec la technologie optimisée, le rendement atteint 214.63 litres.

À partir de ces résultats, nous pouvons dresser un tableau regroupant différentes formes des résidus de bois avec leurs quantités de biodiesel estimées à partir de notre type de procédé utilisé, c'est-à-dire en utilisant le même type de réacteur et le même type d'oxydant à l'étape de la gazéification, la même technologie de purification du gaz brut et l'utilisation du même procédé de production du bio liquide à l'étape de synthèse FT.

Connaissant la composition élémentaire de la biomasse, nous pouvons estimer à l'aide du programme la quantité du biodiesel produit, le PCS du gaz, le PCS du biodiesel, etc.

Tableau III.1: Récapitulatif de la composition du gaz de synthèse, la quantité de biodiesel produit à partir des différentes formes des résidus de bois

		Bois sans écorce	Résidus forestiers	Copeaux de bois	Boulettes de bois
Caractéristiques de la biomasse	C (%)	52.05	52	52.4	52.8
	H (%)	6.2	6.01	6.17	6.2
	O (%)	41.2	40.2	41.1	40.3
	N (%)	0.3	0.4	0.3	0.6
	S (%)	0.05	0.05	0.043	0.06
	MM (%)	0.2	1.34	0.08	0.04
	Teneur en Eau (%)	10	10	10	10
	PCS (MJ/kg)	20.63	29.21	21.09	20.99

Gazéifier à l'oxygène à la température de 1000 °C

Caractéristiques du syngaz	CO (%)	50.43	51.05	50.84	51.30
	H₂ (%)	38.91	38.42	38.99	39.53
	CO₂ (%)	10.17	10.05	9.67	8.67
	CH₄ (%)	0.23	0.22	0.23	0.24
	N₂ (%)	0.24	0.24	0.24	0.24
	PCS gaz (%)	11.41	11.42	11.47	11.60
	H₂/CO	0.77	0.75	0.76	0.77
	Volume en (Nm³)	1.64	1.63	1.64	1.66

L'intérêt actuel pour la synthèse FT est conduit par plusieurs facteurs :

Demandes environnementales, les raisons géopolitiques et les prix élevés du pétrole brut. Les contraintes environnementales sont présentes au niveau des sites de production de pétrole brut ou le torchage du gaz naturel associé doit être réduit autant que possible (M.V. Ramanan et al., 2008) en utilisant la synthèse FT, ce gaz naturel peut être converti en combustibles liquides qui ne contiennent pas de soufre ou azote et ces carburants ultras propres de FT peuvent être mélangés avec des

carburants traditionnels pour permettre d'atteindre les spécifications déplus en plus strictes. Les aspects géopolitiques sont importants pour l'intérêt actuel pour la réaction de FT, en utilisant la synthèse FT, des carburants de transport peuvent être obtenus à partir d'autres sources de carbone autre que le pétrole brut, comme le charbon (CTL) et également la biomasse (BTL) abaissant de ce fait la dépendance sur les pays exportateurs de pétrole. Le dernier facteur pour l'intérêt actuel pour la synthèse FT est le prix du pétrole à des valeurs au-dessus de 20 dollars/bar il qui rend la production des carburants synthétiques économiquement viable, et de nos jours Sasol et Shell actionnent commercialement le processus de FT avec une production combinée de 0.2 million de barils par jour (Berhang, 2005).

3.3 Calcul du rendement du réacteur de gazéification

Nous utiliserons par la suite à partir du programme, les caractéristiques du gaz brut obtenu à 1073 °K, pour les résidus forestiers à une teneur en eau de 10 %. À cette température, on favorise le craquage des goudrons dans le gaz brut.

Tableau III.2: Caractéristiques du gaz brut obtenu à 1073 0K et à 10 % de la teneur eeau.

Pourcentage des espèces (%)	Gazéifiées à l'oxygène
Dihydrogène (%)	39.72
Monoxyde de carbone (%)	48,25
Dioxyde de carbone (%)	10,56
Méthane (%)	1,22
Diazote (%)	0,24
Rapport H ₂ /Co (%)	0.82
PCS _{gaz brut} (MJ/Nm ³) (%)	11.63

À l'oxygène le gaz brut obtenu n'est pas dilué du diazote, le taux de CO₂ est supérieur à 8 %, nous observons que la gazéification de 1 kg de résidus de bois nécessite 1.49 Nm³ d'air pour produire un volume de 0,314 Nm³ du gaz brut. L'eau contenue dans ce gaz a été extraite dans un embranchement à chute d'eau grâce à un effet venturi créé par une circulation d'eau qui permet de séparer les gaz légers de l'eau qu'il contient. Le gaz n'étant pas dilué du diazote nous voyons que l'oxygène se pourrait se révéler une atmosphère idéale pour produire le biodiesel à partir de la réaction de synthèse FT. Même s'il est vraisemblable que Syntroleum utilise le gaz dilué du N₂ pour produire le liquide FT avec pour objectif de réduire le coût de la production. Dans le

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

processus conventionnel de Fischer-Tropsch, l'étape de la production du gaz de synthèses peut prendre 50-60 % du capital total d'investissement or le processus d'apport d'air peut le réduire de 25 % (A. van der Drift et H. Boerrigter, 2006)

L'expression du rendement du gaz produit dans le réacteur de gazéification est donné par :

$$\eta_{gazeification} = \frac{V_{gaz} \times PCS_{gaz \text{ par kg de bois}}}{m_{r.bois} \times PCS_{moyr.bois}}$$

Où le PCS_{gaz} est donné par la formule :

$$PCS_{gaz} = X_{H_2} \times PCS_{H_2} + X_{CO} \times PCS_{CO} + X_{CH_4} \times PCS_{CH_4} + X_{CO_2} \times PCS_{CO_2} + X_{N_2} \times PCS_{N_2}$$

Dans l'équation ci-dessus le PCS_{gaz} est le pouvoir calorifique supérieur du syngaz alors que les PCS_i et x_i sont les pouvoirs calorifiques supérieurs et les fractions volumiques des constituants du gaz. ($i=H_2, CO, CH_4, CO_2, N_2$). En connaissant les PCS_i on trouve que :

À l'oxygène : Le $PCS_{gaz \text{ par kg de bois}} = 11.63 MJ/Nm^3$.

Sachant que le $PCS_{moy r.bois}$ est calculé dans le programme du dit travail, on peut déduire que le rendement du gaz produit obtenu par simulation en équilibre thermodynamique est :

- **À l'oxygène :**

Nous observons que la présence du diazote et du dioxyde de carbone diminue fortement le pouvoir calorifique supérieur du gaz produit, Le but de notre gazéification étant d'obtenir un gaz de synthèse très énergétique pour réaliser la synthèse Fischer-Tropsch. Cela sous-entend que nous devons passer à une étape de purification du gaz produit qui nous permettra premièrement d'éliminer toutes les particules et les goudrons et ensuite d'ajuster le rapport H_2/CO et d'augmenter l'efficacité énergétique du gaz produit. Force est de constater que la quantité de production du dioxygène est parfois limitée et très couteuse. Généralement la présence d'une minorité d'impureté comme le soufre, chlorure, l'ammoniac sont cependant inévitable en plus la concentration de ces molécules excède généralement la spécification des catalyseurs de synthèse dans le réacteur FT d'où la nécessité de purifier le gaz. Le tableau (III.5) montre les spécifications indicatives des impuretés dans le syngaz qui doivent être adaptées pour le processus de SFT.

Cette étape nous permet d'avoir le syngaz pouvant être directement utilisé pour la réaction de synthèse tout en contrôlant les proportions de toutes les espèces dans le gaz

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

Tableau III.3: Concentration maximum permise des impuretés dans le syngaz. (A. van der Drift et H. Boerrigter 2006)

Impuretés	Spécifications
H ₂ S + COS + CS ₂	< 1 ppm
NH ₂ + HCN	< 1 ppm
HCl + HBr + HF	< 10 ppb
Métaux alcalins	< 10 ppb
Particules (cendre, suie)	Presque complètement retirées
Composants organiques (goudrons)	Non condensable : en dessous du point de saturation
Composants hétéros organiques (S, N, O)	< 1 ppm

Le rendement ($\eta_{gazeification}$) de cette étape est généralement compris entre **74-76 %** (A. van der Drift et H. Boerrigter, 2006 H. Boerrigter, H. Bodenstaff et al, 2004). Le gaz purifié et conditionné pour respecter les spécifications des catalyseurs FT est une fois introduit dans le réacteur FT.

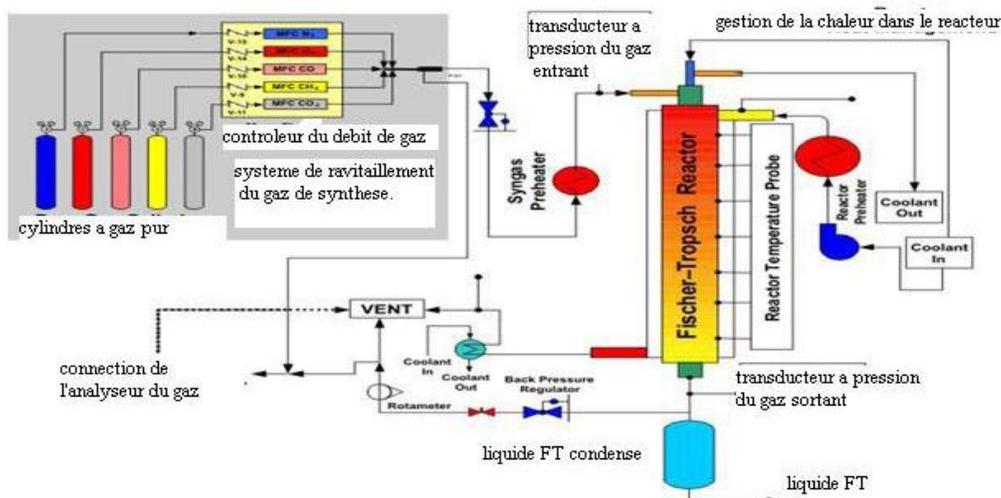


Figure III.6: Schématisation du passage du gaz au liquide FT en situation expérimentale. (William Whittenberger, 2008)

Conclusion partielle

Nous venons d'exposer les résultats de la simulation de la gazéification de la biomasse Lignocellulosique, qui nous permettent de comprendre le principe de cette technologie, de montrer les différents facteurs qui influencent cette gazéification. Cette étape étant la plus importante dans la synthèse BTL. Elle permet de produire le gaz de synthèse pour la réalisation de la synthèse FT, nous permettant de faire un récapitulatif sur les différents résidus bois en fonction de leurs quantités de biodiesel produit et de comprendre qu'un choix particulier sur le réacteur de gazéification est très important et de même que le type de catalyseur employé peut être un atout pour un meilleur rendement.

En effet, ce gaz produit par le réacteur de gazéification possède des impuretés qui peuvent être des poisons pour les catalyseurs, d'où une étape de purification est nécessaire. Cette étape permet de conditionner le gaz pour respecter les spécifications de la SFT.



IMPLICATION DANS LE
SYSTÈME ÉDUCATIF

Une implication est une action par laquelle on attribue à quelqu'un ou à quelque chose un certain rôle dans une affaire (*Ask Web Search*). Dans notre étude, les implications sont les conséquences attendues de « *Contribution à la modélisation et la simulation des processus chimiques de gazéification en vue d'optimiser le gaz de synthèse produit à partir des résidus de bois au Cameroun : cas du biodiesel* ». Pour mieux comprendre notre sujet, nous allons élaborer une fiche pédagogique du sujet et voir l'intérêt didactique dans le système éducatif.

4.1. Fiche pédagogique.

La fiche pédagogique décrit le déroulement des différentes activités pédagogiques. C'est une référence d'enseignement qui nous prouve que le processus d'apprentissage a été atteint. Elle comprend les éléments importants dans l'apprentissage comme suit :

- Le thème traité ;
- Le niveau des apprenants ;
- Les objectifs généraux, le but du processus d'apprentissage ;
- Le média utilisé pour pratiquer ;
- La méthode de travail ;
- La démarche pédagogique.

Table : fiche pédagogique

4.2. Intérêt didactique.

La didactique des sciences physiques s'intéresse au contenu et aux difficultés que pose son enseignement. Pour mieux comprendre la didactique de notre sujet, quelques concepts de base seront définis ; ensuite, nous mettrons en exergue les objectifs de l'étude, sa méthodologie, et comment l'apprenant doit être évalué. Enfin les problèmes rencontrés dans cette étude.

4.2.1. Définition des concepts

« **Contribuer** » : apporter,

« **Modéliser** » : donner une forme,

« **Simuler** » : faire paraître comme réelle ce qui ne l'est pas,

« **Thermochimie** » : science qui étudie le déplacement des particules,

« **Gazéification** » : réaction de transformation d'un solide en gaz afin de privilégier la formation du gaz de synthèse principalement constitué de CO et H₂,

« **Optimiser** » : améliorer dans le sens d'une augmentation ou d'une diminution,

« **Résidus de bois** » : déchets de bois de toute sorte

« **Biodiesel** » : biocarburant issu de la biomasse

4.2.2. Objectif de l'étude

L'objectif général de cette étude est d'examiner et de comprendre le processus de production du biodiesel de deuxième génération à partir des résidus de bois. Pour atteindre la cible, il nous est indispensable de passer par les objectifs spécifiques suivants :

- Identifier les types de bois, ainsi que leur zone de prédominance au Cameroun ;
- Identifier et examiner les différents procédés de production du biodiesel avec les résidus de bois avec la réaction de synthèse Fischer Tropsch ;
- Présenter l'évolution des courbes donnant les propriétés du bois en fonction des paramètres physiques, puis donner une interprétation.

4.2.3. Méthodologie

La méthodologie de ce travail est l'utilisation de la voie thermochimique. Elle a permis d'obtenir les données pour chaque espèce. Ainsi nous avons distingué des étapes telles que la pyrolyse, la gazéification et la combustion.

La production du biodiesel nécessite tout un ensemble de mécanismes complexes, mettant en jeu des résidus de foresterie comme matière première. Ayant obtenu toutes les données nécessaires pour réaliser cette étude, nous avons utilisé comme outil de modélisation : le logiciel Excel (version d'évaluation), ce qui nous a permis de tracer les courbes en fonction des paramètres physiques.

4.2.4 Les problèmes de cette étude

L'évolution des procédés thermochimiques va toujours dans la même direction : s'adapter aux exigences économiques, mais aussi environnementales et sociétales pour continuer à offrir à la société d'aujourd'hui des biocarburants toujours meilleurs, comme les filières industrielles le font depuis des années. Un moteur de changement technique important est la réduction des prix de revient, qui s'est traduite au 20^e siècle par le raccourcissement des filières et la réduction du nombre d'opérations et d'outils. La thermochimie a été la grande révolution technique des années 60 et 70 et cette technologie est maintenant utilisée dans le monde entier de façon très majoritaire. Cette technique, qui simplifie les étapes de production du biodiesel, a aussi connu un développement important à partir des années

90 là où de nouvelles usines devaient être construites comme aux États-Unis ou en Chine. La recherche continue à travailler sur un procédé encore plus radical qui produirait directement des biocarburants avec un indice d'octane supérieur à 74 avec des bois de diamètre assez important.

D'autres défis majeurs attendent la société et ses industriels dans la première moitié du 21^e siècle en liaison avec le réchauffement global et la nécessité de réduire les émissions de CO₂ de façon drastique. Tous les émetteurs de gaz à effet de serre (GES) seront appelés à contribution. Dans le cas du biodiesel, qui a réduit ses consommations énergétiques spécifiques de plus de 60 % dans la seconde moitié de l'an 2006, le défi technique est énorme, car les procédés actuels tels que le haut-fourneau fonctionnent aussi près des limites de la thermodynamique que possible : on ne peut plus réduire les émissions de CO₂ en améliorant la performance énergétique, comme cela reste possible dans des activités moins optimisées. Il faut donc rechercher des solutions de procédés en rupture, qui mettent en jeu des paradigmes techniques entièrement nouveaux. En Europe, les études régionales plus détaillées s'accordent sur le fait que le développement des biocarburants de troisième génération pourra difficilement aller au-delà de 5,75 % d'incorporation. Le programme ULCOS (Ultra-Low CO₂ Steelmaking) regroupe les compétences de la plupart des opérateurs de biodiesel européens sous la coordination d'Arcelor Mittal. Il vise à identifier deux ou trois pistes sérieuses qui seraient ensuite construites à une échelle de pilote industriel afin de valider les choix ainsi faits et d'être en mesure de les proposer à l'horizon d'une vingtaine d'années pour remplacer la technologie actuelle du biodiesel. Une gamme importante de solutions est au centre de ce vaste programme de recherche. On regarde par exemple comment modifier le biodiesel de façon à pouvoir capturer le CO qu'il émet pour le stocker dans des réservoirs géologiques souterrains (CCS : CO₂ capture and Storage). On regarde aussi si l'utilisation directe de charbon dans des procédés de fusion réduction ne permettrait pas d'être encore plus performant que le biodiesel tout en mettant en œuvre le CCS. On s'intéresse également à l'utilisation d'un carbone « neutre » produit de façon durable à partir de biomasse. Et, comme l'horizon temporel est lointain et que le paysage énergétique va beaucoup changer par l'épuisement inéluctable des gisements d'hydrocarbures et la contrainte carbone, on s'intéresse enfin à l'hydrogène (pré-réduction) et à l'électricité (électrolyse). La thermochimie du bois se prépare ainsi à accompagner l'humanité dans les siècles à venir et à relever avec elle les grands défis qui lui sont lancés.

4.3 Rapport avec l'enseignement du secondaire

Ce procédé nous permet de mettre en évidence les différentes propriétés de la matière végétale et ses différentes transformations.

Chapitre 4 : Implication dans le système éducatif

- La pyrolyse est la première étape de la voie thermochimique ; elle consiste à chauffer les résidus de bois en l'absence d'un agent oxydant afin d'obtenir le charbon de bois qui est donc à l'état solide d'où l'état solide de la matière

- La liquéfaction directe ou combustion est l'état liquide du charbon de bois d'où l'état liquide de la matière

- La gazéification quant à elle représente la troisième étape, c'est la phase dans laquelle les résidus de bois sont transformés en gaz grâce au réacteur d'où l'état gazeux de la matière.

Ainsi les élèves peuvent être édifiés par ce travail, car il regorge des parties clés du système éducatif dans le domaine énergétique, précisément en thermochimie. Nous avons pour exemple l'étude de l'état de la matière, qui peut se représenter sous des formes assez variées notamment solide, liquide et gazeux ; ou les élèves de la classe de 4^e font face à des mécanismes assez variés et dont cette étude peut se décrire par le schéma suivant :

BIOMASSE	→	ÉTAT GAZEUX	→	BIODIESEL
(Solide)	gazéification	(gaz)	purification et SFT	(liquide)

Ainsi nous enseignants pourrions mieux les accompagner dans leur formation éducative. Ledit travail possède également une implication aux transferts de chaleur avec des systèmes adiabatiques vue en classe de 2nd. De plus il est préjudicieux de rappeler aux apprenants que la protection de l'environnement relève d'un défi majeur en ce siècle, d'où la nécessité d'opter pour des nouvelles sources d'énergie est inévitable. Tout ceci s'opère dans l'optique de la protection de la couche d'ozone qui conditionne notre existence sur terre. Enfin nous mettons un accent sur les matières scientifiques, ainsi les élèves doivent faire preuve de volonté manifeste à essayer de les aborder, car ce travail a nécessité des outils tant dans le domaine informatique que dans le domaine mathématique.



CONCLUSION GÉNÉRALE
ET PERSPECTIVE

Conclusion générale

Le présent travail avait pour objectif la contribution à l'optimisation du gaz de synthèse par gazéification à partir de la biomasse résiduelle en vue d'un meilleur rendement en biodiesel. En fin de compte, le biodiesel constitue la filière de biocarburants dite de deuxième génération lors de sa production à l'étape de SFT. Leur atout contrairement aux biocarburants de première génération est qu'il n'utilise pas de denrées alimentaires à l'instar de la canne à sucre, du, mais, des céréales pour leur fabrication. Il est fabriqué à partir des végétaux et des résidus de ces végétaux, afin de fournir une solution plus écologique, plus équitable, et plus durable. Par ailleurs, ne pouvant pas produire du biodiesel à une échelle considérable, avec pour cause le manque des infrastructures, le Cameroun doit en toute nécessité opter pour cette approche de production de biodiesel. Donc, étant donné que la gazéification est l'une des étapes fondamentales de la production du biodiesel, nous avons fait une simulation en présentant une modélisation des processus thermochimiques de gazéification.



- A. van der Drift et H. Boerrigter (2006)**, A. van der Drift et H. Boerrigter (2006), 'synthesis gas from biomass for fuels and chemicals.' ECN-C--06-001.document pdf.
- Behrang MADANI (2005)**, 'Synthèse de Fischer-Tropsch sur catalyseur à base de cobalt supporté sur carbure de Silicium'. Thèse de doctorat, UNIVERSITE LOUIS PASTEUR DE STRASBOURG, 28-01-2005. Document pdf
- Bridgewater, A.V., (2003)**: 'Renewable fuels and chemical by thermal processing of biomasses'. Chemical Engineering journal. 91(2-3): p.87-102
- CENADEFOR, 1985**. Inventaire des ressources du Sud-Cameroun (2^e tranche). Fascicule I : description de la région inventoriée, méthode et réalisation de l'inventaire. Nogent-sur-Marne, France, cftf, 128p. Contribution à l'atelier sur le bois énergie au Cameroun.
- D. Schell et al., (1998)**, modeling the enzymatic Hydrolysis of Dilute -Acid Pretreated Douglas fir, National Renewable Energy laboratory, 1617 Cole Blvd., Golden, CO 80401-3393. Defits a l'horizon 2020. Rome, Italie, Fao, Etude Fao Forêts n°141, 76p.
- Equipe Technique du GTZ/ProPSFE/Antenne de la Province de l'Est Cameroun**'contribution à l'atelier sur le bois énergie au Cameroun'.
- Erincin, D.,Sing, A.,Misirlioglu, Z.,M.,**'Characterization of burning and CO₂ gasification of chars from mixtures of zonguldak (Turkey) and Australian bituminous coals, Energy Conversion and management', 2005, vol.46 (17), P.2748-2761.
- Erincin, D.,Sing, A.,Misirlioglu, Z.,M.,**Characterization of burning and CO₂ gasification of chars from mixtures of zonguldak (Turkey) and Australian bituminous coals, Energy Conversion and management, 2005, vol.46 (17), P.2748-2761.
- Globale Village Cameroun.1997**. Le Cameroun et l'énergie durable. Rapport de projet
- H. Boerrigter, H. Bodenstaff et al (2004)**, 'Gas Cleaning for Integrated Biomass Gasification (BG) and Fischer-Tropsch (FT) Systems.' Energy research center of Netherlands (ECN), report 04-056. Document pdf

Knoef, H.A.M. (Ed.), Handbook Biomass Gasification, Biomass Technology Group, 2005 La fabrication de biocarburants de deuxième génération par voie thermo-chimique par J-L. Duplan

Latif FAGBEMI (1984), 'étude expérimentale et théorique des étapes de la gazéification: application à la prévision de la composition molaire du gaz.', thèse de doctorat, université de technologie de Compiègne, 19-12-1984. Document pdf.

Loi 98/005 du 14 Avril 1998 portant sur le régime de l'eau

M. Venkata Ramanan et al (2008), 'performance prediction and validation of equilibrium modeling for gasification of cashew nut shell char', Brazilian journal of chemical Engineering, septembre 2008, Anna university.doc pdf

M.V. Ramanan, E. Lakshmanan, R. Sethumadhavan and S.Renganarayanan, 'Performance, Prediction and Validation of Equilibrium modeling for Gasification of cashew Nut Shell char', Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol 25, N°3, pp. 585-601, 2008.

Mc Kendry, P., (2002): 'Energy production from biomass (part3): gasification Technology'. Bioresource Technology. 83 (1): p 55-63.

Razvan VIJEU (2010), 'Etude expérimentale de gazéification des déchets de bois', PhD student, Faculty of power Engineering, University POLITEHNICA of Bucharest, Romania.
Rousset, P., 'Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température de la microparticule au bois massif, thèse de doctorat, ENGREF.

William Whittenberger (2008), 'Thermo chemical conversion of biomass to syngas and chemical feedstock.' Draft Final Report, Energy and Environmental Research Center, University of North Dakota. Document pdf.

Wu, Z., Sugimoto, Y., Kawashima, H., Effect of de mineralization and catalyst addition on N₂ formation during coal pyrolysis and on char gasification, Fuel, 2003, vol.82 (15 -17), p.2057-2064.

www.mrnt.gouv.qc.ca/publications/Forest/entreprises/bioraffinage/forestier.pdf

BIBLIOGRAPHIE

Ye, D.P., Agnew, J.B.,Zhang,D.k.,Gasification of a south Australian low-rang coal with Carbone dioxide and steam: kinetics and reactivity studies, Fuel, 1998, vol.77 (11), p.1209-1219

Z.A Zainal et al (2000), 'prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials', school of mechanical engineering, university sains Malaysia. 42, p. 1499-1515 (2001).Document PDF



	Bois sans écorce	Résidus forestiers	Copeaux de bois	Boulette de bois
Cendre (%)	0.4-0.5	1-3	0.8-1.4	0.4-1.5
Teneur en eau (w %)	50-60	50-60	20-50	7-12
P.C.S (MJ/kg)	18.5-20	18.5-20	19.2-19.4	16.2-19
Densité (kg/m ³)	390-640	Variables	250-350	500-780
Matières volatiles w %	> 70	> 70	76-86	> 70
Point de fusion des cendres T °C	1400-1700	Variables	1000-1400	>1120
C	48-52	48-52	47-52	48-52
H	6.2-6.4	6.0-6.2	6.1-6.3	6.0-6.4
N	0.1-0.5	0.3-0.5	<0.3	0.27-0.9
O	38-42	42-44	38-45	~40
S	<0.05	<0.05	<0.05	0.04-0.08
Cl	0.01-0.05	0.01-0.04	0.02	0.02-0.04
K	0.02-0.05	0.1-0.4	~0.02	Variables
Ca	0.1-1.5	0.2-0.9	0.04	Variables

Tableau III.1: Principales propriétés des bois, résidus de bois forestiers, copeaux de bois. (Mermoud (2006))

Espèces chimiques	Phase	$\Delta H^{\circ F}_{298}$	$\Delta G^{\circ F}_{298}$
Eau	g	-241818	- 228 572
Eau	l	-285830	- 237 129
Dioxyde de carbone	g	-393509	- 394 359
Monoxyde de carbone	g	-110525	- 137 169
Méthane	g	-74520	-50 460
Hydrogène	g	0	0
Azote	g	0	0
Oxygène	g	0	0

Tableau III.2: Enthalpie de formation à 298 K (prophet et al 1971)

Espèces chimiques	T _{max}	A	10 ³ B	10 ⁶ C	10 ⁻⁵ D	
CH ₄	1500	1.702	9.081	-2.164	-	
H ₂	3000	3.249	0.422	-	0.083	
CO		2500	3.376	0.557	-	-0.031
CO ₂		2000	5.457	1.047	-	-1.157
N ₂		2000	3.280	0.593	-	0.04
H ₂ O		2000	3.470	1.450	-	0.121
C		2000	1.771	0.771	-	-0.267

Tableau III.3: Les constantes A, B, C, D pour les capacités calorifiques (Robert et al.)

Teneur en gaz (%) : cas du N ₂	0	1	2	3	3.5
Teneur en eau (%)	0	10	20	30	40

Tableau III.4 : pourcentage molaire de N₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900 °C (gazéifier à l'oxygène). Échelle : abscisse 3cm →10 % ; ordonnée 0.8 cm →5 %

Teneur en gaz (%) : cas du CO ₂	7	8	11.5	14	16
Teneur en eau (%)	0	10	20	30	40

Tableau III.5 : pourcentage molaire de CO₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900 °C (gazéifier à l'oxygène).

Échelle : abscisse 3cm →10 % ; ordonnée 0.8 cm →5 %

Teneur en gaz (%) : cas du H ₂	20	22	24	26	27
Teneur en eau (%)	0	10	20	30	40

Tableau III.6 : pourcentage molaire de H₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900 °C (gazéifier à l'oxygène).

Échelle : abscisse 3cm →10 % ; ordonnée 0.8 cm →5 %

Teneur en gaz (%) : cas du CO	28	25	22	19	16
Teneur en eau (%)	0	10	20	30	40

Tableau III.7 : pourcentage molaire de CO en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900 °C (gazéifier à l'oxygène).

Échelle : abscisse 3cm →10 % ; ordonnée 0.8 cm →5 %

Teneur en gaz (%) : cas du CH ₄	45	45	45	45	45
Teneur en eau (%)	0	10	20	30	40

Tableau III.8 : le pourcentage molaire de CH₄ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900 °C (gazéifier à l'oxygène).

Échelle : abscisse 3cm →10 % ; ordonnée 0.8 cm →5 %

Fraction massique w (%) : cas du CH ₄	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.00
Constante de probabilité α	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	1.00

Tableau III.9: distribution massique des produits en fonction de α

Fraction massique w (%) : cas de l'essence	0.00	0.00	0.1	0.3	0.4	0.00
Constante de probabilité α	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	1.00

Tableau III.10 : distribution massique des produits en fonction de α

Fraction massique w (%) : cas du diesel	0.00	0.00	0.00	0.09	0.3	0.00
Constante de probabilité α	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	1.00

Tableau III.11 : distribution massique des produits en fonction de α

Fraction massique w (%) : cas de l'acide	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65
Constante de probabilité α	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	1.00

Tableau III.12 : distribution massique des produits en fonction de α

Fraction massique w (%) : cas de C ₂	0.00	0.2	0.3	0.2	0.1	0.00
Constante de probabilité α	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	1.00

Tableau III.13 : distribution massique des produits en fonction de α

Fraction massique w (%) : cas de C ₁	0.00	0.09	0.19	0.2	0.1	0.00
Constante de probabilité α	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	1.00

Tableau III.14 : distribution massique des produits en fonction de α

Programme écrit en FORTRAN 90.

```

program MÉMOIRE
implicit none
integer : i, max, j,l,xl
parameter (max=6600009, xl=200) ;
double précision: : ti, te, hb, hel, hev, hco2, ho2, hn2, hco, hh2, hch4, ach4, ac, ah2, bch4, bc, bh2,
azote, Nt ;
double précision: : cch4, cc, ch2, dch4, dc, dh2, aco2, ae, aco, bco2, be, bco, cco2, ce, cco, dco2, de,
dco ;RDa(xl)
double précision: : r, cph2, cpco, cpco2, rfta, cpe, cpm, cpn2, tam, an2, bn2, cn2, xca, dn2, cdi, hdi, xdi,
ydi ;
double precision::w,dla,dlb,dlc,dld,sa,sb,sc,sd,dh1,ddh2,rpuri,rft,rfta,Vdiesel(xl),Vdiesela(xl), ,eps;
double précision: : dg1, dg2, j1, j2, i1, i2, gel, c,h5, oo, hhhv, aa, tee, Oz, Hy, s,PCS, PCSA, Vg1 (xl), F1
(xl), F2 (xl)
double précision: : k1, k2, t,Y11 (xl), Y21 (xl), PCSS(xl), Vg(xl), Y31 (xl), RG(xl), RGa(xl), Y41 (xl), Y51 (xl),
Y0 (xl),
doubleprecision: : gch4, gc, gh2, gco2, gco, ge, h, POCO (xl), POH2 (xl), RD (xl), POCO2 (xl), POH2O (xl),
PON2 (xl)
double précision: : F (max), X1 (max), X2 (max), X3 (max), X4 (max), X5 (max), X (max), O (max), M
(max) ;
double précision: POCH4 (xl)
open (10, file='d:essai1pbbiodiesel.doc »)
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!! entrer les valeurs de la température initiale de réaction et la teneur en eau dans le bois !!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
write (*,*),'entrer la valeur de la teneur en eau : te »
read (*,*), te
write (*,*),'entrer la valeur du rendement de l'étape de purification du gaz brut »
read (*,*), rpuri
write (*,*),'entrer la valeur du rendement de l'étape de la synthèse FISCHER-TROPSCH FT »
read (*,*), rft
write (*,*),'entrer la valeur du rendement de l'étape de la synthèse FISCHER-TROPSCH FT
AMÉLIORE »
read (*,*), rfta
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

ANNEXE

```

! proportion des teneurs en carbone, hydrogène, oxygène, azote !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

write (*,*),'entrer les valeurs de c carbone, h5 hydrogène, oo oxy, aa mm, s soufre, azn azote »
read (*,*), c,h5, oo, aa, s,azote

write (*,*),'entrer la valeur moyenne du nombre de carbones x de CxHy du biodiesel: »
read (*,*), xdi

write (*,*),'entrer la valeur du nombre de carbones x de préférable 1'
read (*,*), xca

l=1 ; t=1173
do while (t.le.1173)
t=t+100
ti=298. ; r=8.314 ; eps=0.00001 ;h=0.00000010025 ;
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! on entre les valeurs de l'enthalpie et de l'énergie de gibbs pour chaque molécule mise en jeu !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

hel=-285830. ; gel=-237129.0 ; hch4=-74520.0 ; gch4=-50460.0 ; hco=-110525.0 ; gco=-137169.0 ;
hev=-241818.0 ; ge=-228572.0 ; hch4=-74520.0 ; gch4=-50460.0 ; hco=-110525.0 ; gco=-
137169.0 ;
hco2=-393509.0 ;gco2=-394359.0 ; hch4=-74520.0 ; gch4=-50460.0 ; hco=-110525.0 ; gco=-
137 169.0 ; hco=-110525.0 ;gco=-137169.0 ; hco=-110525.0 ;gco=-137169.0 ; hco=-110525.0 ;
gco=-137169.0 ; hco=-110525.0 ; gco=-137169.0 ; hco=-110525.0 ; gco=-137169.0 ;
hco=-110525.0 ;gco=-137169.0 ; hch4=-74520.0 ;gch4=-50460.0 ; ho2=0.0 ; hn2=0.0 ; hh2=0.0 ;
gh2=0.0 ;gc=0.0 ;
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Caractéristique du biodiesel produit !!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

ydi=((2*xdi)+2)
cdi=(xdi*12*100)/(xdi*12+ydi)
hdi=(ydi*100)/(xdi*12+ydi)
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! Calcul du pouvoir calorifique supérieur du biodiesel en kj/l PCS !!
!! Sachant que la densité du biodiesel est: 0.77 kg/l !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
PCSA=((10*((34.8*cdi)+(93.9*hdi)))+((600*9 *hdi*4.18)/100))*0.77
PCI=((10*((34.8*cdi)+(93.9*hdi)))*0.77

```

ANNEXE

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! Calcul de l'enthalpie de formation du bois !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
hhhv=77.2326*(146.58*c+(56.878*h5)-(51.53*oo)-(6.58*aa)+29.45) ;
hb=hhhv+(hco2+ (0.72*hev)) ;
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!! calcul du pouvoir calorifique supérieur du bois PCS !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
PCS=(10*((34.8*c)+(93.9*h5)+(10.5*s)+(6.3*azote)+(10.8*oo) -(2.5*te)))+((600*9*h5*4.18)/100)
write (10,*),hb, hhhv (pouvoir c s), PCS et du PCSA diesel, PCI diesel en KJ/Kg
sont
« ,hb,hhhv,PCS,PCSA,PCI
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! entrer les valeurs des a, b, c,d des capacités calorifiques !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ach4=1.702 ;          bch4=0.009081 ;          cch4=-0.000002164 ;          dch4=.0 ;
ah2=3.249 ;          bh2=0.000422 ;          ch2=-0.00000 ;          dh2=8300.;
aco=3.376 ;          bco=0.000557 ;          cco=-0.00000 ;          dco=-3100.;
aco2=5.457 ;          bco2=0.001047 ;          cco2=-0.0000 ;          dco2=-115700.;
an2=3.280 ;          bn2=0.000593 ;          cn2=-0.00000 ;          dn2=4000.;
ae= 3.470 ;          be=0.001450 ;          ce=-0.00000 ;          de=12100.;
ac=1.771 ;          bc=0.000771 ;          cc=-0.0000 ;          dc=-86700.;
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! calcul de l'indice de l'hydrogène et de l'oxygène !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
Hy=(h5*12 *xca)/(c*1) ;
Oz=(oo*12*xca)/(c*16) ;
Nt=(azote*12*xca)/(c*14)
write (10,*), » les valeurs de indice hydrogène et oxygène azote', Hy, Oz, Nt
!!! calcul de la masse molaire du bois et la proportion d'eau contenue dans le bois !!!
do while (te.le.50)
te=te+10
tee=(12+Hy+ (16*Oz)+(Nt*14)) ;
w=(tee*te)/(18*(100-te)) ;
!! calcul des valeurs de delta (a, b, c,d) pour les deux réactions d'équilibre pour déterminer !!
!! les deux constantes d'équilibres K1, K2 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
dla=ach4-ac- (2*ah2) ; dlb=bch4-bc- (2*bh2) ; sa=ah2+aco2-aco-ae ; sb=bh2+bco2-bco-be ;
dlc=cch4-cc- (2*ch2) ; dld=dch4-dc- (2*dh2) ; sc=ch2+cco2-cco-ce ; sd=dh2+dco2-dco-de ;
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!
!! calcul des enthalpies et l'énergie de GIBBS de réaction des deux réactions d'équilibres:reaction !!!!!
! de méthanisation et réaction de water-gas-shift !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
dh1=hch4-hh2 ;          dg1=gch4-gc-gh2 ;
ddh2=hco2+hh2-hco- (hev) ;          dg2=gco2+gh2-gco- (ge) ;
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! calcul des constantes d'intégration a une température de 298 K !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
j1=dh1- (r*(dla*ti+(dlb*(ti**2)/2)+(dlc*ti**3/3) -(dld/ti))) ;
i1=(j1-dg1)/(r*ti) -(dla*log (ti)+((dlb*ti)/2)+((dlc*ti*ti)/6)+(dld/(2*ti*ti))) ;

```


ANNEXE

```

Vg(l)=Y11 (l)+Y21 (l)+Y31 (l)+Y51 (l) +0.004
Vg1 (l)=Y11 (l)+Y21 (l)+Y51 (l)
write (10,*), « le pouvoir calorifique supérieur en KJ/Nm3 et le volume Vg du syngaz est: », PCSS(l),
Vg(l)
write (10,*),'la température et la teneur en eau sont :', t,te
write (10,*),'la valeur de pourcentage poh2', POH2 (l)
write (10,*),'la valeur de pourcentage poco', POCO (l)
write (10,*),'la valeur de pourcentage poco2', POCO2 (l)
! write (10,*),'la valeur de pourcentage poh2o', POH2O (l)
write (10,*),'la valeur de pourcentage poch4', POCH4 (l)
write (10,*),'la valeur de pourcentage pon2', PON2 (l)
write (10,*),'donne la valeur de F2 chaque fois:', F2 (l)
write (10,*),'lesvaleurs de x1 (h2), x2 (co), x3 (co2), x4 (h2o), x5 (ch4), m (air) ont', Y11 (l), Y21 (l), Y31
(l), Y41 (l),
Y51 (l), Y0 (l)

!!!!!!On cherche à calculer le rendement énergétique du réacteur de gazéification !!!!!!!
RD (l)=(Vg1 (l)*PCSS(l)*100)/(1*PCS)
write (10,*),'le rendement de gazéification est:', RD (l)
RG(l)=(RD (l)*rpuri*rft)/10 000
RGa(l)=(RDa(l)*rpuri*rfta)/10 000
write (10,*),'le rendement global du processus BTL, RG ;RGameliore:', RG(l), RGa(l)
!!!!!!!!!!!!calcul du volume du biodiesel Vdiesel !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
Vdiesel(l)= (10*(RG(l)*1 *PCS))/PCSA
Vdiesela(l)= (10*(RGa(l)*1*PCS))/PCSA
write (10,*),'le volume du biodiesel produit par une tonne de bois est:', Vdiesel(l)
write (10,*),'le volume du biodiesel améliore produit par une tonne de bois est:', Vdiesela(l)
enddo
endif
enddo
l=l+1
enddo
enddo
write (*,*)'sil vous plait aller voir les résultats dans la partition d'
read(*,*),
write (*,*)'merci pour votre attention et suggestion !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! »
read (*,*),

endprogram

```



CURRICULUM VITAE

I. IDENTIFICATION



Nom : **NOAH**

Prénom : **André Junior**

Date et lieu de naissance : **29 septembre 1992 à Yaoundé**

Nationalité : **camerounaise**

Région d'origine : **Centre**

Département d'origine : **Lékié**

Situation matrimoniale : **célibataire**

Quartier de résidence : **Mvolyé (Carrefour Scalom)**

Portable : **(+237) 74 02 19 88/ (+237) 91 514 849**

E-mail. : juniornoah92@yahoo.fr

Âge : **24 ans**

Célibataire

Université de Yaoundé I

École Normale de Yaoundé

Matricule : 09w0726

Série : physique

II. FORMATIONS :

Formation académique et scolaire :

Formation académique :

- . 2013-2014 ; master I en physique option électronique
- 2012-2013 ; Licence en physique option électronique analogique (Faculté des Sciences)
- 2010-2011 ; DEUG physique (Faculté des Sciences)

Formation scolaire :

- 2009 ; Baccalauréat C (Lycée de NSAM-EFOULAN)
- 2008 ; probatoire C (Lycée de Bokito)

AUTRES : parle et écrit le français et anglais

DIVERS : Loisir : pratique le spo

CURRICULUM VITAE

ee
ee
ee
e