

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEURE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER'S TRAINING
COLLEGE

DEPARTMENT OF PHYSICS

**ETUDE DU POTENTIEL DES CARACTERISTIQUES DES
RESIDUS DE BOIS AU CAMEROUN EN VUE DE LA
PRODUCTION DU BIODIESEL DE DEUXIEME
GENERATION**

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de professeur de
l'enseignement secondaire deuxième grade**

(DIPES II)

Par :

ANEMENA ETOGA Emmanuel

Matricule : 10W0034

Licencié en physique

Sous la direction du :

Pr. BEGUIDE BONOMA

Maitre de Conférences

20152016

**ETUDE DU POTENTIEL DES
CARACTERISTIQUES DE RESIDUS DE
BOIS AU CAMEROUN EN VUE DE LA
PRODUCTION DU BIODIESEL DE
DEUXIEME GENERATION**

Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention
du Diplôme de Professeur de l'Enseignement Secondaire Général
Deuxième Grade (D.I.P.E.S II)

Filière : **Physique**

par :

ANEMENA Etoga Emmanuel

Licencié en Physique

Matricule : 10W0034

Sous la direction de :

Prof. BEGUIDE BONOMA

Maitre de conférences

2015-2016

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

-Mon père ETOGA ANEMENA PAUL EDOUARD, pour les encouragements, les efforts incessants et l'attention portée envers moi .Ce travail est le fruit de l'éducation que tu as toujours su m'apporter .

Remerciements

- Le présent travail, fruit de plusieurs années de dur labeur, a été mené à son terme grâce au soutien permanent d'ordre moral, intellectuel, matériel et financier des personnes à qui je profite de l'occasion pour leur adresser ma profonde gratitude.
- Je remercie le Seigneur tout puissant pour toutes les grâces dont il ne cesse de me combler ;
- Je remercie le Professeur BEGUIDE BONOMA pour sa grande disponibilité et ses échanges fructueux ;
- Je tiens également à remercier tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer à ce jury ;
- Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les enseignants du Département de physique de L'ENS pour tous les enseignements reçus durant notre formation ;
- J'adresse aussi mes sincères remerciements auxquelles j'associe ma profonde gratitude à tous mes Enseignants du Département de physique de l'université de Yaoundé 1 , en particulier au professeur BEN-BOLIE Germain H qui m'a toujours soutenu ;
- Je tiens également à remercier tous les membres de la grande famille en particulier : mes grands parents MBOA Jeannette et les autres , mes oncles BANYOMO, MBITE, NDJOULI, BELLA , ANEMENA , mes tantes MBIA, MINOMO, mes sœurs , MESSOMO Angele , NYIMI Crescence, MBOA

Flora , EHONNA Pascaline, MBANDI Therese , MBASSITE Welisanne, MESSINA Brigitte à mes frères BESSALA Steve , ETOGA Junior , ATEBA Guy, BELLA Tony, mes cousins et cousines ANEMENA Guy ,MBALLA Nadege, BASSOULE Prudence , BESSALA Serge, BANYOMO Junior ,NGAMA , MAKOLO Fleur ,et à tous ceux dont j'ai oublié les noms je demande des excuses .A vous tous je dis Merci pour votre générosité tout au long de ces années d'étude ;

- Je remercie monsieur FANMOE Willy qui m'a soutenu et édifié sur ce travail.
- Je remercie mes amis HEUTEU Crepin et MBEUMI Bruno pour leur disponibilité et leur soutien logistique ;
- Je tiens également à remercier tous mes amis de l'Amicale des Anciens Elèves du Lycée de Nkolbisson pour leurs encouragements ;
- Je remercie tous mes amis et camarades de la 55^{ieme} promotion particulièrement TANKOU Eric, EBOUEM-EBOUEM, GNAMSI, KOLOKO, ELOUNDOU Barnabe, et NOAH Andre pour l'aide qu'ils m'ont apportée ;
- Je remercie aussi tous mes amis et camarade de la faculté et en particulier ceux du master 2 du laboratoire de physique nucléaire atomique moléculaire et biophysique ;
- Je remercie tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail et dont le nom ne figure pas ici.

Table des matières

Table des figures

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Table des matières	iv
Table des figures	v
Résumé	xii
Abstract	xiii
Introduction	1
1 CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BIOCARBURANTS	3
1.1 APPROCHE HISTORIQUE	3
1.2 LES BIOCARBURANTS	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Les biocarburants de première génération	4
1.2.3 Les biocarburants de deuxième génération	6
1.3 SOURCES ET ORIGINES DES BIOCARBURANTS DE DEUXIÈME GÉNÉRATION	6
1.3.1 La biomasse lignocellulosique	7
1.3.2 Les résidus de bois : cas du Cameroun	7

1.4	LES ESSENCES FORESTIÈRES LES PLUS EXPOITEES AU CAMEROUN	14
1.4.1	Cas de l'ayous	15
1.4.2	Cas de l'IROKO	16
1.4.3	Cas du Sapelli	19
1.5	Mécanisme de production ou de transformation des résidus de bois en biodiesel	23
1.5.1	la voie thermochimique	24
1.6	26
1.6.1	Avantage du biodiesel	26
1.6.2	Inconvénients des biocarburants	26
1.7	Un mot sur le réchauffement climatique	27
1.8	Conclusion	29
2	CHAPITRE II : MODELISATION ET CINETIQUE DES ETAPES DE PRODUCTION DU BIODIESEL	30
2.1	Les bioréacteurs	30
2.1.1	Définition	30
2.1.2	Présentation d'un bioréacteur [Unasyuva, 2011]	30
2.1.3	Les réacteurs de gazéification	31
2.1.4	Réacteurs pilotes existants	32
2.1.5	Caractéristiques et performances d'un réacteur étagé	34
2.1.6	Développement d'un nouveau réacteur	35
2.1.7	Le Réacteur en Lit Fixe Continu	36
2.2	Cinétique et modélisation sur l'équilibre	36
2.2.1	Généralités	36
2.2.2	Équation de la réaction globale des résidus forestiers sec avec l'air	37
2.2.3	Organigramme	41
2.3	Conclusion	42

3 CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	43
3.1 Introduction	43
3.2 Influence de la teneur en eau sur la composition du gaz	45
3.3 Influence de la température sur la composition du gaz	48
3.4 Calcul du rendement du réacteur de gazéification	51
3.5 Rendement du biodiesel	54
3.6 Confrontation avec les résultats expérimentaux et validation . .	57
3.7 Détermination des paramètres cinétiques de la réaction de gazéi- fication à la vapeur d'eau	58
3.7.1 Comparaison avec les données expérimentales de la litté- rature	63
3.7.2 Discussion sur l'origine des écarts modèle/expérience . .	65
3.7.3 Géométrie et homogénéité des particules	65
3.7.4 Prise en compte de la fracturation	66
3.8 Conclusion	66
IMPLICATION-APPORT DANS LE SYSTÈME ÉDUCATIF	68
3.9 Fiche pédagogique	68
3.10 Intérêt didactique	69
3.10.1 Définition des concepts	69
3.10.2 Objectif de l'étude	69
3.10.3 Méthodologie	70
3.10.4 Les problèmes de cette étude	70
Conclusion Générale	73
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	75
Annexe	79

Table des figures

1.1	Structure microscopique du bois [CIRAD,2000].	9
1.2	Coupe transversale d'un tronc de Chêne [CIRAD,2000].	9
1.3	Structure de la cellobiose [GTZ, 2008].	12
1.4	Principaux constituants de la lignine [GTZ, 2008].	13
1.5	(a) Houppier d'ayous; (b)Fut d'ayous; (c) Section d'ayous . . .	16
1.6	Houppier d'iroko	17
1.7	Fut d'iroko	18
1.8	Section d'iroko	19
1.9	Houppier du sapelli	21
1.10	Fut du sapelli	22
1.11	Section du sapelli	23
1.12	Procédé de production d'ethanols de deuxieme generation . . .	24
1.13	Etapes de purification et du conditionnement du gaz produit [william,2008]	25
2.1	Schéma d'un bioréacteur de laboratoire	31
2.2	Réacteur à lit Entraîne	34
2.3	Différentes étapes pour améliorer le liquide FT en biodiesel. Source : [Gasel,2002]	35
2.4	Différentes étapes de production du biodiesel ft a partir des ré- sidus de bois (source : IFP,2000)	42

3.1	: Pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 800 °C (gazéifiée à l'air)	45
3.2	Pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 900 °C (gazéifiée à l'oxygène)	46
3.3	Effet de la teneur en eau dans le bois sur la composition du gaz a 800 °C	47
3.4	Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifié à l'air)	48
3.5	Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifié à l'oxygène)	49
3.6	Variation des fractions molaires en fonction de la température .	51
3.7	Schématisation du passage du gaz au liquide FT en situation expérimentale [William, 2008]	53
3.8	Distribution massique des produits en fonction de α	54
3.9	Récapitulatif de la composition du gaz de synthèse, la quantité de biodiesel produit à partir des différentes formes des résidus de bois [ZAINAL, 2011].	56
3.10	Simulations réalisées avec la réaction de gazéification a la vapeur d'eau	58
3.11	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour différentes températures	60
3.12	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour différentes pressions partielles de vapeur d'eau	61
3.13	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour différentes tailles de particules	62
3.14	comparaison entre les données expérimentales de [Dasappa et al,2002]. et la simulation de notre modèle dans les mêmes conditions opératoires	64

Liste des tableaux

1.1 Composition élémentaire du bois sec [CIRAD]. 11

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 résiduel et montrer que ce biocarburant obtenu à partir des résidus de bois est de bonne qualité avec un rendement élevé et pouvant être une alternative au carburant fossile, ceci en contribuant 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 : Biodiésel, deuxième génération, résidus de bois.

Abstract

The aim of this work is to show that 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 and show that this biofuel is the best quality with high yield and could be an alternative to replace the fossil fuel, this in numerically contributed and principally on second generation of biodiesel production. In effect they exist two principles 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 : biodiesel, second generation, woods residues.

Introduction Générale

Le Cameroun, ayant un potentiel de biomasse lignocellulosique résiduelle estimée à 4.95 millions de m³ en 2006 et la maîtrise de la consommation énergétique faisant partie des défis majeurs de notre siècle dans le contexte du développement durable, et la lutte contre le réchauffement climatique dû aux émissions des gaz à effet de serre produits par les combustibles fossiles non renouvelables, du fait de 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. S'il est vraisemblable de considérer que les combustibles fossiles continueront d'occuper une place majoritaire dans nos sources d'énergie dans le moyen terme, il est cependant 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, qui fera l'objet de notre travail qui sera basé sur la production du biodiesel de deuxième à partir des résidus de bois tels que l'AYOUS, l'IROKO, le SAPELLI et bien d'autres. 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 pour une meilleure sélectivité des hydrocarbures et ainsi que la production de meilleur carburant. Ceci nous amenant à

comprendre qu'une étude minutieuse de cette étape de production du gaz est importante. C'est ainsi que, 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. Nous estimerons les différentes proportions des espèces dans le gaz de synthèse après purification et SFT, donc les rendements expérimentaux sont donnés dans la littérature, nous ferons une projection sur la quantité de biodiesel produit tout en parlant de la sélectivité des produits dans la réaction de SFT. Ce travail essentiellement théorique est structuré en trois chapitres : le premier chapitre présente les biocarburants dans la généralité, les différents types de bois, leurs propriétés et nous mettrons un accent particulier sur les voies de production du biodiesel à partir des résidus de bois cités ci-haut. Dans le second chapitre nous formulons les modèles et cinétiques de l'étape principale de production du biodiesel : la voie thermochimique qui comprend la pyrolyse, la liquéfaction directe ainsi que la gazéification. Le troisième chapitre est réservé à la présentation des résultats de l'équilibre du modèle en passant par l'organigramme formulé pour l'étape de production du biodiesel (la voie thermochimique) une interprétation en a résulté.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BIOCARBURANTS

1.1 APPROCHE HISTORIQUE

A la naissance de l'industrie automobile, le pétrole et ses dérivés n'étaient pas encore très utilisés ; c'est donc très naturellement que les motoristes se tournaient, entre autre, vers ce qu'on n'appelait pas encore les biocarburants : NIKOLAUS OTTO, inventeur du moteur à combustion interne avait conçu celui-ci pour fonctionner avec de l'éthanol. RUDOLF DIESEL, inventeur du moteur portant son nom, faisait tourner ses machines à l'huile d'arachide. La Ford T (produit de 1903 en 1926) roulait avec de l'alcool. Le 28 Février 1923, les efforts d'Edouard BARTHE pour la promotion d'un carburant national à base d'alcool de grains sont entérinés par la loi. Lors des deux guerres mondiales, les gazogènes sont rapidement apparus pour palier au manque de gasoil et d'essence. Au milieu du 20^{me} siècle, les pétroles abondants et bon marché expliquent un désintérêt des industriels pour les biocarburants. Le premier et second champ de produit (1973 et 1979) les rendirent à nouveau attractif, pour des questions stratégiques (sécurité d'un approvisionnement en énergie) et économiques (réduction de la facture pétrolière, développement d'une industrie nationale dans un contexte de chômage croissant)

1.2 LES BIOCARBURANTS

1.2.1 Définition

L'expression « biocarburant » (formée du grec bios, vie, vivant et de « carburant » ; combustible qui alimente un moteur thermique et celui-ci transforme l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique) indique que ce carburant est obtenu à partir des matières organiques renouvelables et non-fossiles, par opposition issu des ressources fossiles. L'appellation « biocarburant » a été promue par les industriels de la filière et certains scientifiques. Biocarburant est la dénomination retenue par le parlement européen. Les biocarburants peuvent être utilisés directement comme combustibles principaux et comme matière première pour la conversion en carburant raffiné ou en d'autres produits. Ils peuvent se présenter sous forme solide ou être convertis sous forme liquide ou gazeuse pour la production d'énergie électrique, de chaleur, de produits chimiques ou de carburant. Ils peuvent être créés à l'aide des procédés thermiques, chimiques, biologiques ou physiques. Les principales sources de matières premières des biocarburants sont les suivantes : les cultures agricoles et les résidus de culture, les déchets des usines de transformation des aliments, le bétail et les cadavres d'animaux, les arbres et les produits d'exploitation forestière. La portion organique des déchets organiques municipaux les boues d'épuration ainsi que les déchets industriels, commerciaux et institutionnels. Les biocarburants se présentent sous trois formes générales : solide, liquide et gazeuse. Ces biocarburants sont généralement classés en trois générations selon le type de matière première donc ils sont issus. Ainsi, nous avons les biocarburants de première génération, seconde et troisième génération.

1.2.2 Les biocarburants de première génération

Dans cette génération, on trouve plus principalement de nos jours deux camps de filière (huile et alcool) dont les produits finaux sont l'éthanol (et

son dérivé l'ETBE : Ethyl-Tertio-Butyl-Ether) et l'huile végétale (et son dérivé l'EMHV : Ester-Méthyl d'Huile Végétale). Ils sont fabriqués à partir de sucre simple, amidon ou huile végétale présent dans des organes de réserve des plantes : grains de blé ou de maïs, graines de colza ou de tournesol, jus de plantes sucrières (canne à sucre, betterave). L'éthanol est obtenu par fermentation alcoolique des sucres à 6 atomes de carbone qui sont directement produits par les plantes sucrières ou obtenu par hydrolyse de l'amidon produit par les céréales. L'ETBE est ensuite obtenu par coupe avec l'isobutène, un dérivé du pétrole. L'huile est extraite des grains de plantes oléagineuses (colza, tournesol, soja) puis transformé en EMHV par estérification avec méthanol (d'origine fossile). Les alcools et l'ETBE peuvent être incorporés dans l'essence tandis que les huiles et EMHV s'apparentent au diesel, c'est pourquoi on parle aussi de biodiesel pour ces dernières. Les moteurs actuels supportent sans problème des taux d'incorporation d'ETBE et de l'EMHV de 10%. Au-delà, quelques adaptations sont nécessaires. La technologie 'flexible fuel', très développée au Brésil, permet d'utiliser indifféremment de l'éthanol ou de l'essence et donc des mélanges très concentrés en éthanol, comme l'E85 (mélange éthanol/essence contenant 85% d'éthanol) ; qui commence à être distribué en France. En plus de ces deux grandes filières, nous avons également la filière du gaz (filière gazière) consiste à produire du méthane (bio-méthane) via la fermentation méthanique (méthanisation) de matières organiques animales ou végétales riches en sucres (telles l'amidon ou la cellulose) par des bactéries méthanogènes qui vivent dans des milieux anaérobiques (boues des stations d'épuration, lisiers d'élevage, effluents des industries agroalimentaires, des déchets ménagers). Le méthane qui représente 95% des gaz de ce type de fermentation peut être utilisé en tant que substitut au gaz naturel qui se compose lui-même à 95% de méthane. Le méthane peut être utilisé dans des moteurs à essence soit dans les moteurs dits dual fuel (moteurs diesel alimentés en majorité par du méthane ou du biogaz et pour lesquels l'explosion est assurée par un léger apport de

biodiesel et l'huile ou gazole). La filière charbon de bois (biocarburant solide), il est obtenu par pyrolyse du bois, de la paille ou d'autres matières organiques. Un ingénieur indien a développé un procédé permettant de pyrolyser les feuilles de cannes à sucre, feuilles qui ne sont presque jamais valorisées actuellement. Pour produire le biodiesel il fallait utiliser un grand nombre de ressources alimentaires, ce qui fragiliserait l'alimentation ; alors la filière des résidus de bois attire notre attention car avec les résidus souvent inutiles abandonnés après l'abattage, après le transport, et après les scieries, font l'objet d'une récupération qui, grâce aux processus de pyrolyse, de liquéfaction directe puis de gazéification vont contribuer à l'obtention du biodiesel de deuxième génération.

1.2.3 Les biocarburants de deuxième génération

Les filières de deuxième génération qui font l'objet d'effort de recherche et développement très poussé car ce sont les biocarburants propres et de meilleure qualité proches du diesel fossile obtenu à partir de la réaction de synthèse Fischer-Tropsch qui est une réaction complexe permettant de convertir les gaz de synthèse en hydrocarbure en présence d'un catalyseur. Cette réaction exothermique exige les conditions sur le gaz de synthèse pour une meilleure sélectivité des hydrocarbures et ainsi que la production de meilleur carburant. Ceci nous amenant à comprendre qu'une étude minutieuse de cette étape de production de gaz est importante.

1.3 SOURCES ET ORIGINES DES BIOCARBURANTS DE DEUXIÈME GÉNÉRATION

Les biocarburants de deuxième génération sont produits à partir de la biomasse lignocellulosique et se présentent sous trois états : solide, liquide et gazeux.

1.3.1 La biomasse lignocellulosique

La biomasse lignocellulosique, est un composé organique essentiellement constitué de carbone(C) , d'hydrogène (H),d'oxygène (O), d'azote(N) et de matière minérale. Elle est le premier constituant de la matière végétale. Elle représente une des ressources renouvelables la plus abondante sur terre, et certainement une des moins coûteuses. Sa conversion en biodiesel à usage carburant devrait permettre de subvenir à une partie des besoins énergétiques couverts jusqu'à présent essentiellement par les produits dérivés du pétrole, tout en générant de nouvelles opportunités pour le monde agricole. Les proportions de carbone, hydrogène et oxygène variant d'un type de biomasse à l'autre mais restent relativement semblables : environ 50% de Carbone, 40% d'Oxygène et 6% d'Hydrogène. Les biomasses contiennent très peu d'azote (de 0,4 à 1,2% environ). Le pourcentage de matière minérale dans les biomasses peut varier dans de grandes proportions. Généralement, les bois (regroupés en famille de résineux et feuillus) contiennent peu de matière minérale. La matière minérale se trouve généralement sous forme des sels ou d'espèces inorganiques liées à des espèces organiques.

1.3.2 Les résidus de bois : cas du 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 plus grands 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 2^{me} potentiel forestier dans le bassin du Congo (et en Afrique) ; inégalement réparti entre le nord et le sud du pays. Le Système d'Information Énergétique (SIE Cameroun) précise qu'en 2008, la consommation de la biomasse (bois, charbon, sciure et copeaux) représentait 77% du bilan énergétique national. Cette consommation est intense dans la région de l'extrême-nord, de l'Ouest, du Nord-Ouest, du Sud-ouest, du littoral et du

centre, soit 0,92 m³/habitant/an avec une consommation de bois de feu évaluée à 1,8 kg/habitant/jour [PEN, 1990]. D'après l'Enquête Energie Domestique (EED) menée en 2008 par le SIE-Cameroun, plus de 80% des ménages Camerounais utilisent des foyers à trois pierres pour la cuisson des repas. Ces foyers traditionnels sont non seulement très énergivores, mais aussi, ont des rendements très faibles. 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, déligneurs, aubier, défaut de cœur, etc.) était estimée en 2006 à 2,45 millions de m³ (GTZ, 2008) ; [POUNA, 1999] relevait qu'en 1992, la consommation du bois de chauffe et du charbon de bois pouvait être évaluée à 8 millions de m³ par an au Cameroun. Toutefois, il notait que ce chiffre était très approximatif car ces produits sont généralement exploités par le secteur informel, d'où la difficulté d'appréhender leurs quantités. Cette biomasse forestière pourrait être utilisée pour les entreprises forestières pour la production de la chaleur et électricité dans les systèmes de cogénérations.

- 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 observe dans le plan transversal, radial, ou tangentiel (figure 1-1). Les caractéristiques physiques et mécaniques du bois varient donc suivant ces directions, conférant au loin un caractère fortement anisotrope.

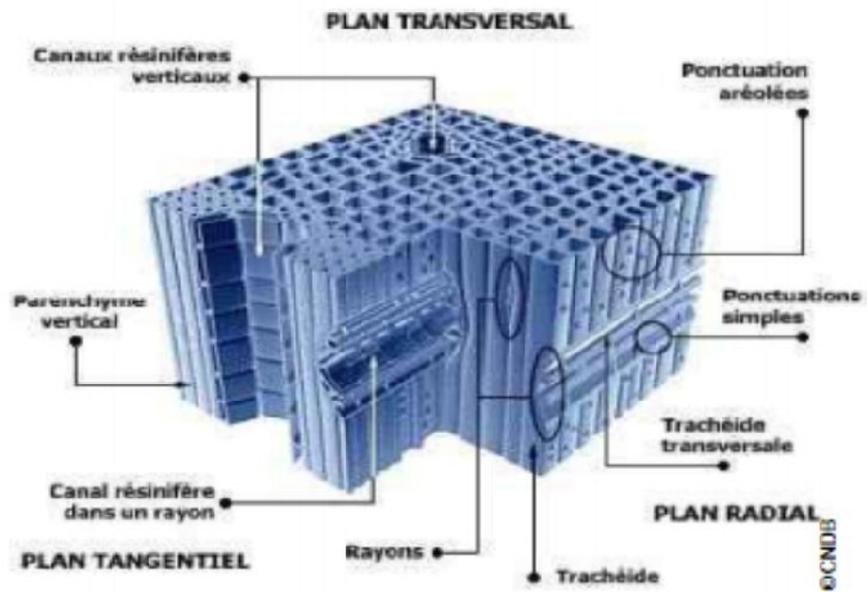


FIGURE 1.1 – Structure microscopique du bois [CIRAD,2000].

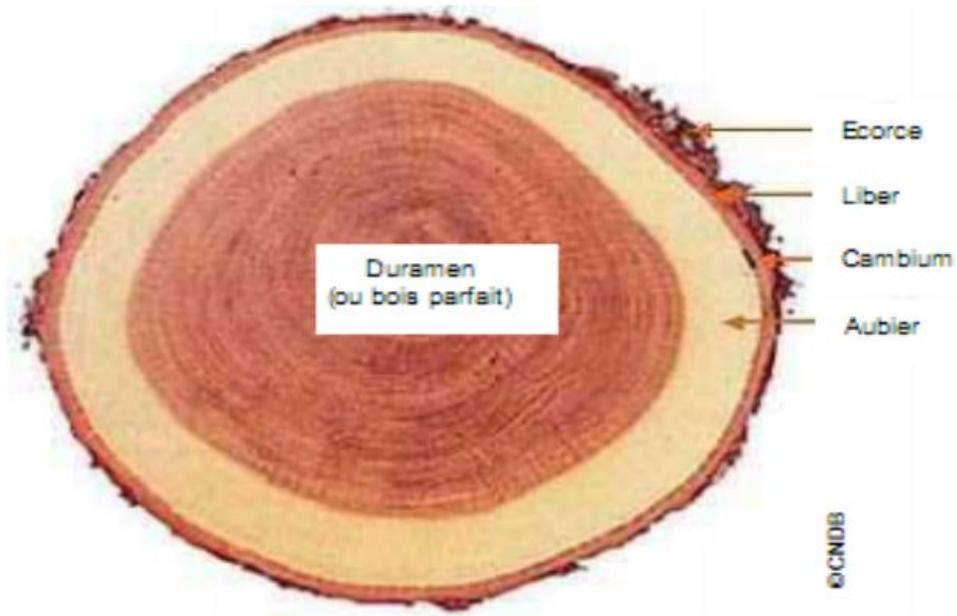


FIGURE 1.2 – Coupe transversale d'un tronc de Chêne [CIRAD,2000].

- Anatomie du bois

ROUSSET [GTZ ,2008] 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 1-2), 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 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.

-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.

- Composition du bois

-Composition 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 1-1 rapporte des valeurs de la composition élémentaire moyenne des feuillus et résineux.

TABLE 1.1 – Composition élémentaire du bois sec [CIRAD].

	Fraction massique sur sec (%)
C	50,9 ($\pm 2,0$)
H	6,1 ($\pm 0,4$)
O	42,6 ($\pm 2,6$)
N	0,37 ($\pm 0,43$)
Cendres	2,5 ($\pm 4,4$)

La forte teneur en oxygène du bois entraîne une diminution de son pouvoir calorifique par rapport à celui des combustibles fossile. 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% [BERHANG, 2005], celui des charbons minéraux peut atteindre 20% [KAVALOV, williamson, prt, 2000, 2011, 2011]. 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.

-La 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

ROUSSET [GTZ, 2008] 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 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 1-3), a une structure linéaire qui confère au bois son caractère fibreux.

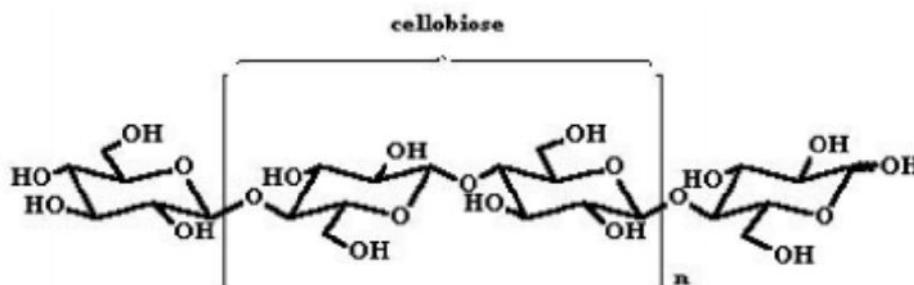


FIGURE 1.3 – Structure de la cellobiose [GTZ, 2008].

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 d'avantage 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 1-4) 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.

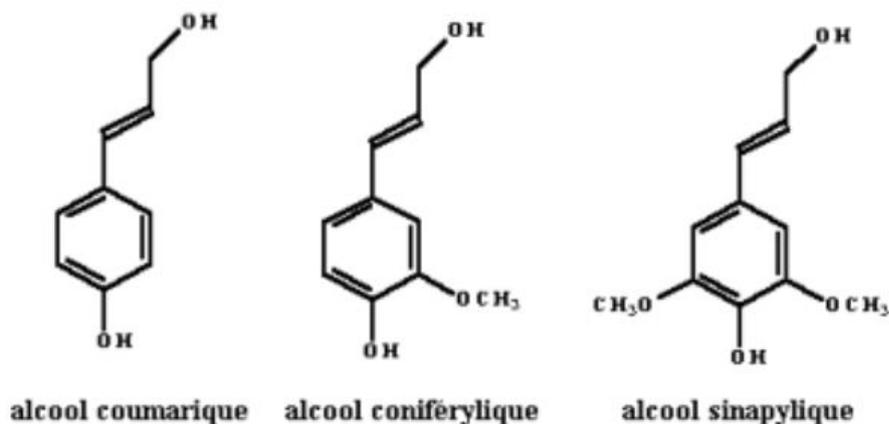


FIGURE 1.4 – Principaux constituants de la lignine [GTZ, 2008].

Propriétés du bois

- Pouvoir calorifique

Bien que la littérature propose différentes valeurs, le pouvoir calorifique inférieur du bois sec varie peu d'une essence à l'autre. Dans le cadre des statistiques réalisées sur le bois-énergie en France, le ministre de l'industrie. La valeur moyenne de 18000 KJ/Kg pour un bois sec. - Masse volumique

La masse volumique peut varier de manière importante d'une essence à l'autre : on relève des valeurs de $50\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour un bois tendre comme le pin et de $800\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour un bois dure comme le chêne. La masse volumique du bois dépend également beaucoup de son humidité et de sa granulométrie : pour une même essence, 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 $0,30\text{w}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$ 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.

1.4 LES ESSENCES FORESTIÈRES LES PLUS EXPLOITÉES AU CAMEROUN

La gestion des ressources forestière est une préoccupation majeure de toutes les parties qui interviennent dans la filière bois [FAO, 2003]. La planification des activités d'exploitation par les administrations en charge des forêts est devenu incontournable [EBA' A ATYI, 2000]. 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 extraite des forêts camerounaises, assises sur les phases d'inventaires concernées par l'étude dans les provinces du sud, du centre, du littoral et de l'est. Le nombre de tiges exploitées varie en fonction des provinces ; il est de 190 946, 82 282, 29 411, 26 205 respectivement dans les provinces du centre, de l'est, du littoral et du sud.

Le tableau 1-2 présente le classement des principales essences en nombre décroissant de pieds abattus dans les provinces étudiées. Il en ressort que les dix essences les plus exploitées diffèrent d'une province à l'autre. Il faut noter que certaines essences occupent des places de choix dans la plupart des provinces. C'est notamment le cas du fraké, classé parmi les essences les plus exploitées dans toutes les provinces, et de l'ayous qui occupe la première place dans le centre et l'est et la quatrième dans le sud.

Ainsi nous allons caractériser ces deux types d'essences et par la suite l'une retiendra notre attention tout au long de notre étude.

.

Rang	Province			
	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

Tableau 1.2 : Principales espèces les plus exploitées par région entre 2002 et 2005 [Unasyuva, 2011]

1.4.1 Cas de l'ayous

[UNASYLVA,2000] De part son nom scientifique *triplochitonscleroxylon* et de son nom pilote Obeche, on le retrouve le plus dans la région du centre Cameroun il appartient à la famille des *sterculiaceae*. C'est un arbre imposant mesurant parfois plus de 50 mètres de diamètre, l'ayous présente des contre-forts ailés et minces. Son fut est rarement cylindrique et seule les plus belles billes sont bien conformées. Les anomalies de conformité sont particulièrement présentes 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 caduque 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 divers. Son grain va de moyen à grossier et le bois peut parfois présenter un fil irrégulier. Sur quartier, il peut

prendre un aspect rubané.

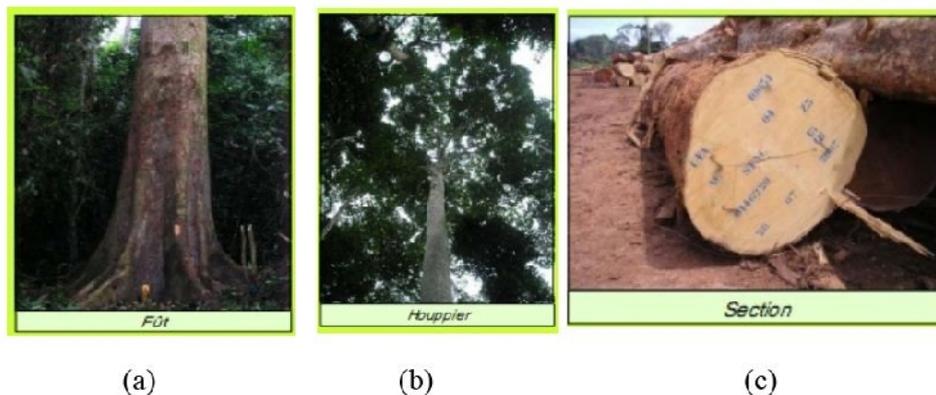


FIGURE 1.5 – (a) Houppier d'ayous ; (b) Fut d'ayous ; (c) Section d'ayous

1.4.2 Cas de l'IROKO

a- Informations techniques

Son nom scientifique est *chlorophora-excelsa*, ou *chlorophora-regia*. Son nom pilote est IROKO (kambala). on le retrouve le plus dans la région du centre cameroun Il est de la famille des Moraceae encore appelé Abang ayant pour densité en $H=12\%=0,65$ (moins lourde). Sa classe de durabilité est : très durable ; sa stabilité : moyennement stable ; sa mise en oeuvre est aisée malgré la présence de contre-fil ; dépôt decarbonate de calcium gênant. Il a un séchage moyennement long sans risque de déformation, ni de fente, il est nom impregniables.

Remarque : Surnommé chaîne d'Afrique ; aubier très fragile d'où la particularité d'exporter les grunes dès au bierées.

b- Aspect du bois. [williamson, 2000]

De couleur brun-jaune à brun-foncé, l'iroko dispose d'un aubier différencié blanchâtre extrêmement fragile de graines moyens à grossiers avec des reflets dorés, le bois peut présenter un léger contre fil sus dosse. Le bois possède un ramage de veines claires alors que sur quartier il aura un aspect rubané voire

noiré.



FIGURE 1.6 – Houppier d'iroko



FIGURE 1.7 – Fut d'iroko



FIGURE 1.8 – Section d'iroko

1.4.3 Cas du Sapelli

a) Informations techniques

Son nom scientifique est : *entavdrophragma cylindricum* et son pilote est : sapelli il est de la famille des méliacée encore appelé assise; Sapele (Roy ; unis) sa densité (H=12%) 0,68(mi lourd) on le retrouve le plus dans la région de l'est Cameroun est moyennement durable et durable peu présenter un problème si le bois n'a Pas libérer ses tensions pour le séchage, il est moyennement rapide avec risque élevé de déformation et aussi peu imprenable remarque : substitut du sapelli et du niangon dans certains cas odeur de cèdre a l'état sec avec une présence importante de grains d'orge sur les vieux bois.

b) Aspect du bois [Prt, 2011]

Brun rouge et brun violet, le sapelli est un bois pouvant présenter un léger contrefil et son aubier différencier est gris rosâtre à blanchâtre d'environ 7 à 10 cm d'épaisseur ; son grain varie de fin à moyen et la maille bien visible est en structure étagée le bois prend un aspect rubané sur quartier avec des reflets dorés.

c) Description de l'arbre

Le sapelli dispose d'épais contrefort mais peu développés son fût est généralement droit et cylindrique et peut atteindre 30 m de haut et 2,5m de diamètre ; l'écorce grisâtre s'écaille en petites plaques circulaires ,le houppier est constitué d'un feuillage principalement présent à la périphérie et dont les feuilles sont regroupées en touffe étoilées les feuilles caduques ont 5 à 9 paires de folioles les fruits sont des capsules en forme de cigare se détachant en 5 valves et libérant 15 à 20 graines ailés par capsules.



FIGURE 1.9 – Houppier du sapelli



FIGURE 1.10 – Fut du sapelli



FIGURE 1.11 – Section du sapelli

1.5 Mécanisme de production ou de transformation des résidus de bois en biodiesel

Notons qu'il existe deux principales voies de production du biodiesel :

- La voie biochimique qui permet principalement de produire les alcools à partir des résidus de bois elle 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 biocarbu-

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

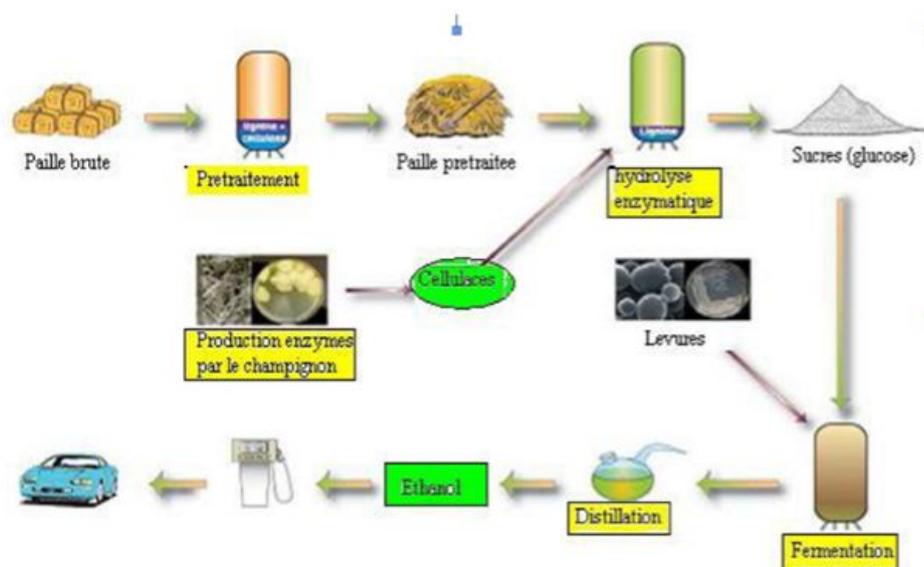


FIGURE 1.12 – Procédé de production d'éthanol de deuxième génération

- La voie thermochimique qui permet de produire à partir de la réaction de synthèse de Fischer-Tropsch (FT) principalement le biodiesel de bonne qualité sans soufre ; ni produits aromatiques et avec un indice de cétane supérieure à 74.

1.5.1 la voie thermochimique

a) la pyrolyse

Cette phase est encore appelée carbonisation ou dévolatilisation. Sous l'effet du chauffage entre 300 et 700 °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.

b) La combustion des matières volatiles (à l'oxygène) ou liquéfaction

Les matières volatiles produites lors de la phase de pyrolyse sont oxydées grâce à un apport d'air. Leur combustion permet d'atteindre des hautes températures dans le réacteur.

c) La gazéification du charbon de bois (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.

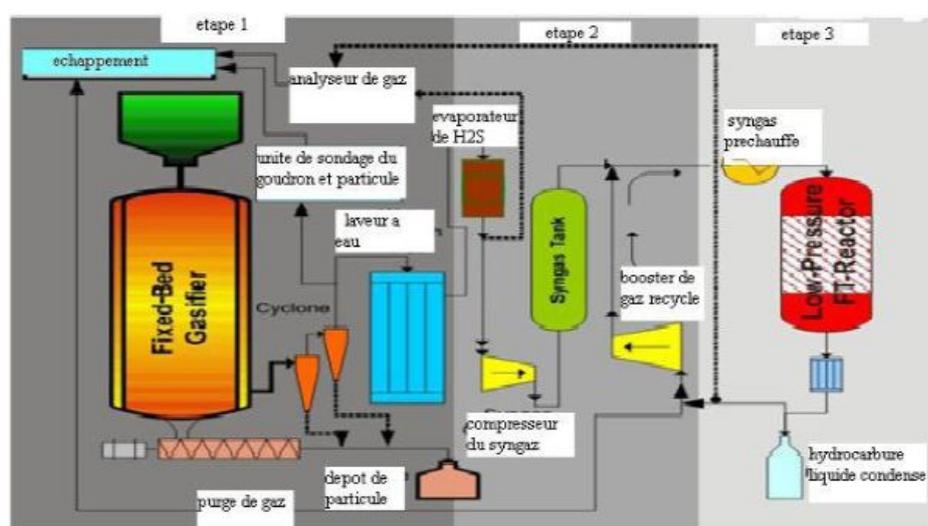


FIGURE 1.13 – Etapes de purification et du conditionnement du gaz produit [william,2008]

1.6 .

1.6.1 Avantage du biodiesel

Ils permettent de lutter contre l'effet de serre. Même si les véhicules les utilisant émettent du CO₂, celui-ci correspondant à celui de la plante à absorber dans l'atmosphère durant sa croissance : on dit que le cycle du carbone des agro carburants est « fermé » ou « neutre », pour autant que les systèmes d'exploitations agricoles soient durables et responsables. Mais le bilan n'est pas neutre à 100% car pour produire, récolter produire les agro carburants et les distribuer, il faut dépenser de l'énergie fossile.

- a) Les agro carburants émettent nettement moins d'autres polluants tels que le soufre, les suies, les particules fines, etc.
- b) ils permettent de diversifier sources de production d'énergies et de limiter notre dépendance énergétique face aux producteurs de pétrole le plus souvent situés dans des zones géopolitiquement sensibles.
- c) Issus d'un processus de production agricole locale, de transformation et distribution, les agro carburants permettent de maintenir et de gérer de nombreux emplois ruraux. Ces filières sont bénéfiques pour le monde agricole la recherche de la diversification de ses activités.

Et aussi les résidus de bois permettent à ce que tous les déchets de bois obtenus lors de l'abattage, lors du transport et enfin dans l'industrie de production soient mis à profit pour la fabrication du biodiesel qui lui aussi aide les populations pour le transport des personnes et des biens.

1.6.2 Inconvénients des biocarburants

- Le développement des agro carburants issus de cultures énergétiques peuvent être une menace pour les écosystèmes et les puits de carbone essentiels dans la lutte contre le réchauffement climatique. En effet, si la culture se fait aux

dépend des zones de savane ou de pâturages permanent, la disparition de ces puits de carbone conduirait à une augmentation des GES (gaz à effet de serre) et neutraliserait donc les bénéfices attendus des agro carburants.

- Les agro carburants issus des cultures intensives exercent malgré tout une forte pression sur l'environnement : utilisation d'engrais nocifs, polluants des sols et les réserves d'eaux, appauvrissement des sols, etc.

- Au niveau mondial la production d'agro carburants grande échelle peut induire de nombreux effets indirects préjudiciables pour les populations les plus pauvres tels que l'augmentation des prix des produits alimentaires, diminution des réserves en eau ou encore le déplacement des activités agricoles vers des zones plus fragiles comme les forêts pluviales et savanes. Ils ont aussi un impact négatif en ce sens qu'ils peuvent contribuer à la destruction de la couche d'ozone. La mondialisation « non contrôlée » des agro carburants pose également une question éthique importante : peut-on raisonnablement rouler au biocarburant fabriqué à partir des plantes (AYOUS, IROKO, SAPELLI etc..) quand une grande partie de la population mondiale souffre des changements climatiques ? Cette question est d'autant plus cruciale quand ces denrées sont issues des pays fortement touchés par le phénomène de changement climatique dû au gaz à effet de serre qui contribue à la destruction de la couche d'ozone.

1.7 Un mot sur le réchauffement climatique

Aujourd'hui l'énergie peut être perçue comme une contrainte ou comme un défi. Une Contrainte car, dans une époque où l'on assiste à l'émergence des grands pays du Sud, la disponibilité des ressources énergétiques et les problèmes environnementaux Peuvent court-circuiter le développement socio-économique à l'échelle planétaire, avec des conséquences sociales difficilement calculables. Un "défi", car la question énergétique et environnementale nous oblige à réfléchir aux choix fondamentaux de la société, comme le débat sur le "dévelop-

pement viable" le montre .Le document rend compte des initiatives pouvant favoriser l'adaptation aux Changements climatiques au niveau local. Il montre la diversité des effets des Changements climatiques, qui se révèlent complexes et variés, en fonction des Changements technologiques, économiques, sociaux et écologiques que rencontrent les divers groupes, régions et secteurs. Ce paragraphe présente une des méthodes permettant d'intégrer les risques climatiques dans les priorités de développement. Il Propose plusieurs études de cas sur l'adaptation aux changements climatiques au niveau local. Les effets du changement climatique constituent de très sérieux risques pour les pays, les écosystèmes vitaux et les secteurs comprenant l'agriculture, la sylviculture, la Santé, les activités économiques et la biodiversité locales. Outre les autres contraintes. Le changement climatique peut également exacerber d'autres graves défis locaux et régionaux tels que la pauvreté, le manque de soins médicaux, une distribution inéquitable des ressources, la résilience écologique en baisse et une insécurité énergétique. Ce document peut servir à identifier les effets liés au changement climatique et à apporter des réponses pour favoriser l'adaptation. Il vise à établir une évaluation de l'effet et de la vulnérabilité se basant sur une analyse de l'écosystème et à soumettre des choix d'adaptation sectorielle qui incombent aux décideurs. . Au travers d'exemples et de cas pratiques, on décrit la méthode pour faire face au changement climatique en tenant compte des autres priorités de développement et des écosystèmes, pour aider les décideurs à s'orienter d'avantage vers des voies de l'écodéveloppement et la résilience de l'écosystème.

- Premièrement : Puisque la conservation d'écosystèmes résilients et sains, la réalisation des priorités de développement et l'amélioration de la qualité de vie sont aussi importantes que l'adaptation aux changements climatiques, c'est en associant l'incitation à entretenir et à conserver les écosystèmes, les choix de développement, les actions et les capacités d'adaptation que nous pourrons faire face aux changements climatiques de manière efficace.

- Deuxièmement : Comprendre les liens entre les effets d'évolution du climat et ses conséquences au niveau local est plus difficile que sa représentation au niveau des schémas spatial, régional et planétaire .La participation des partenaires locaux est nécessaire pour fournir l'information au sujet des effets Du changement climatique et l'associer aux connaissances du développement local afin de créer des voies pour la promotion de la résilience et l'adaptation au changement climatique.

- Troisièmement : Envisager l'adaptation comme une composante de la gestion et du développement de l'écosystème exige un équilibre entre l'accent mis sur les risques biophysiques liés aux changements climatiques et sur les chances afin de résister au changement climatique, les politiques industrielles doivent présenter cinq caractéristiques-clés :

1. être proactives,
2. promouvoir la diversification industrielle,
3. mobiliser en priorité l'investissement dans les industries et les infrastructures viables écologiquement, incluant l'énergie à faible teneur en carbone et Renouvelable,
4. prendre en compte les conditions géophysiques locales et se baser sur les Principes d'une gestion adaptative et,
5. être conçues, mises en oeuvre et régies par des partenaires responsables regroupant le gouvernement, les partenaires commerciaux et la communauté.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre,une présentation générale des biocarburants a été faite .Un accent particulier a été porte sur ceux de deuxième génération Le prochain chapitre nous conduira a l'étude théorique des différents procédés de production du biodiesel

CHAPITRE II : MODELISATION ET CINETIQUE DES ETAPES DE PRODUCTION DU BIODIESEL

Dans ce chapitre nous allons présenter les modèles mathématiques permettant de décrire la thermochimie de production du biodiesel. Dans ce modèle la pyrolyse a pour objectif de décomposer la biomasse en une fraction solide et une fraction gazeuse. Dans ce modèle la liquéfaction a pour objectif la conversion de l'énergie chimique de la biomasse en chaleur, la gazéification a pour but de convertir un vecteur d'énergie peu maniable et a la mise en oeuvre difficile en un vecteur maniable et efficace, ce vecteur peut être le gaz un liquide ou l'électricité.

2.1 Les bioréacteurs

2.1.1 Définition

Le bioréacteur encore appelé fermenteur ou propagateur est une unité technologique dans laquelle on multiplie les micros-organismes (levure ; bacteries, etc) tant pour la production de biomasse en soi, que pour la production d'un métabolite ou encore la conversion d'une molécule d'intérêt. Il permet de récolter les informations de plus grande fiabilité.

2.1.2 Présentation d'un bioréacteur [Unasyuva, 2011]

Un bioréacteur est composé : d'une cuve ou enceinte en verre (pour les modèles de laboratoire) ou en acier inoxydable un bouchon si nécessaire pour

ne pas laisser passer l'air du milieu extérieur et celui du milieu intérieur une seringue avec cathéter pour injecter une solution. un système d'agitation comportant une ou plusieurs turbines selon leur taille des capteurs pour la mesure de la température (thermomètre), du pH-mètre de la concentration en oxygène dissouts(sonde oxymetrique). Le fermenteur permet de différencier le type de bois.

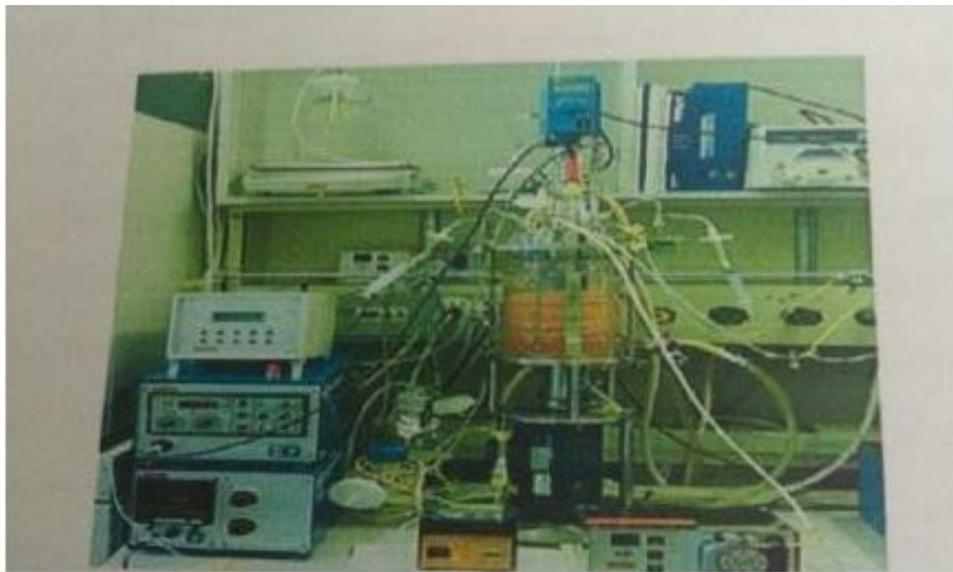


FIGURE 2.1 – Schéma d'un bioréacteur de laboratoire

2.1.3 Les réacteurs de gazéification

Un réacteur original d'étude de la gazéification de charbon de bois en lit fixe a été conçu et réalisé dans le cadre de ce travail. L'étape de pyrolyse du bois, relativement maîtrisée aujourd'hui, n'est pas considérée : seule l'étape de gazéification du charbon de bois, limitant en termes de cinétique dans un procédé étagé, est reproduite ici. L'atmosphère réactive, en termes de température et de composition des gaz, est précisément contrôlée. l'objectif de ce nouveau réacteur de recherche est de mieux localiser et caractériser les problèmes rencontrés lors de l'exploitation des procédés industriels à lit fixe. Ces problèmes sont en particulier :

- Une perte de charge importante à travers le lit,
- La formation de passages préférentiels au sein du lit et donc la diminution du rendement du procédé.

L'exploitation de ce réacteur expérimental apportera de plus des réponses concrètes quant au comportement et à l'optimisation du procédé, en permettant notamment :

- L'identification des zones dans lesquelles se produisent les différentes réactions de : gazéification à la vapeur d'eau, Gazéification au dioxyde de carbone, Combustion avec l'oxygène résiduel.
- La localisation des zones engendrant la perte de charge au sein du lit.
- La validation du modèle numérique de lit fixe continu en cours de développement.

Il pourra également permettre de tester des idées d'amélioration des procédés comme : l'ajout de solides poreux inertes dans le lit pour améliorer la circulation des gaz et limiter la perte de charge ;

l'injection de gaz oxydant (H_2O , O_2) au sein du lit pour réactiver la gazéification dans les zones "mortes" du lit.

Ce chapitre décrit ce nouveau réacteur expérimental et présente les premiers essais de mise au point et de validation du dispositif.

2.1.4 Réacteurs pilotes existants

Ces dernières années, différents réacteurs expérimentaux ont été développés pour l'étude de la gazéification de biomasse en lit fixe. Certains auteurs [Gautam, 2010] ont conçu des gazéificateurs à contre-courant ou "updraft". Cependant, la plupart des installations fonctionnent sur le principe du procédé à co-courant "soudowndraft" [Van der Drift, 2010] qui permet d'atteindre des taux de goudrons dans le gaz beaucoup plus faibles. Différents auteurs [Williamson, 2010] ont développé des modèles numériques sur la base des résultats obtenus sur leurs dispositifs expérimentaux. [Dasappa, 2010] ont conçu une installation re-

produisant à l'échelle 1/40 ème le réacteur développé par Mukunda et al. Afin de valider expérimentalement leur modèle de lit fixe. Cependant, ces modèles s'attachent plus à décrire le comportement global du lit fixe pendant sa gazéification que les phénomènes physico-chimiques et mécaniques qui s'y déroulent. Les résultats de couplage de réacteurs de gazéification avec des moteurs à combustion interne à l'échelle pilote sont relatés dans [Kristina ,2011]. A ce jour, deux installations basées sur le principe du procédé étagé ont été développées au Danemark, l'une par l'Université Technique du danemark (DTU) , l'autre par TK Energi. Les deux installations sont pourvues d'un pyrolyseur à vis, à l'issue duquel le charbon de bois est gazéifié dans un réacteur en lit fixe continu. Le "Viking Gasifier", développé par DTU, présente une puissance maximale en entrée de 70 kWth et intègre un système d'épuration des gaz. L'installation a été éprouvée par 2500 heures de fonctionnement couplé à un moteur à gaz. Gobel et al. ont également développé un modèle numérique de lit validé par les résultats obtenus, dont la vocation est d'aider au contrôle et à l'optimisation de l'installation. TK Energi a construit une installation de 400 kWth fonctionnant sur le même principe, et les résultats obtenus sont encourageants pour le passage à l'échelle industrielle. Une installation de ce type a même dernièrement été commercialisée au Japon.

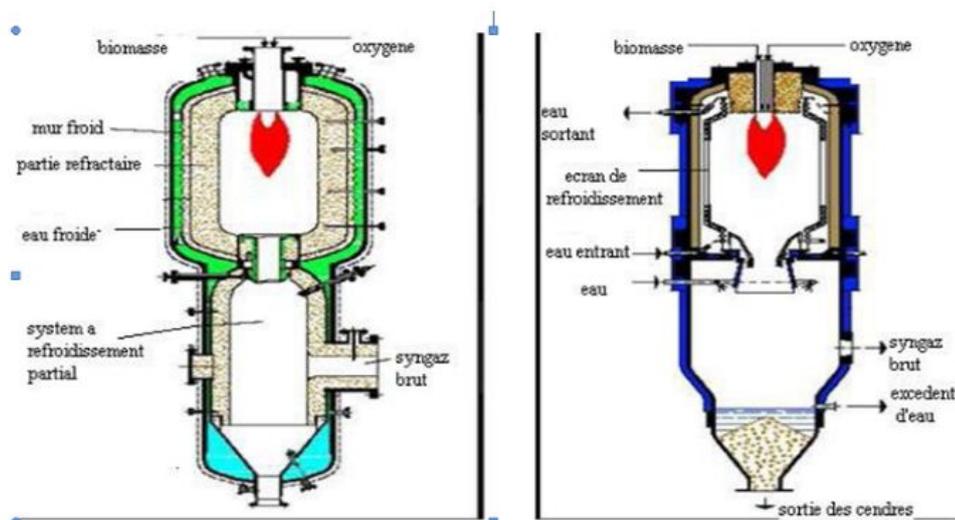


FIGURE 2.2 – Réacteur à lit Entraîne

2.1.5 Caractéristiques et performances d'un réacteur étagé

Les conditions opératoires des réacteurs étagés existants sont à la base du dimensionnement de notre installation pilote. Les grandeurs qui ont constitué le cahier des charges de notre réacteur sont données ci-dessous. Dans les procédés étagés existants, la température atteinte dans la zone de combustion des matières volatiles est supérieure à 1100 °C. Le pourcentage de vapeur d'eau dans l'atmosphère réactive est de 20 à 30% en fonction de l'humidité du bois utilisé. Le débit de char par unité de section observé sur deux procédés étagés en fonctionnement nominal s'étale entre 25 et 75 kg.m².h⁻¹. La hauteur du lit de char est typiquement comprise entre 50 et 100 cm. La perte de charge observée sur le lit fixe continu est de 150 à 200 mbar. Dans ces conditions de fonctionnement, Gobel et al. [GTZ Est cameroun,2006] produisent un gaz composé à 23% de H₂ et à 18% de CO, tandis que TK Energie obtiennent un gaz composé à 27% de H₂ et à 17% de CO. TK Energie annoncent un taux de conversion des résidus solides en sortie du procédé de 90%. Cependant, cette valeur n'a pas été confirmée et nous semble surévaluée compte tenu des problèmes rencontrés

dans la conduite du procédé. D'autre part, les taux de goudrons observés dans les procédés étagés sont très faibles grâce au passage des gaz dans la zone de combustion des matières volatiles à haute température.

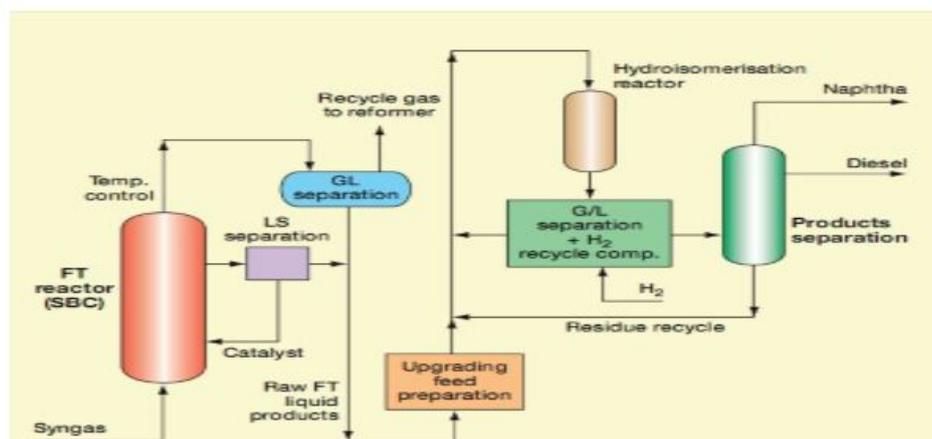


FIGURE 2.3 – Différentes étapes pour améliorer le liquide FT en biodiesel. Source : [Gassel,2002]

2.1.6 Développement d'un nouveau réacteur

Les gaz réactifs traversent alors le lit sans réagir avec le char, diminuant drastiquement le rendement de la gazéification. Les travaux de TK Energie sur leur installation de 400 kWth ont mis en évidence l'importance de la perte de charge dans la maîtrise du procédé. En pratique, quand la perte de charge dépasse un certain seuil, on opère un décentrage. Ceci se répercute sur le taux de carbone résiduel dans les cendres (loin d'être nul), et donc sur le rendement énergétique de l'installation. Ainsi, c'est la perte de charge qui guide la conduite du procédé, et donc la hauteur du lit, le temps de séjour des particules et leur taux de conversion.

Les réacteurs expérimentaux existants sont pour la plupart basés sur une approche "procédé" et non sur une approche "recherche". On comprend l'intérêt d'un nouveau réacteur de recherche qui permettra d'identifier les mécanismes

limitant et donc de proposer des solutions pour débloquent les verrous technologiques. Dans un réacteur de gazéification étagé, l'atmosphère réactive, en termes de température et de composition des gaz, résulte de la combustion des matières volatiles formées pendant la pyrolyse du bois. Dans notre réacteur expérimental, les produits de la combustion des matières volatiles sont reproduits artificiellement par des brûleurs au gaz. D'autre part, le réacteur est directement alimenté en charbon de bois.

2.1.7 Le Réacteur en Lit Fixe Continu

Le réacteur, baptisé CFiBR ("ContinuousFixedBedReactor"), a été construit par l'entreprise Femag Industries. Le cœur du réacteur est constitué d'un tube et l'atmosphère de gazéification régnant dans un procédé étagé (i.e. La température et les gaz réactifs (H₂O et CO₂)), est simulée par les fumées de combustion générées par deux brûleurs au propane. Les débits de propane et d'air (excès d'air) sont précisément contrôlés par deux débitmètres/régulateurs massiques Brooks de types 5851 S et 5853 S respectivement (M). Ils peuvent fonctionner jusqu'à 3 bar de pression relative et permettent de conserver un débit de gaz constant quelle que soit la pression dans le réacteur.

2.2 Cinétique et modélisation sur l'équilibre

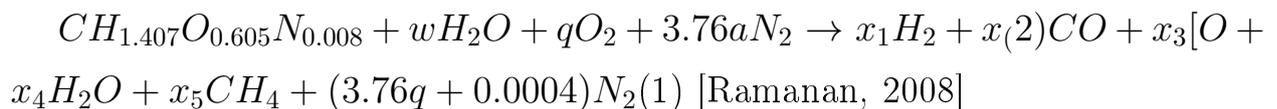
2.2.1 Généralités

La formule chimique des résidus forestiers secs est basée sur un seul atome de carbone est donnée par : $[CH_{1.407}O_{0.605}N_{0.008}]$ et l'équilibre de la modélisation est ressortie sur ces formules de base pour la prédiction des caractéristiques de gazéification, telles que les suppositions suivantes faites dans l'approche de la modélisation sont :

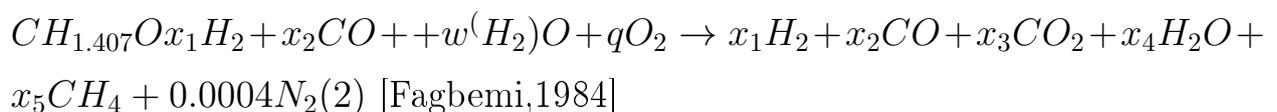
- Les réactions procèdent de façon adiabatique ;
- L'azote présent soit dans le combustible, soit dans l'air est inerte ;

- La cendre est inerte et n'est impliquée dans aucunes réactions, soit comme une espèce chimique ou comme un catalyseur ;
- Les lois de gaz idéal sont validées ;
- Pas de gradient de température radiale ;
- 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 ;
- 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.

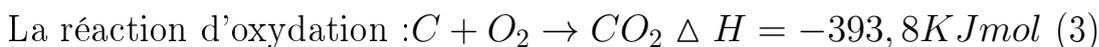
2.2.2 Équation de la réaction globale des résidus forestiers sec avec l'air



Et avec l'oxygène ;



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

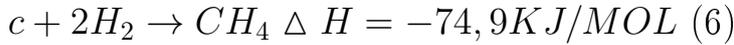


La réaction de gazéification a la vapeur :



La réaction de BOUDOURD : $C + CO_2 \rightarrow 2CO \Delta H = 172.6KJ/MOL$ (5)

La réaction de méthanisation



La reaction de water gas shift (wgs) :



Par une simple remarque, la réaction de wgs et la réaction de méthanisation peuvent être considérées comme étant en équilibre avec pour constants d'équilibre respectif :

$$K1 = ([P(CH_4)])/([P(H_2)]^2); K2 = ([P(CO_2)])/([P(CO)]([P(H_2)])/([P(H_2O)]))$$
 (8)

Pour prédire les constituants du gaz produit, l'ensemble des six équations formulées par l'équilibre des différents constituants impliqués sont à évaluer :

$$\text{Equilibrage du carbone } 1 = x_2 + x_3 + x_5$$
 (9)

$$\text{Equilibrage de l'hydrogène } 1.407 + 2w = 2x_1 + 2x_4 + 4x_5$$
 (10)

$$\text{Equilibrage de l'oxygène } 0.605 + w + 2q = x_2 + 2x_3 + x_4$$
 (11)

$$\text{Constante d'équilibre à partir de la méthanisation. } K1 = x_5/(x_1)^2$$
 (12)

Constante d'équilibre à partir de la méthanisation.

$$K2 = x_3^3/(x_2^2)x_1/x_4$$
 (13)

$$\text{La teneur en eau dans la biomasse est donnée par : } te = 100 \times 18w/((n \times M(rb) + 18w))$$
 (14)

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 :

A l'air

$$H_frb^0 + w(H_frb^0 + H_frb^0) + q \times H(fO_2)^0 + 3.76q \times H(fN_2)^0 = x_1 \times H(fH_2)^0 +$$

$$x_2 \times H_f CO^0 + x_3 \times H(fCO_2)^0 + x_4 \times H(fH(2^O))^0 + x_5 \times H(fCH_4)^0 + T(x_1 \times C_{PH}(2^O)) + x_2 \times C_p CO + \Delta T(x_3 \times C(pCO_2) + x_4 \times C(pH(2^O)) + x_5 \times C(pCH_4) + (3,76q + 0.004) \times C(pN_2))$$

A L'oxygène :

$$H_frb^0 + w(H(fH(2^Ol))^0 + H(fH(2^Ov))^0) + q \times H(fO_2)^0 = x_1 \times H(fH_2)^0 + x_2 \times H_f CO^0 + x_3 \times H(fCO_2)^0 + x_4 \times H(fH(2^O))^0 + x_5 \times H(fCH_4)^0 + \Delta T(x_1 \times C(pH_2) + x_2 \times C_p CO + x_3 \times C(pCO_2)) + \Delta T(x_4 \times C(pH(2^O)) + x_5 \times C(pCH_4) + 0.004 \times C(pN_2))$$

La valeur de l'enthalpie du combustible H_frb^0 peut être déterminée à partir des formules empiriques rencontrées dans la littérature. La chaleur de formation des différents gaz peut être donnée à partir des tables thermochimiques de Janaf et la variation d'enthalpie ΔH pour la constitution du gaz est donnée dans la littérature. La dépendance de la chaleur spécifique sur la température est donnée par différentes équations empiriques dont la version la plus simplifiée est :

$$C_p m = R \times [a + b \times T_m + c \times (4 \times T_m^2 + T_i \times T) + d/(T_i \times T)] \quad (17)$$

Cette équation montre que la constante d'équilibre k est une fonction de la température et peut être exprimée :

$$RT \ln k = \Delta G^0; d \ln k / dT = \Delta H^0 / RT^2 \quad (18)$$

Les valeurs de la constante de la capacité calorifique et les valeurs standards de formation de Gibbs pour différentes compositions de gaz impliquées sont retrouvées dans la littérature. La chaleur de formation est explicitement une fonction de la température et d'où on peut écrire :

$$\ln k = \int \Delta H^0 / RT^2 \times dT + 1 \quad (19)$$

$\Delta H^0 / R$ Peut également être égalé comme si dessous :

$$\Delta H^0/R = J/R + \Delta aT + \Delta bT^2/2 + \Delta cT^3/3 - \Delta d/T \quad (20)$$

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

$$\ln k = (-J)/RT + \Delta a \ln T + \Delta bT/2 + \Delta cT^2/6 + \Delta d/2T^2 + I \quad (21)$$

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

$$\Delta G^0 = J - R \times T(\Delta a \ln T + \Delta bT/2 + \Delta cT^2/6 + \Delta d/2T^2 + I) \quad (22)$$

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'équilibres sont requises pour déterminer les constantes d'équilibre et permettent d'évaluer les valeurs Δa , Δb , Δc et Δd suivant les équations suivantes :

Pour le cas de la réaction 2, WGS

$$\Delta a = a_{(H_2)} + a_{(CO_2)} - a_{(H_2O)} - a_{CO} \quad (23)$$

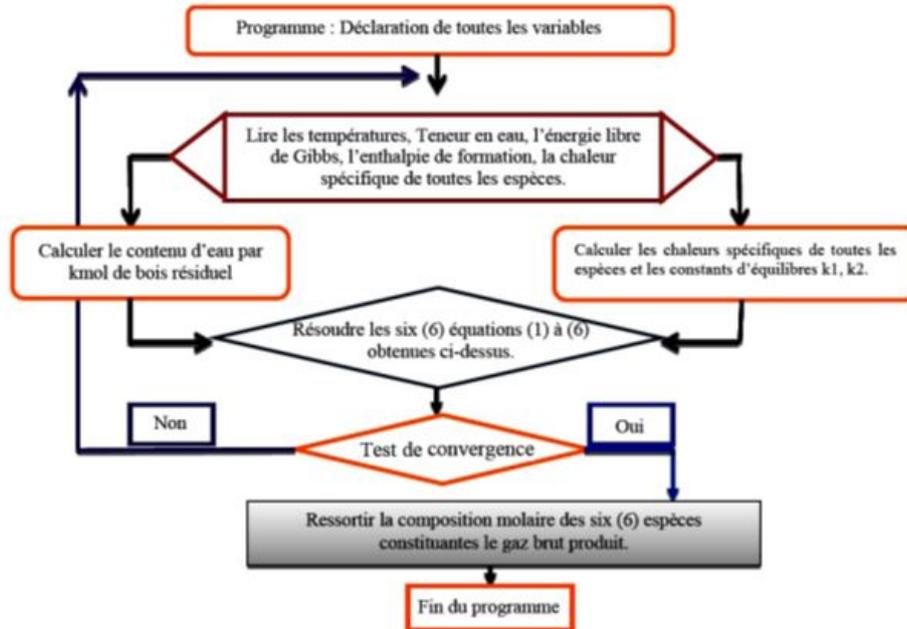
$$\Delta b = b_{(H_2)} + b_{(CO_2)} - b_{(H_2O)} - b_{CO} \quad (24)$$

$$\Delta c = c_{(H_2)} + c_{(CO_2)} - c_{(H_2O)} - c_{CO} \quad (25)$$

$$\Delta d = d_{(H_2)} + d_{(CO_2)} - d_{(H_2O)} - d_{CO} \quad (26)$$

L'application de ces équations relève la constante d'équilibre pour K_2 similairement K_1 peut être résolu 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 1 présente l'organigramme du programme écrit en fortran 90, nous renseigne en détail sur la procédure de calcul pour le modèle d'équilibre thermodynamique de la réaction de gazéification des résidus forestiers.

2.2.3 Organigramme



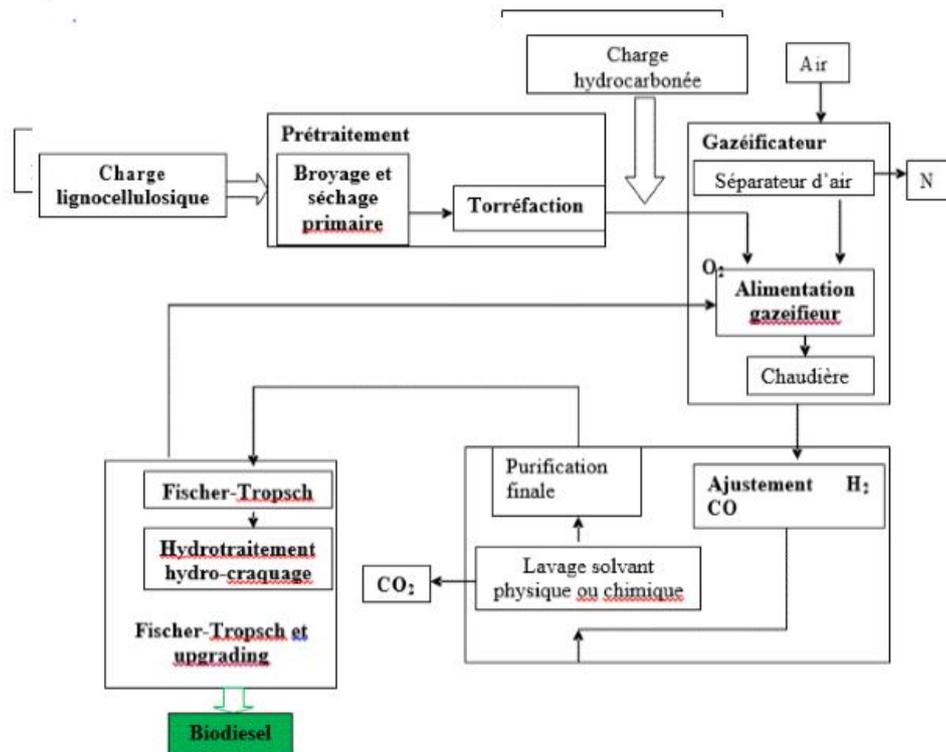


FIGURE 2.4 – Différentes étapes de production du biodiesel ft a partir des résidus de bois (source : IFP,2000)

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre il était question pour nous de modéliser la cinétique des étapes de production du biodiesel Notons que, de l'équation générale des résidus forestiers en passant par la caractéristique optimale jusqu'à l'organigramme, elle nécessite un grand nombre de grandeur physique comme l'enthalpie, l'entropie et même l'énergie interne libre et aussi le contenu d'eau par kilo mole de bois résiduel.

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous allons simuler les principales étapes de production de biodiesel de deuxième génération par voie thermo-chimique (pyrolyse, liquéfaction directe et gazeification) à partir des résidus de bois en travaillant sur les hypothèses de pré-traitement de la biomasse lignocellulosique s'est fait sans perte de matière sèche. Les courbes obtenues ci-dessous estimant l'influence de la teneur en eau sur la composition du gaz ainsi que d'autres courbes tiennent lieu de production.

Le biodiesel de deuxième génération est un biocarburant propre et de meilleure qualité proche du 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 (Fischer-Tropsch et en favorisant la réaction de WGS (Fe-LTFT(in-situWGS)), 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 bar pour une meilleure sélectivité des hydrocarbures et ainsi que la production de meilleur carburant [Behrang, 2005]. Ceci nous amenant à comprendre qu'une étude minutieuse de cette étape de

production du gaz est importante. C'est ainsi qu'à la première partie de ce chapitre, 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) . A la deuxième partie 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. A la troisième partie nous ferons des observations et des interprétations des résultats. La formule chimique typique des résidus forestiers sec obtenue à partir du tableau (3.1) et basée sur un seul atome de carbone est donnée par : $CH_{1.407}O_{0.605}N_{0.008}$. Et l'équilibre de la modélisation est ressorti sur ces formules de base pour la prédiction des caractéristiques. Les solutions obtenues par le programme nous permettent de tracer (avec Excel) les courbes des différentes proportions molaires d'espèces en fonction de la teneur en eau contenue dans un kmol du combustible à une température de réaction de 800 °C dans la figure (3.1) suivante :

3.2 Influence de la teneur en eau sur la composition du gaz

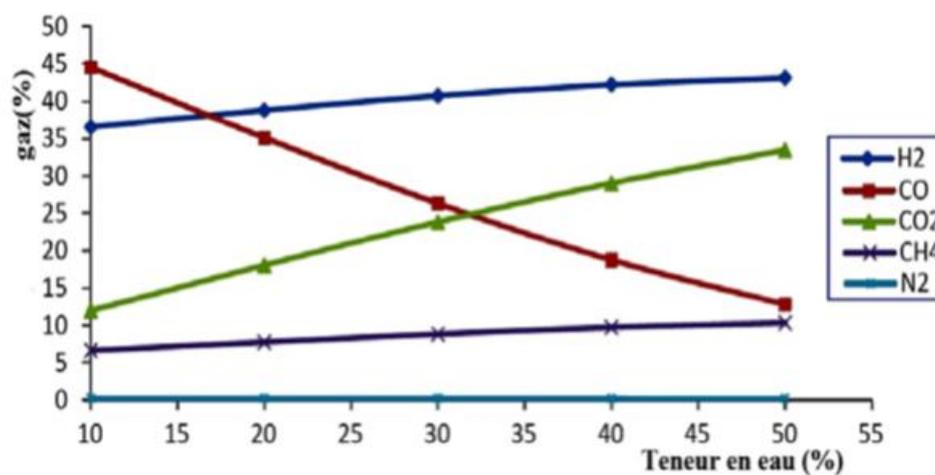


FIGURE 3.1 – : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 800 °C (gazéifiée à l'air)

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 H_2 , CO , CH_4 sont importantes.

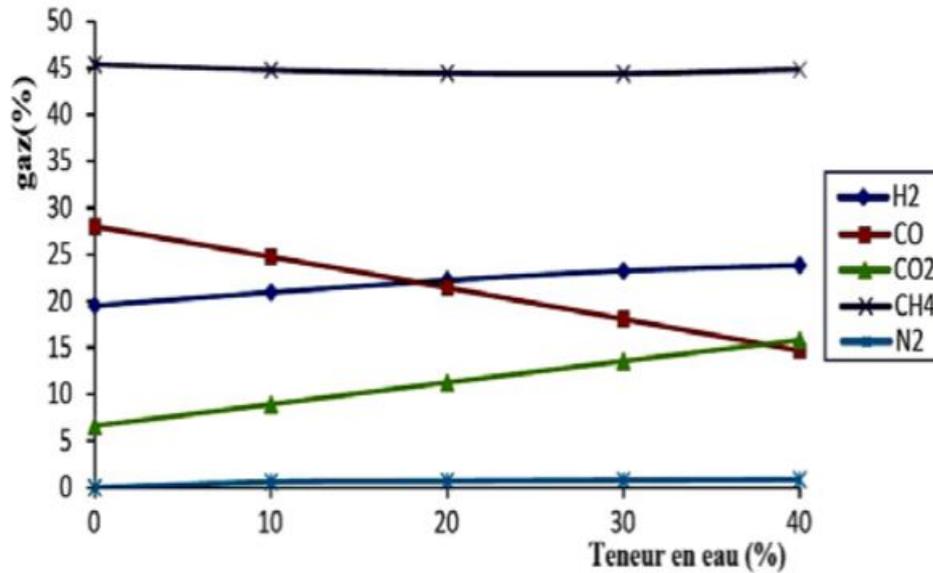


FIGURE 3.2 – Pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 900 °C (gazéifiée à l'oxygène)

Le modèle d'équilibre écrit ci-dessus est utilisé pour la gazéification des résidus de bois, les résultats obtenus par la gazéification à l'air sont présentés dans la figure (3.2) ci-dessus. La figure (3.2) montre l'effet de la teneur en eau dans le bois sur la composition du gaz brut produit quand le lit fonctionne à 8000 °C. Il peut être observé à partir de la figure (3.2) 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 en 2005]. ont utilisé le ficus et ont obtenu les variations des compositions des espèces (dans le gaz brut produit) en fonction de la teneur en eau comme suit :

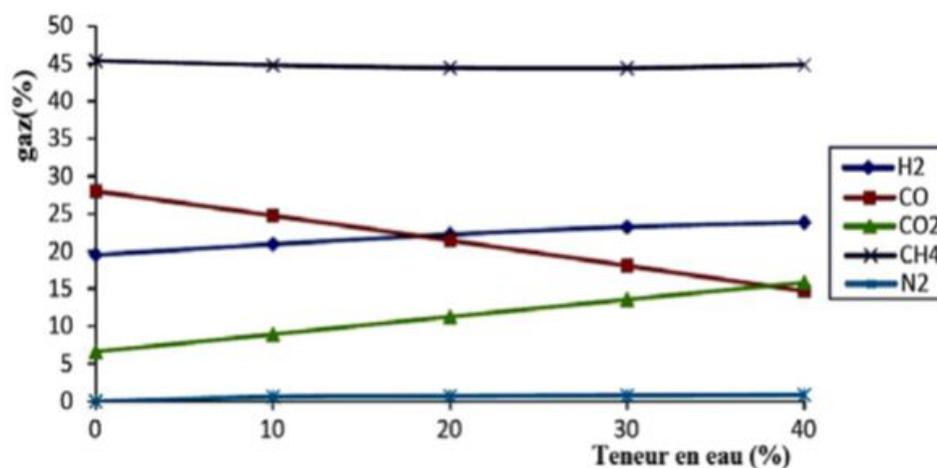


FIGURE 3.3 – Effet de la teneur en eau dans le bois sur la composition du gaz a 800 °C

Tableau III.0.4: Caractéristiques du gaz brut obtenus à 1073 °K et à 10% de la teneur en eau.

Pourcentage des espèces	Gazéifiées à l'air	Gazéifiées à O
Dihydrogène (%)	21.95	39.72
Monoxyde de carbone (%)	25.60	48.25
Dioxyde de carbone (%)	8.73	10.56
Méthane (%)	1.30	1.22
Diazote (%)	42.40	0.24
Rapport H ₂ /CO	0.85	0.82
PCS _{gazbrut} (MJ/Nm ³)	6.58	11.63

(Source :[GTZ, 2008])

3.3 Influence de la température sur la composition du gaz

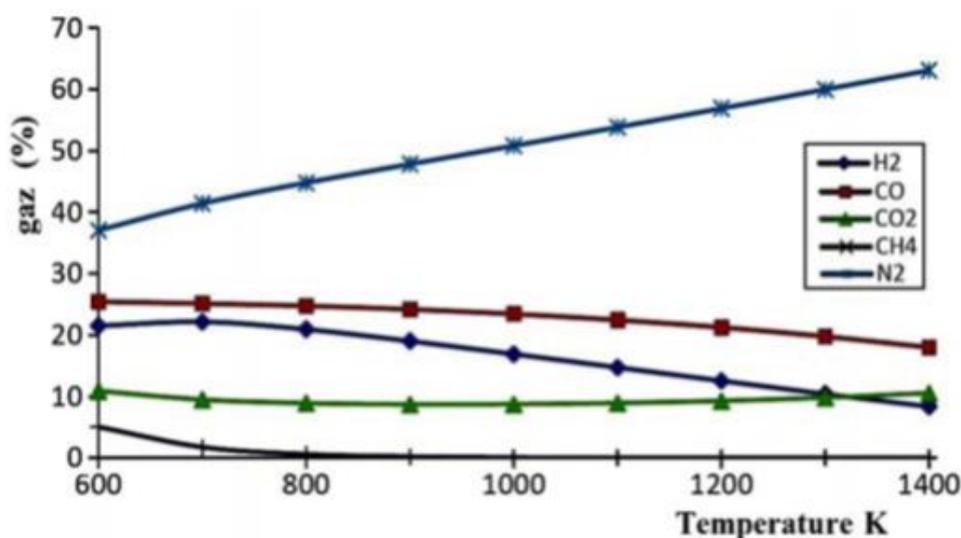


FIGURE 3.4 – Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifié à l'air)

Ici on observe la décroissance des fractions volumiques de CO, H₂, CH₄ avec la croissance de la température, cette décroissance est due à la croissance de la dilution du gaz brut par le diazote N₂ à des températures élevées. A l'air : Le gaz brut obtenu est 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 obtenir 0.314 Nm³ d'oxygène) pour produire un volume de 2.79 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 étant dilué du diazote et moins énergétique nous voyons qu'il est préférable d'utiliser le gaz obtenu lors de la gazéification à l'oxygène pour produire le biodiesel à partir de la réaction de synthèse FT. Néanmoins, on utilise le gaz dilué du N₂ pour produire le liquide FT avec pour objectif de réduire le coût de la production. Dans le 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 25-27%.

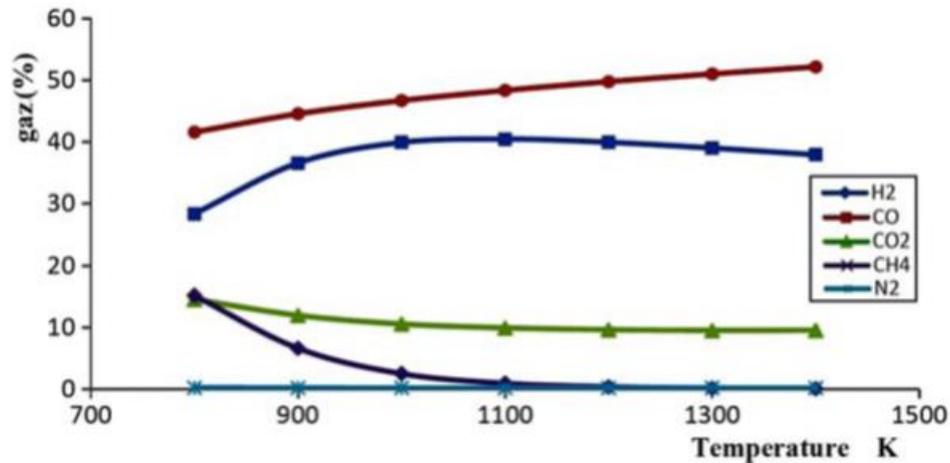


FIGURE 3.5 – Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifié à l'oxygène)

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 de préférence utiliser la gazéification à oxygène ensuite 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 H₂/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 coûteuse. 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 (3.5) 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.

Tableau III.0.5: Concentration maximum permise des impuretés dans le syngaz.
[Van der Drift, 2006]

Impuretés	Spécifications
H ₂ S+CO+CS ₂	< 1ppm
NH ₃ +HCN	< 1ppm
HCl+HBr+HF	< 10ppb
Métaux alcalins	< 10 ppb
Particules (cendre, suie)	Presque complètement retirées
Composants organiques (goudrons)	Non condensable : en dessous du point de Saturation
	< 1ppm
Composants hétéro organique (S, N, O)	

Nous constatons premièrement que le gaz n'est pas dilué dans le diazote N₂ 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). Gopal Gautam [5] suite à ces travaux de recherche a travaillé sur ce domaine et a obtenu les résultats à partir de la gazéification à l'air de la figure 7 suivante :

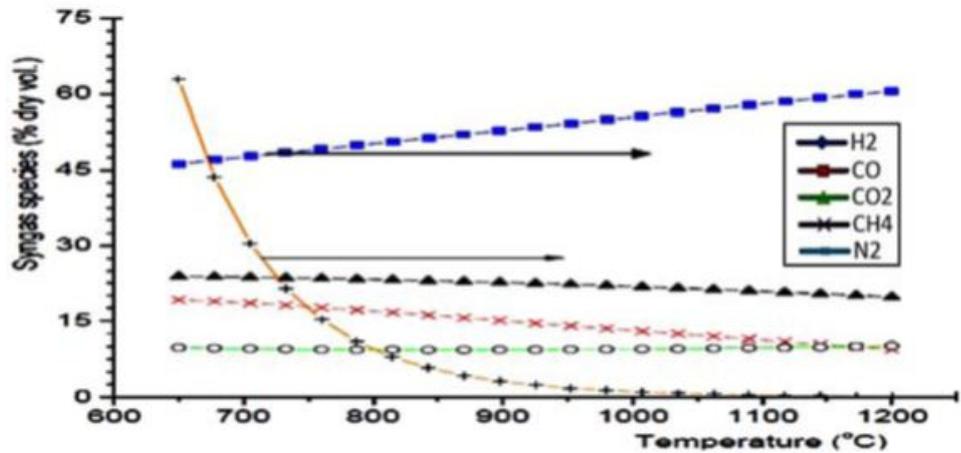


FIGURE 3.6 – Variation des fractions molaires en fonction de la température

3.4 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%. A cette température, on favorise le craquage des goudrons dans le gaz brut. Le rendement du gaz produit dans le réacteur de gazéification est donné par l'expression suivante :

$$n_{gazeification} = (V_{gaz} \times SPCS_{gaz} \text{ par kg de bois}) / (m(r.bois) \times PCS(moyr.bois))$$

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

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

Tableau 3 .1 : caractéristique du gaz brut obtenu à 1073k et à 10% de la teneur en eau

Pourcentage des espèces	Gazéifiées à l'air	Gazéifiées à l'oxygène
Dihydrogène (%)	21.95	39.72
Monoxyde de carbone (%)	25.60	48.25
Dioxyde de carbone (%)	08.75	10.56
Méthane (%)	01.30	01.22
Diazote (%)	42.40	0.24
Rapport H ₂ /CO	0.85	48.25
PCS gaz brut (MJ/Nm ³)	06.58	11.63

(Source :[GTZ, 2008])

En connaissant les PCS gaz, (i= H₂, CO, CH₄, CO₂, N₂), on trouve que A l'air, le PCS gaz par kg de bois = 6.546 MJ/Nm³ , à l'oxygène, le PCS gaz par kg de bois= 11.63 MJ/Nm³. Sachant que le PCSmoyr.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 :

A l'air- n gazéification= 30.72% , à l'oxygène- n gazéification= 58.66 % (27)

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 de préférable utiliser la gazéification à oxygène et ensuite 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 H₂/CO et d'augmenter l'efficacité énergétique du gaz produit pouvant être directement utilisé pour la réaction de synthèse tout en contrôlant les proportions de toutes les espèces dans le gaz.

Le rendement (n purification) de cette étape est généralement compris entre 74-76% [Gautam, 2006]. Le gaz purifié et conditionné pour respecter les spéci-

fications des catalyseurs FT est une fois introduit dans le réacteur FT.

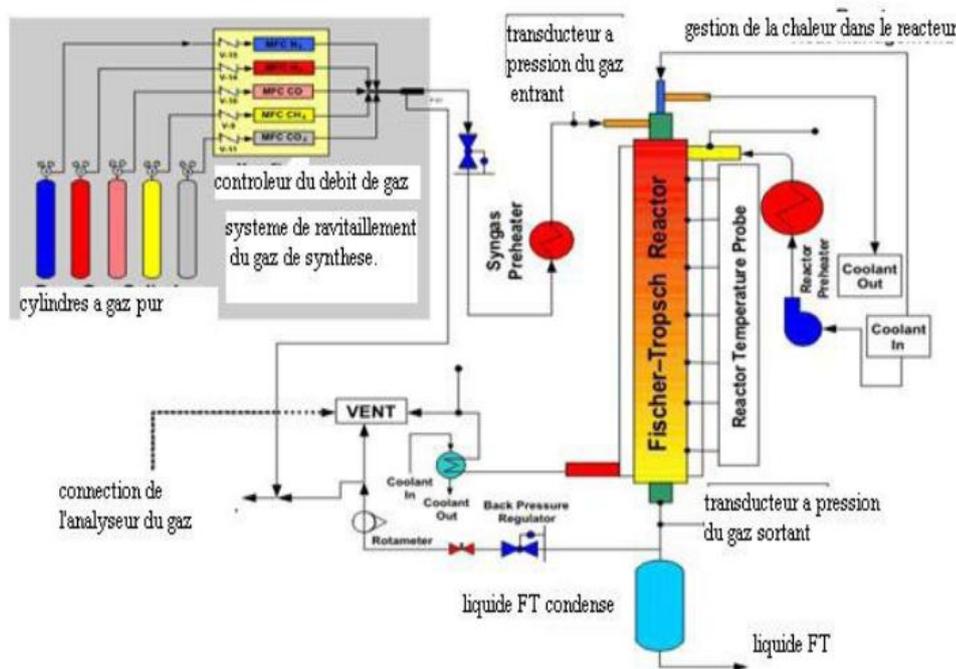
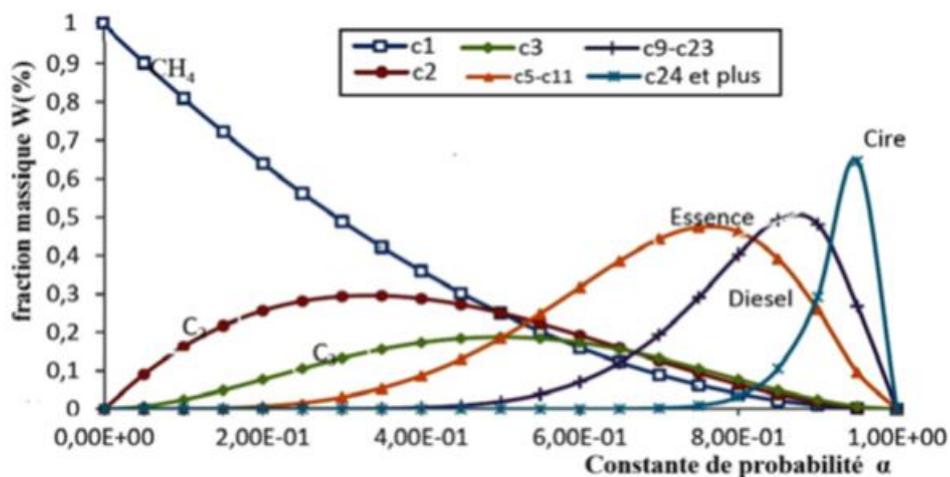


FIGURE 3.7 – Schématisation du passage du gaz au liquide FT en situation expérimentale [William, 2008]

- Comparaison des rendements des produits réaction de synthèse Fischer-Tropsch (SFT)

Dans le réacteur FT, les produits sont caractérisés par la distribution d'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 la valeur de α pour laquelle la production du biodiesel est plus probable à partir de cette distribution. Nous observons que pour une valeur de $\alpha = 0.89$, correspond à un maximum de Sélectivité en diesel.

FIGURE 3.8 – 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.

3.5 Rendement du biodiesel

Avec pour objectif la production du biodiesel, les conditions du processus peuvent être sélectionnées pour produire une quantité maximale de produit dans la coupe diesel. Cependant le rendement n_{FT} du biodiesel est dans ce cas limité à approximativement les 40%. Un rendement élevé du biodiesel peut être obtenu, quand la synthèse FT est optimisée vers la production des cires, et la sélectivité maximale du biodiesel qui peut être produit à partir du syngaz est approximativement $n_{FT} = 70\%$ (efficacité énergétique du syngaz au liquide en général).

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

$$n_{global-i} = n_{gazification} \times n_{purification} \times n_{FT} \quad (28)$$

Qui nous donne les valeurs respectives $n_{global-N.O.} = 15.19\%$ et $n_{global-O.} = 29.52\%$, ($i = N.O.$: 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.

$$V_{(biodiesel-i)} = n_{(globa-i)} \times (m_r \text{bois} \times PCS_{m \text{oyrbois}}) / (100 \times PCS_{(netbiodiesel)})$$

Pour un kilogramme de résidus de bois, on trouve respectivement Biodiésel n N.O = 0.110 l et Biodiésel n O = 0.214 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. A 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 3.2: 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
	Ten. 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
	H ₂ (%)	38.91	38.42	38.99	39.53
	CO ₂ (%)	10.17	10.05	9.67	8.67
	CH ₄ (%)	0.23	0.22	0.23	0.24
	N ₂ (%)	0.24	0.24	0.24	0.24
	PCS gaz(%)	11.41	11.42	11.47	11.60
	H ₂ /CO	0.77	0.75	0.76	0.77
	Volume en Nm ³	1.64	1.63	1.64	1.66

Biodiesel	volume pour une tonne	107.40	106.79	108.73	112.17
	Volume amélioré	208.66	207.48	211.26	217.93
	PCS (MJ/l)	40.52	40.52	40.52	40.52

FIGURE 3.9 – Récapitulatif de la composition du gaz de synthèse, la quantité de biodiesel produit à partir des différentes formes des résidus de bois [ZAINAL, 2011].

- Perspectives de la synthèse Fischer-Tropsch

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, 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 ultrapropres 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 exportateur 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 dollar/bar il qui rend la production des carburants synthétique 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].

3.6 Confrontation avec les résultats expérimentaux et validation

Le modèle a été confronté aux résultats expérimentaux obtenus pour une particule de bois isolée suspendue dans le réacteur de "macro-TG" et gazéifiée dans un mélange H₂O-N₂. Des simulations numériques ont été réalisées dans les conditions opératoires de chacun des tests de gazéification effectués, répertoriées dans le Tableau 4-1. Les corrélations et les valeurs numériques des propriétés physiques utilisées dans le modèle sont regroupées en annexe.

	température (°C)	P_{H_2O} (atm)	diamètre initial (mm)	temps de calcul
<i>conditions opératoires de référence</i> →	<i>930</i>	<i>0,2</i>	<i>10</i>	<i>3 min</i>
	830			12 min
	<i>930</i>	0,2	10	<i>3 min</i>
	1030			3 min
		0,1		10 min
	<i>930</i>	<i>0,2</i>	10	<i>3 min</i>
		0,4		3 min
			<i>10</i>	<i>3 min</i>
	<i>930</i>	0,2	20	<i>3 min</i>
			30	10 min

FIGURE 3.10 – Simulations réalisées avec la réaction de gazéification à la vapeur d'eau

Remarques : - Seule la réaction de gazéification à la vapeur d'eau a été activée pour la confrontation avec les résultats expérimentaux.

- Dans toutes ces simulations, une valeur de 0,14 m.s a été retenue pour la vitesse des gaz autour de la particule.
- Pour plus de commodité dans les notations, les billes de bois sont référencées par leur taille avant pyrolyse.
- Les valeurs en italique rappellent les conditions opératoires de référence autour desquelles nous avons fait varier les paramètres un à un.

Le temps de calcul pour chacune des simulations a également été porté dans le Tableau 4-1. On note que la résolution numérique s'accomplit en 3 à 12 min en fonction des conditions opératoires retenues.

3.7 Détermination des paramètres cinétiques de la réaction de gazéification à la vapeur d'eau

Nous avons déterminé les paramètres cinétiques propres au charbon de bois utilisé dans ce travail. En effet, utiliser des valeurs existantes poserait des problèmes car les paramètres relevés dans la littérature montrent une disparité importante (Tableau 2-2). Les paramètres physiques ont été ajustés par "tâ-

tonnement" pour reproduire le plus fidèlement possible l'ensemble des courbes expérimentales. Les résultats obtenus sont présentés sur les Figures 3.10 à 3.12, qui représentent l'évolution du taux de conversion du bois en fonction du temps pour diverses conditions expérimentales. Les résultats du modèle sont confrontés aux résultats expérimentaux. On notera que seul le début de la courbe (jusqu'à $X=0,1$) a servi au calage des paramètres cinétiques. Au final, les valeurs des paramètres cinétiques.

Les simulations à différentes températures (Figure 3.10) reproduisent correctement la sensibilité de la réaction de gazéification à ce paramètre.

Le modèle traduit convenablement l'influence de la pression partielle de vapeur d'eau sur la réaction (Figure 3.11), avec toutefois un écart plus significatif pour les faibles pressions partielles. La simulation numérique reste malgré tout comprise dans l'intervalle d'erreur des courbes expérimentales.

Sur la Figure 3.8, les simulations pour les particules de diamètre initial avant pyrolyse de 10, 20 et 30 mm de diamètre initial confirment l'existence d'une limitation de la réaction par les transferts. En effet, la vitesse de gazéification décroît quand le diamètre de la particule augmente. Pour des particules de 7,05 mm de diamètre (10 mm avant pyrolyse), l'impact des transferts est faible mais pas négligeable. En effet, des simulations ont montré que c'est pour des particules de diamètre inférieur à 1 mm environ que la réaction n'est plus limitée par les transferts. Ce résultat est cohérent avec ceux trouvés dans la littérature : il est compris entre la valeur prédite par Dasappa et al., 2007, et celle prédite par Ergun, 1,8 mm.

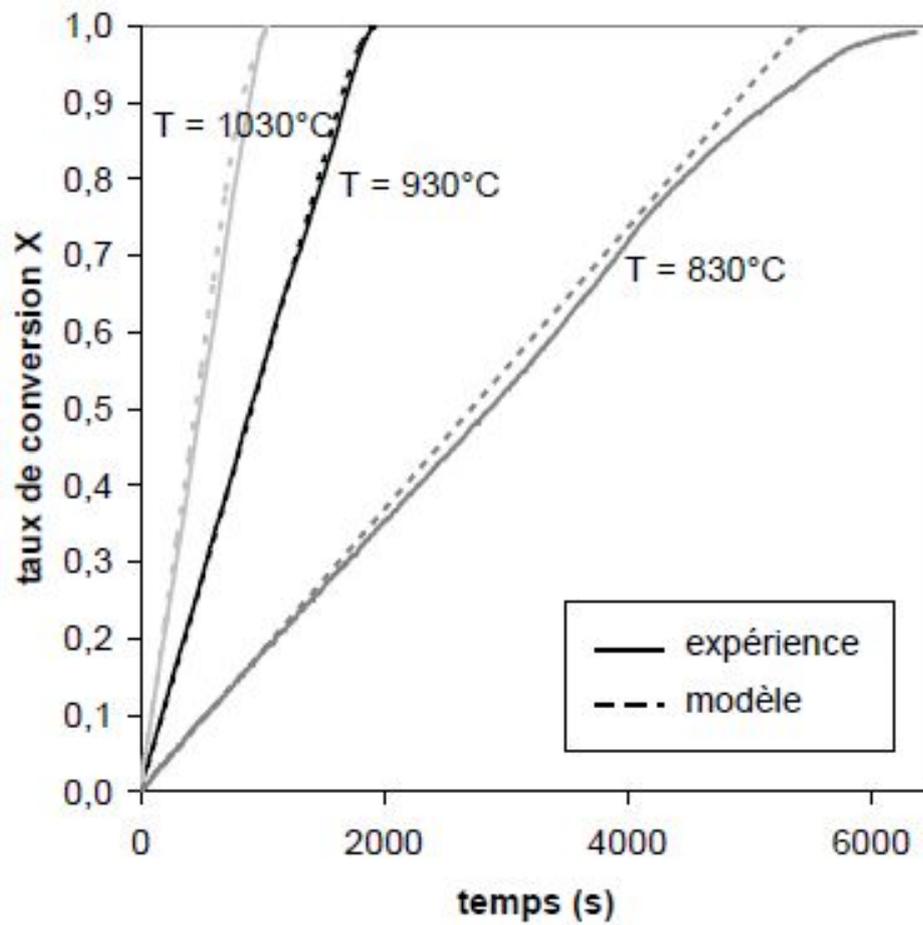


FIGURE 3.11 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour différentes températures

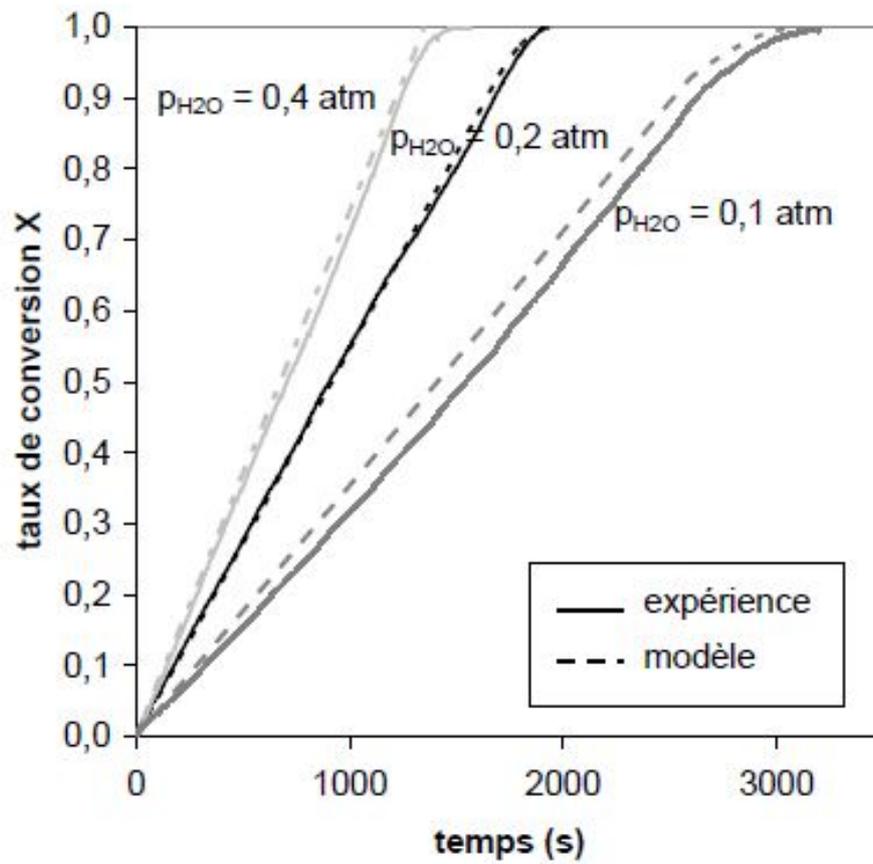


FIGURE 3.12 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour différentes pressions partielles de vapeur d'eau

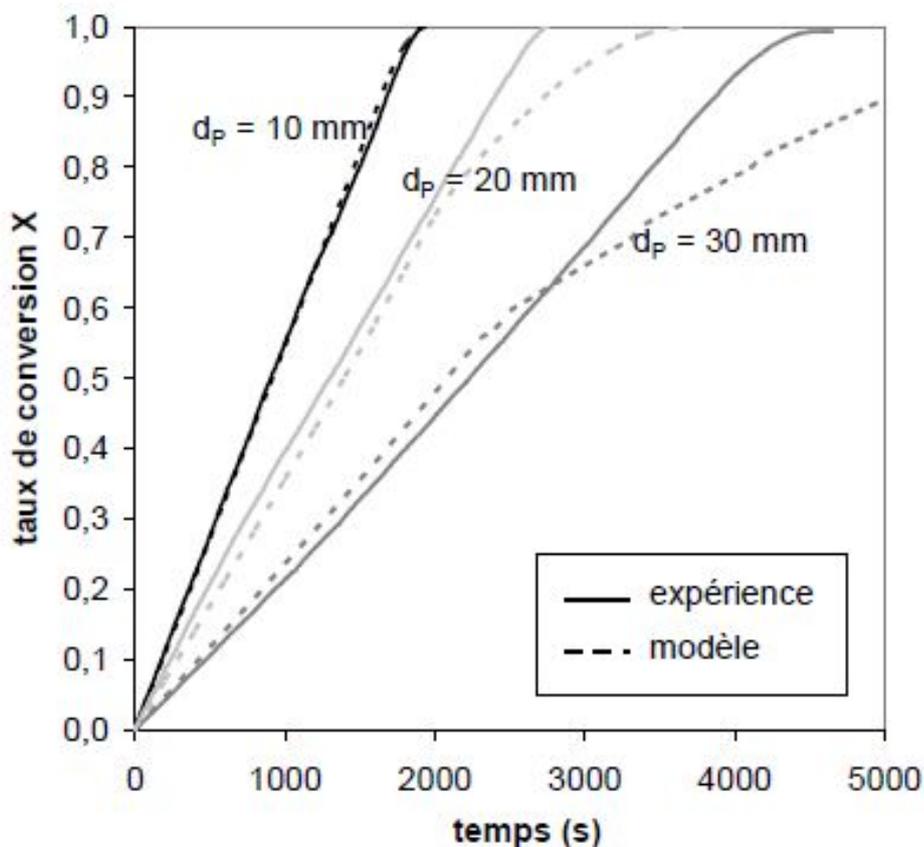


FIGURE 3.13 – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour différentes tailles de particules

L'observation de la Figure 3.12 montre que si le modèle suit précisément les courbes expérimentales à faible taux de conversion (jusqu'à 60%), il ne parvient pas à reproduire la forme linéaire des courbes à des taux de conversion élevés et pour des diamètres importants. Il se pourrait que le modèle surestime l'influence des transferts internes pour les particules de taille importante. En effet, puisque le modèle donne des résultats très proches des résultats expérimentaux pour les particules de 10 mm de diamètre initial (pour lesquelles l'influence des transferts internes est faible), les paramètres cinétiques ne peuvent être mis en cause. Il est à noter cependant que la difficulté à prédire le comportement du char à de forts taux de conversion n'est pas spécifique à ce modèle. Struis et al.,

n'ont d'ailleurs pas trouvé dans la littérature de modèle capable de prédire complètement le comportement du char pendant la conversion. Dasappa et al., par exemple, obtiennent également des résultats numériques comparables aux résultats expérimentaux seulement jusqu'à des taux de conversion de 60%.

3.7.1 Comparaison avec les données expérimentales de la littérature

Les résultats donnés par le modèle ont été comparés avec les résultats issus de l'étude expérimentale menée par [Dasappa et al,2002]. Les auteurs ont réalisé des expériences de gazéification sous 100% de vapeur d'eau sur des particules de charbon de Ficus de 8 mm de diamètre, à une température de 977 °C. Ils proposent 6 valeurs de taux de conversion à 6 temps de gazéification différents. Leurs résultats sont comparés à ceux de notre modèle dans les mêmes conditions expérimentales (Figure 3.13). Une différence importante apparaît entre nos valeurs calculées et celles mesurées par [Dasappa et al,2002]. Le temps de conversion complète du char est de l'ordre de 200 s selon les expériences de Dasappa et al,2002] notre modèle prédit un temps de conversion complète de 710 s. Une telle différence ne peut être imputée à la seule incertitude sur nos paramètres.

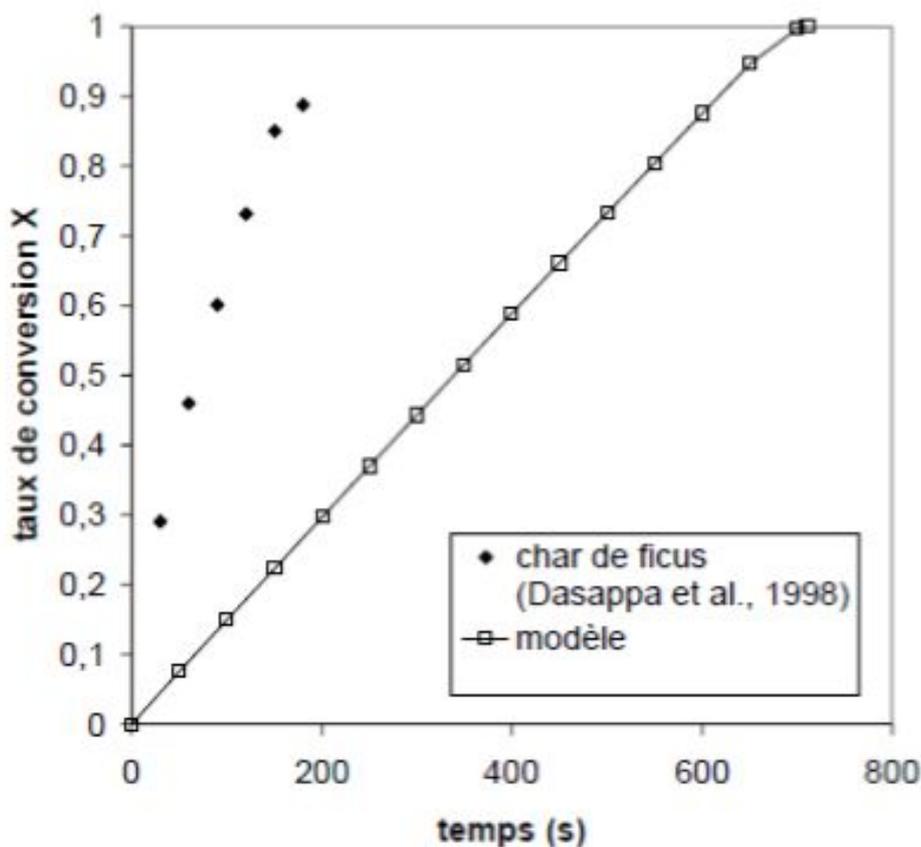


FIGURE 3.14 – comparaison entre les données expérimentales de [Dasappa et al,2002]. et la simulation de notre modèle dans les mêmes conditions opératoires

Il est vraisemblable que la différence soit due à l'essence du bois. Alors que nous avons travaillé sur l'ayous, qui est un bois dur, [Dasappa et al,2002]. ont utilisé du Ayous, qui est au contraire un bois tendre. Les propriétés des chars obtenus - en particulier la porosité sont probablement très différentes. Malheureusement, aucune information sur les propriétés du char (porosité, surface réactive) et sur les conditions de pyrolyse n'est précisée dans les travaux de [Dasappa et al,2002]., bien que la réactivité des chars soit très sensible à ces paramètres. Il est donc difficile de comparer les résultats obtenus par [Dasappa et al,2002]. avec les résultats de notre modèle. En effet, le contrôle des conditions opératoires ne suffit pas à prédire le comportement du char pendant sa gazéification : la connaissance des propriétés intrinsèques du char est essentielle.

3.7.2 Discussion sur l'origine des écarts modèle/expérience

On note des écarts entre les résultats numériques et expérimentaux, et ce en particulier pour la gazéification de grosses particules (Figure 3.12). Dans ce cas, le modèle ne parvient pas à reproduire la forme linéaire des courbes observée expérimentalement au-delà de 60% conversion. Une représentation inexacte de certains phénomènes physiques peut être à l'origine de ces écarts.

3.7.3 Géométrie et homogénéité des particules

Les particules de char utilisées dans nos expériences ont été obtenues à partir de billes de bois. Cependant, les chars n'ont pas gardé cette forme sphérique mais ont pris une forme "ovoïde" décrite au paragraphe 3.3. Or le modèle considère le diamètre équivalent, calculé comme la moyenne des trois dimensions mesurées. Les dimensions mesurées sur les particules varient de 10 à 15% autour de ce diamètre équivalent, introduisant une erreur dans la simulation. D'autre part, l'observation macroscopique de particules de char de 30 mm de diamètre initial partiellement gazéifiées a montré qu'à un taux de conversion élevé (70%), la particule ne garde pas sa forme initiale. La réduction de diamètre se fait préférentiellement dans les directions perpendiculaires aux fibres initiales du bois (la troisième dimension restant quasiment inchangée). Cette plus petite dimension facilite les transferts de matière et de chaleur vers le coeur de la particule et devient donc la "grandeur caractéristique" de la réaction. Le modèle, lui, adopte comme grandeur caractéristique le diamètre équivalent de la particule, calculé comme la moyenne des trois dimensions. D'autre part, les propriétés anisotropes du bois entraînent des propriétés anisotropes sur le char, en particulier en ce qui concerne le tenseur de diffusion D^* et la conductivité thermique * . Dans le cas de grosses particules, pour lesquelles les phénomènes diffusifs sont limitants, la propagation de la vapeur d'eau et de la chaleur sera privilégiée dans une certaine direction. La réaction ne va donc pas se faire de façon uniforme : la particule de char sera gazéifiée de manière "anisotropique".

Le maillage sphérique 1-D est donc satisfaisant à faible taux de conversion (avant que le diamètre de la particule diminue). Il conduira à une surestimation du rôle des transferts internes pour des taux de conversion élevés.

3.7.4 Prise en compte de la fracturation

Le phénomène de fracturation a été observé sur des particules de 30 mm de diamètre initial en cours de conversion (Figure 3-13). On note l'apparition de fractures profondes qui pénètrent jusqu'au coeur de la particule dès 20% de conversion. Ces fractures facilitent la diffusion des gaz réactifs au sein de la particule et pourraient être à l'origine d'une augmentation de la vitesse de gazéification. Ces phénomènes, complexes et aléatoires, n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Ils pourraient expliquer les écarts entre modèle et expériences, en particulier pour les particules de gros diamètre. Les particules de faible diamètre sont quant à elles soumises à moins de contraintes mécaniques et donc moins sujettes au phénomène de fracturation.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue l'objectif final de cette étude à l'échelle de la particule, qui est de valider le choix d'hypothèses simplificatrices pour le développement d'un modèle de lit fixe. Or dans un gazéifieur en lit fixe, les contraintes mécaniques comme le poids du lit de particules ou encore le frottement des particules entre elles (dû au déplacement du lit) accélèrent considérablement le processus de fragmentation périphérique : on parle de phénomène d'attrition. La fragmentation périphérique prend alors le pas sur la formation éventuelle de fractures. Dans ces conditions, négliger l'influence de la formation de fractures sur la vitesse de gazéification des particules semble pertinent.

3.8 Conclusion

Nous venons de montrer la simulation de la gazéification de la biomasse Lignocellulosique, qui nous permet de comprendre le principe même de cette

technologie, de montrer les différents facteurs qui influencent cette gazéification. Cette étape étant la plus importante dans la synthèse BTL, car elle permet de produire le gaz de synthèse pour la réalisation de la synthèse FT, nous permettant de faire une récapitulative sur les différents résidus bois en fonction de leurs quantités de biodiesel produit à partir de la simulation et de comprendre qu'un choix particulier sur le réacteur de gazéification est très important et fera l'objet d'une recherche antérieure.

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.

CHAPITRE IV :

IMPLICATION-APPORT DANS LE SYSTÈME ÉDUCATIF

Une implication est une action par laquelle on attribue à quelqu'un un certain rôle dans une affaire (Ask Web Search). Dans notre étude, les implications sont les conséquences attendues de « L'étude du potentiel des caractéristiques des résidus de bois au Cameroun en vue de la production du biodiésel de deuxième génération ». Pour mieux comprendre notre sujet, nous allons élaborer une fiche pédagogique du sujet et voire l'intérêt didactique dans le système éducatif.

3.9 Fiche pédagogique

La fiche pédagogique décrit le déroulement des activités pédagogiques, c'est une référence d'enseignement pour que le processus d'apprentissage atteigne le but décrit dans le syllabus. 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

3.10 Intérêt didactique

La didactique d'une matière 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, mettre en exergue les objectifs de l'étude, sa méthodologie, et comment on doit être évalué. Enfin les problèmes rencontrés dans cette étude.

3.10.1 Définition des concepts

- « Étude » : désigne l'application de l'esprit pour apprendre ou comprendre.
- « Potentiel » : désigne le nombre de ressources dont on peut disposer.
- « Résidus de bois » : substance dure et compacte de l'intérieure des arbres, constituants le tronc, les branches et les racines qui subsiste après une opération physique ou chimique.
- « Biodiesel » : il s'agit d'un combustible qui alimente un moteur thermique et celui-ci transforme l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique.

3.10.2 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 tels l'ayous, l'iroko, le sapelli et leurs 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.

3.10.3 Méthodologie

La méthodologie de ce travail est l'utilisation de la voie thermochimique. Elle a permis d'obtenir les données pour chaque espèce. Ceci de la pyrolyse, de la liquéfaction directe à la gazéification. Le Cameroun est doté d'un très fort potentiel de bois évalué à plus de 5 millions car les forêts denses du sud, du centre, de l'est et d'autres alors après l'abattage, le transport et les scieries on a les résidus de bois qui grâce à des procédés de pyrolyse, de combustion et de gazéification on peut obtenir le biodiesel de meilleure qualité. Ayant obtenu toutes les données nécessaires pour réaliser cette étude, nous avons utilisé les outils de modélisation qui sont :

Le logiciel Excel 10.2 (version d'évaluation) qui nous a permis de tracer les courbes en fonction des paramètres physiques ;

Le logiciel BILAN PRODUIT outil d'analyse de cycle de production du biodiesel.

3.10.4 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^{me} siècle par le raccourcissement des filières et la réduction du nombre d'opérations et d'outils. La thermochimie continue à être

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 74 avec des bois de diamètre assez important. D'autres défis majeurs attendent la société et ses industriels dans la première moitié du 21^{ème} 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 de la 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 biodiésel 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 (plantations d'ayous, d'iroko, et de sapelli). 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.

-RAPPORT AVEC UN ENSEIGNEMENT DU SECONDAIRE

La pyrolyse est la première étape de la voie thermochimique; elle consiste à chauffer les résidus de bois 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 bioréacteur. D'où l'état gazeux de la matière. Ainsi on peut enseigner aux élèves de classe de 4^{ème}. Ainsi on peut enseigner aux élèves de classes de 4^{ème} les différents états de la matière partant de la voie thermochimique des résidus de bois d'où l'implication didactique.

Conclusion Générale

Le travail effectué dans ce mémoire portait sur l'étude du potentiel des caractéristiques des résidus de bois au Cameroun en vue de la production du biodiesel de deuxième génération. Pour y parvenir, nous l'avons structuré en trois chapitres. Au premier chapitre portant sur les généralités sur les biocarburants, nous avons insisté sur les biocarburants de deuxième génération principalement le biodiesel obtenu à partir de la biomasse lignocellulosique. Nous avons présenté les deux principales voies de production du biodiesel : la voie biochimique et la voie thermochimique. A partir de cette dernière, nous avons insisté sur la présentation des différents procédés de production de biodiesel. Dans ce chapitre également, nous avons présenté en grand plan notre biomasse lignocellulosique : l'ayous, l'iroko, ainsi que le sapelli ; leurs propriétés, leurs anatomies, leurs sections ainsi que leurs zones de prédominance au Cameroun. Au second chapitre, portant sur la modélisation et la cinétique des différentes étapes de production du biodiesel à partir des résidus de bois par voie thermochimique qui est la principale voie de production du biodiesel de deuxième génération. Nous avons insisté sur les étapes suivantes : la pyrolyse, la liquéfaction directe et la gazéification. Pour la première, elle a pour objectif de décomposer la biomasse en une fraction solide et une fraction gazeuse. Pour la deuxième, elle a pour but la conversion de l'énergie chimique de la biomasse en chaleur. La troisième convertit un vecteur d'énergie peu maniable et la mise en oeuvre difficile en un vecteur maniable et efficace, ce vecteur peut être un gaz, un liquide, ou l'électricité ; le modèle mathématique ainsi formulé ici est celui de la réaction

de synthèse Fischer-tropsch qui est une réaction complexe, ceci réalisé dans un appareil appelé bioréacteur. Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux de ces trois étapes. Ainsi, nous avons tracé les courbes donnant le pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par k.mol de bois à 800°C (gazéifiée à l'air) puis à 900°C (gazéifiée à l'oxygène) ensuite, la courbe donnant l'effet de la teneur en eau dans le bois sur la composition du gaz à 800°C. Une autre courbe donnant le pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifiée à l'air) puis en outre la courbe donnant le pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifiée à l'oxygène) et aussi celle donnant les variations des fractions molaires en fonction de la température. Pour étudier la comparaison des rendements des produits de la réaction de synthèse Fischer-tropsch on a tracé la courbe donnant la distribution massique des produits en fonction de α . Par la suite, en dépit du coût des bioréacteurs ou des réacteurs de type à lit fixe continu encore très important, nous comptons produire le biodiesel à partir des résidus de bois ; nous utilisons concrètement la réaction de synthèse Fischer-tropsch en fonction de la température, de la pression dans le réacteur avec pour catalyseur le cobalt, on obtient plusieurs types de produits constitués majoritairement des hydrocarbures lourds saturés et une grande quantité de chaleur qui suite d'une amélioration (upgrading) on peut obtenir le produit désiré principalement le biodiesel de très bonne qualité.

Bibliographie

- 1- A.vanderDriftetH.Boerrigter(2006), 'synthesis gas from biomass for fuel sand chemicals.' ECN-C-06-001. document pdf. Consulté le 12-10-2011 à 04h09.
- 2- A. van der Drift and H. Boerrigter, 'Synthesis Gas from Biomass for Fuels and Chemicals', ECN-C-06-001, Januar 2006.
- 3- 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.
- 4- B.KAVALOV and S.D.PETEVES, 'status and perspectives of biomass to liquid fuels in the EUROPEAN Union. 'European commission. Mission of the institute for energy. Document PDF. Consulté le 25-10-2011 à 11h49.
- 5- B. Kavalov and S.D. Peteves, 'Status and Perspectives of Biomass to Liquid Fuels in the European Union', European Commission, Mission of the Institute for Energy.
- 6- B. Madani, 'Synthèse de Fischer-Tropsch sur Catalyseur à Base de Cobalt Supporté sur Carbure de Silicium'. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2005.
- 7-EBA'A ATYL 2000 8- Equipe Technique du GTZ/ProPSFE/Antenne de la Province de l'Est Cameroun Contribution à l'Atelier sur le Bois Energie au Cameroun', 2008.

- 9- Equipe Technique du GTZ/ProPSFE/Antenne de la Province de l'Est Cameroun 'contribution à l'atelier sur le bois énergie au Cameroun'.
- 10-FAO,2003 11- F. Mermoud, 'Gazéification de Charbon de Bois à la Vapeur d'Eau : De la Particule Isolée au Lit Fixe Continu', Thèse de Doctorat, Université de Toulouse 2, Juin 2006.
- 12- GopalGautam(2010), 'Parametric Study of a Commercial-Scale Biomass Downdraft Gasifier : Experiments and Equilibrium Modeling. Thèse de doctorat, 13-12-2010, université d'Auburn. Document PDF, Consulté le 11-10-2011 à 2 h 32.
- 13- G. Williamson and M. McCurdy, 'Biomass to Liquid', CRL Energy Limited Report ss N°09- 11046, December 2000.
- 14- G. Gautam, 'Parametric Study of a Commercial-Scale Biomass Downdraft Gasifier : Experiments and Equilibrium Modeling', Master of Sciences, University of Auburn, 2010.
- 15- Garth Williamson, Murray Mc Curdy(2009), 'biomasstoliquid.' CRL Energy Limited Report No 09-11046. 21-12-2009. Document PDF. Consulté le 25-10-2011 à 17h49.
- 16- H. Boerrigter, H.P. Calis, D.J. Slort, H. Bodenstaff, A.J. Kaandorp, H. den Uil and L.P.L.M. Raboy, 'Gas Cleaning for Integrated Biomass Gasification (BG) and Fischer-Tropsch (FT) Systems?', Energy Research Center of Netherlands (ECN), Report 04-056, 2004.
- 17- H.Boerrigter, H.Bodenstaffetal(2004), 'Gas Cleaning for Integrated Biomass Gasification (BG) and Fischer-Tropsch (FT) Systems. Energy research center of Netherlands (ECN), report 04-056. Document pdf. Consulté le 12-09-2011 à 05h09.
- 18- Kristina Jonsson, 'Modeling and Simulation of the Low Tar Methane Alkali Dual Cyclone Gasifier Including Fuel Pre-treatment and Gas Applications.' Master of Science thesis in energy engineering, institute of

technology, document pdf, Consulté le 25-09-2011 à 15h50.

19- K. Jonsson, 'Modeling and Simulation of the Low Tar Methane Alkali Dual Cyclone Gasifier Including Fuel Pre-treatment and Gas Applications', Master of Science Thesis in Energy Engineering, Institute of Technology.

20- L. Fagbemi, 'Etude Expérimentale et Théorique des Etapes de la Gazéification : Application à la Prévion de la Composition Molaire du Gaz', Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 1989.

21- 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. Consulté le 25 aout 2011 à 3h03.

22- M.VenkataRamananetal(2008), 'performance prediction and validation of equilibrium modeling for gasification of cashewnutshellchar', Brazilian Journal of Chemical Engineering, septembre 2008, Anna university.doc PDF, Consulté le 02-10-2011 à 10h49.

23- M.V. Ramanan, E. Lakshmanan, R. Sethumadhavan and S. Rengana-
rayanan, '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.

24- Mermoud(2006), 'Gazéification de charbon de bois à la vapeur d'eau :
de la particule isolée au lit fixe continu', thèse Doctorat, université de
TOULOUSE, 2 juin 2006. PDF document. Consulté le 28 juillet 2011 à 23
h 35.

25- PEN 1990 26- POUNA 1999 27- Razvan VÎJEU (2010), 'étude expérimen-
tale de gazéification des déchets de bois', PhD student, Faculty of Power
Engineering, University POLITEHNICA of Bucharest, Romania. 28- R.
Vijeu, Etude Expérimentale de la Gazéification des Déchets de Bois,
PhD, Faculty of Power Engineering, University Politehnica of Bucharest,

Romania, 2010.

29- Service.prt.htm. (Projet de gazéification et question). Consulté le 10 juin 2011 à 6h51. 28- Unasyvla-No.125-la chimie du bois-coup d ? ?il sur l'avenir. Consulté le 13 juin 2011 à 4h18.

30- William Whitten berger(2008), 'Thermo chemical conversion of biomass to syngasand chemical feedstock.'Draft Final Report,Energy and Environmental Research Center,University of North Dakota. Document pdf.Consulté le 12-09-2011 à 08h09.

31- W. Whittenberger, 'Thermochemical Conversion of Biomass to Syngas and Chemical Feedstock', Draft Final Report, Energy and Environmental Research Center, University of North Dakota, 2008.

32-WILLIAMSON 2000 33- William Whitten berger(2008),'Thermochemical conversion of biomass to syngasand chemical feedstock.'Draft Final Report,Energy and Environmental Research Center,University of North Dakota. Document pdf.Consulté le 12-09-2011 à 08h09.

34- Z.A Zainal, R. Ali, C.H. Lean and K.N. Seetharamu, 'Prediction of Performance of a Downdraft Gasifier using Equilibrium Modeling for Different Biomass Materials', School of Mechanical Engineering, University Sains, Malaysia, Energy Conversion and Management, Vol. 42, N°12, pp. 1499 - 1515, 2001.

.


```

cpe=r*(ae+(be*((t+ti)/2)))+(ce*(4*(((t+ti)/2)**2)-(ti*t))/3)+(de/(ti*t));
cpm=r*(ach4+(bch4*((t+ti)/2)))+(cch4*(4*(((t+ti)/2)**2)-(ti*t))/3)+(dch4/(ti*t));
cpn2=r*(an2+(bn2*((t+ti)/2)))+(cn2*(4*(((t+ti)/2)**2)-(ti*t))/3)+(dn2/(ti*t));
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!calcul de la constante d'équilibre de chaque réaction d'équilibre!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
k1=exp((-j1/(r*t))+(dla*log(t))+(dlb*t/2)+(dlc*(t**2)/6)+(dld/(2*(t**2)))+i1);
k2=exp((-j2/(r*t))+(sa*log(t))+(sb*t/2)+(sc*(t**2)/6)+(sd/(2*(t**2)))+i2);
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!afficher les valeurs de K1,K2 et les autres ci-dessouspour juste voir si le pro-
gramme tourne bien!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
write(10,*), 'les valeurs de k1,k2',k1,k2
write(10,*), 'lavaleur de j1,j2,w',j1,j2,w
write(10,*), 'lavaleur de i1,i2,cph2,cpco',i1,i2,cph2,cpco
write(10,*), 'la valeur de dla,dlb,dlc,dld',dla,dlb,dlc,dld
write(10,*), 'les donnees de cpco2,cpe,cpm,cpn2',cpco2,cpe,cpm,cpn2
write(10,*), 'la valeur de sa,sb,sc,sd',sa,sb,sc,sd
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Depuis de l'ouverture de la première boucle pour le calcul de la proportion des
espèces présentes dans le gaz!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
do i=1,max
X1(i)=(i-1)*h;
X5(i)=k1*((X1(i)**2);
X4(i)=(Hy+(2*w)-(2*X1(i))-(4*X5(i)))/2;
X3(i)=(k2*(xca-X5(i))*X4(i))/(X1(i)+(k2*X4(i)));
X2(i)=xca-X3(i)-X5(i);
M(i)=(X2(i)+(2*X3(i))+X4(i)-w-Oz)/2;
F(i)=(t-ti)*(X1(i)*cph2+(X2(i)*cpco)+(X3(i)*cpco2)+(X4(i)*cpe)+(X5(i)*cpm)+(0.0

```


end if

$$Y51(l+1)=k1*(Y11(l+1)**2);$$

$$Y41(l+1)=(Hy+(2*w)-(2*Y11(l+1))-(4*Y51(l+1)))/2;$$

$$Y31(l+1)=(k2*Y41(l+1)*(xca-Y51(l+1)))/(Y11(l+1)+(k2*Y41(l+1)));$$

$$Y21(l+1)=xca-Y31(l+1)-Y51(l+1);$$

$$Y0(l+1)=(Y21(l+1)+(2*Y31(l+1))+Y41(l+1)-Oz-w)/2;$$

$$F1(l+1)=(t-ti)*(Y11(l+1)*cph2+(Y21(l+1)*cpco)+(Y31(l+1)*cpco2)+(Y41(l+1)*cpe)(0.004*cpn2))$$

$$F2(l)=hb+(w*(hel+40650))+(Y0(l+1)*ho2)+(3.76*Y0(l+1)*hn2)-(Y11(l+1)*hh2)-(Y21(l+1)*hco)-(Y31(l+1)*hco2)-(Y41(l+1)*hev)-(Y51(l+1)*hch4)-F1(l)$$

l=l+1

$$!POH2(l)=(Y11(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y51(l)+(3.76*Y0(l)+0.004)));$$

$$!POCO(l)=(Y21(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y41(l)+Y51(l)+(3.76*Y0(l)+0.004)));$$

$$!POCO2(l)=(Y31(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y41(l)+Y51(l)+(3.76*Y0(l)+0.004)));$$

$$!POH2O(l)=(Y41(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y41(l)+Y51(l)+(3.76*Y0(l)+0.004)));$$

$$!POCH4(l)=(Y51(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y41(l)+Y51(l)+(3.76*Y0(l)+0.004)));$$

$$!PON2(l)=((3.76*Y0(l)*100)/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y41(l)+Y51(l)+(3.76*Y0(l)+0.004)));$$

$$POH2(l)=(Y11(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y51(l)+0.004));$$

$$POCO(l)=(Y21(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y51(l)+0.004));$$

$$POCO2(l)=(Y31(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y51(l)+0.004));$$

$$!POH2O(l)=(Y41(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y51(l)+0.004));$$

$$POCH4(l)=(Y51(l)*100/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y51(l)+0.004));$$

$$PON2(l)=((0.004*100)/(Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y51(l)+0.004));$$

!!!!!!! calcul du pouvoir calorifique superieur du gaz de synthese!!!!!!!

$$PCSS(l)=(12760*POH2(l)+ 12600*POCO(l)+39800*POCH4(l))/100$$

!!!!!!!calcul du volume de syngaz!!!!!!!

$$Vg(l)=Y11(l)+Y21(l)+Y31(l)+Y51(l)+0.004$$

$$Vg1(l)=Y11(l)+Y21(l)+Y51(l)$$

write(10,*), 'le pouvoir calorifique superieur en KJ/Nm3 et le volume Vg du

```

syngazest :',PCSS(l),Vg(l)
write(10,*),'la temperatureet 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,*),'les valeurs de x1(h2),x2(co),x3(co2),x4(h2o),x5(ch4),m(air) ont',Y11(l),Y21(l),
Y51(l), Y0(l)
!!!!!!on cherche a calculer le rendement energetique du reacteur de gazeifica-
tion!!!!!!!
RD(l)=(Vg1(l)*PCSS(l)*100)/(1*PCS)
write(10,*),'le rendement de gazeification est :',RD(l)
RG(l)=(RD(l)*rpuri*rft)/10000
RGa(l)=(RDa(l)*rpuri*rfta)/10000
write(10,*),'le rendement global du processusBTL,RG ;RGameliore :',RG(l),RGa(l)
!!!!!!!!!!!!calcul du volume du biodiesel!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
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 ameliore produit par une tonne de boi-
sest :',Vdiesela(l)
enddo
endif
enddo
l=l+1
enddo

```

```
enddo
write(*,*), 'sil vous plait aller voir les resultats dans la partition d'
read(*,*),
write(*,*), 'merci pour votre attention et suggestion!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!'
read(*,*),
endprogram
```

3.1) Influence de la teneur en eau sur la composition du gaz [DASAPPA et AL, 2006

Teneur en gaz (%) : cas du CH ₄	7	7	7.8	8.5	10
Teneur en eau (%)	10	20	30	40	50

Tableau1 : Pourcentage molaire de CH₄ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 800°C.

Echelle : abscisse 1.5cm →5% ; ordonnée 1.5cm →5%

Teneur en gaz (%) : cas du CO ₂	12	17	22	27	32
Teneur en eau (%)	10	20	30	40	50

Tableau2 : Pourcentage molaire de CO₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 800°C.

Echelle : abscisse 1.5cm →5% ; ordonnée 1.5cm →5%

Teneur en gaz (%) : cas du CO	45	34	25	17	12
Teneur en eau (%)	10	20	30	40	50

Tableau3 : Pourcentage molaire de CO en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 800°C.

Echelle : abscisse 1.5cm →5% ; ordonnée 1.5cm →5%

Teneur en gaz (%) : cas du N ₂	0	0	0	0	0
Teneur en eau (%)	10	20	30	40	50

Tableau4 : Pourcentage molaire de N₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 800°C.

Echelle : abscisse 1.5cm →5% ; ordonnée 1.5cm →5%

Teneur en gaz (%) : cas du H ₂	37	39	42	44	45
Teneur en eau (%)	10	20	30	40	50

Tableau5 : Pourcentage molaire de H₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 800°C.

Echelle : abscisse 1.5cm →5% ; ordonnée 1.5cm →5%

3.2) pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 900 °C (gazéifiée à l'oxygene) [DASAPPA et AL, 2006]

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

Tableau6 : Pourcentage molaire de N₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900°C (gazéifier à l'oxygène).

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

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

Tableau7 : Pourcentage molaire de CO₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900°C (gazéifier à l'oxygène).

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

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

Tableau8 : Pourcentage molaire de H₂ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900°C (gazéifier à l'oxygène).

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

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

Tableau9 : Pourcentage molaire de CO en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900°C (gazéifier à l'oxygène).

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

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

Tableau10 : Pourcentage molaire de CH₄ en fonction de la teneur en eau par Kmol de bois à 900°C (gazéifier à l'oxygène).

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

3.2 .Influence de la température sur la composition [DASAPPA et AL, 2006]

Teneur en gaz (%) : cas du CH ₄	38	43	50	56	60
Température en kelvin	600	800	1000	1200	1400

Tableau11 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'air).

Echelle : abscisse 3cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du CO	25	24	23	22	19
Température en kelvin	600	800	1000	1200	1400

Tableau12 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'air).

Echelle : abscisse 3cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du H ₂	21	20	19	15	10
Température en kelvin	600	800	1000	1200	1400

Tableau13 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'air).

Echelle : abscisse 3cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du CO ₂	10	9	9	10	11
Température en kelvin	600	800	1000	1200	1400

Tableau14 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'air).

Echelle : abscisse 3cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du N ₂	5	1	0	0	0
Température en kelvin	600	800	1000	1200	1400

Tableau15 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'air).

Echelle : abscisse 3cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du CH ₄	0	0	0	0	0	0	0
Température en kelvin	800	900	1000	1100	1200	1300	1400

Tableau16 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'oxygène).

Echelle : abscisse 3.5cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du CO ₂	15	12	11	10.5	10.2	10	10
Température en kelvin	800	900	1000	1100	1200	1300	1400

Tableau17:Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'oxygène).

Echelle : abscisse 3.5cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du H ₂	15	7	3	1	0	0	0
Température en kelvin	800	900	1000	1100	1200	1300	1400

Tableau18 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'oxygène).

Echelle : abscisse 3.5cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du CO	28	36	38	38	37	34	33.5
Température en kelvin	800	900	1000	1100	1200	1300	1400

Tableau19 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'oxygène).

Echelle : abscisse 3.5cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

Teneur en gaz (%) : cas du N ₂	41	42	43	46	48	49	50
Température en kelvin	800	900	1000	1100	1200	1300	1400

Tableau20 : Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifier à l'oxygène).

Echelle : abscisse 3.5cm →200K ; ordonnée 1cm →10%

3.6) Variation des fractions molaires en fonction de la température

Teneur en gaz (%) : cas du CO	47	48	49	50	52	58	59
Température en °C	650	700	750	800	900	1000	1100

Tableau21 : variation des fractions molaires molaire en fonction de la température.

Echelle : abscisse 2cm →100°C ; ordonnée 1.1cm →15%

Teneur en gaz (%) : cas du CO ₂	22	25	25	24	23	23	22
Température en °C	650	700	750	800	900	1000	1100

Tableau22 : variation des fractions molaires molaire en fonction de la température.

Echelle : abscisse 2cm →100°C ; ordonnée 1.1cm →15%

Teneur en gaz (%) : cas du CH ₄	63	30	18	12	7	3	0
Température en °C	650	700	750	800	900	1000	1100

Tableau23 : variation des fractions molaires molaire en fonction de la température.

Echelle : abscisse 2cm →100°C ; ordonnée 1.1cm →15%

Teneur en gaz (%) : cas du H ₂	9	9	9	9	9	9	9
Température en °C	650	700	750	800	900	1000	1100

Tableau24 : variation des fractions molaires molaire en fonction de la température.

Echelle : abscisse 2cm →100°C ; ordonnée 1.1cm →15%

Teneur en gaz (%) : cas du N ₂	18	17	17	16	16	16	15
Température en °C	650	700	750	800	900	1000	1100

Tableau25 : variation des fractions molaires molaire en fonction de la température.

Echelle : abscisse 2cm →100°C ; ordonnée 1.1cm →15%

3.7) Distribution massique des produits en fonction de α [DASAPPA et AL, 2006]

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

Tableau26 : 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

Tableau27 : 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

Tableau28 : 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

Tableau29 : 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

Tableau30 : 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