

Contribution à la production des biocarburants de deuxième génération: cas du biodiesel à partir des résidus de bois

B. Beguide¹ and M. Fanmoe Fepeussi^{1,2*}

¹ Laboratoire de Physique Appliquée, Ecole Normale Supérieure
Université de Yaoundé I, B.P. 47, Yaoundé, Cameroun

² Laboratoire d'Analyse des Technologies de l'Energie et de l'Environnement
Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, B.P. 812, Yaoundé, Cameroun

(reçu le 4 Mars 2013 – accepté le 29 Juin 2013)

Résumé - *L'objectif de ce travail est de montrer d'une part qu'à partir des données expérimentales obtenues dans la littérature et d'une simulation numérique de l'étape de la gazéification sur différents résidus de bois au Cameroun, on peut estimer sur une tonne, la quantité de biodiesel produit à partir de son potentiel biomasse lignocellulosique résiduelle 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 à substituer le 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 [1].*

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.*

Mots Clés: Biomasse lignocellulosique – Biocarburants - Gazéification du bois - Purification du gaz de synthèse - Synthèse Fischer-Tropsch.

1. INTRODUCTION

Le Cameroun, ayant un potentiel de biomasse ligno cellulosique résiduelle estimée à 4.95 millions de m³ en 2006 [9], 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

* willyfanmoe@yahoo.fr

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 étude et sera exposé sous forme de question à savoir:

- Quels sont les gisements de biomasse disponibles pour la production des biocarburants de deuxième génération? Y-a-t-il des compétitions possibles avec d'autres usages?
- Quels sont les problèmes rencontrés dans la production des biocarburants de deuxième génération?
- Quels bénéfices environnementaux peut-on attendre de la seconde génération? Et en particulier quel impact sur les émissions des gaz à effet de serre?

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 [1]. 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 [2, 3]. 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 et enfin des observations et des interprétations des résultats.

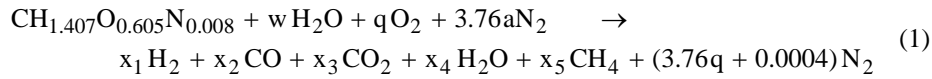
2. EXPOSE SUR L'EQUILIBRE DU MODELE

La formule chimique des résidus forestiers sec obtenue à partir du **Tableau 6** et basée sur un seul atome de carbone est donnée par: $\text{CH}_{1,407}\text{O}_{0,605}\text{N}_{0,008}$ et l'équilibre de la modélisation est ressorti sur ces formules de base pour la prédiction des caractéristiques de gazéification, telles que les suppositions suivantes faites dans l'approche de la modélisation sont: [3]

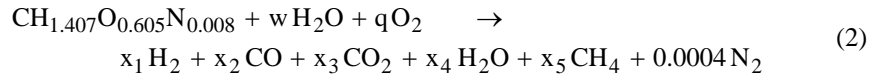
- Les réactions procèdent de façon adiabatique;
- L'azote présent soit dans le combustible, soit dans l'air est inerte;
- La cendre est inerte et n'est impliquée dans aucunes réactions, soit comme une espèce chimique ou comme un catalyseur;
- Les lois de gaz idéal sont validées;
- Pas de gradient de 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.

Basé sur les suppositions suivantes, l'équation de la réaction globale de résidus forestiers secs avec l'air peut s'écrire:



Et avec l'oxygène:



La réaction ci-dessus représente l'ensemble des réactions, mais le nombre de compétition intermédiaire prend place durant le processus, les réactions suivantes sont prédominantes à savoir: [3, 4]

La réaction d'oxydation-



La réaction gazéification à la vapeur-



La réaction de Boudouard-



La réaction de méthanisation-



La réaction 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 constantes d'équilibre respectif:

$$K_1 = \frac{[\text{P}_{\text{CH}_4}]}{[\text{P}_{\text{H}_2}]^2} ; K_2 = \frac{[\text{P}_{\text{CO}_2}][\text{P}_{\text{H}_2}]}{[\text{P}_{\text{CO}}][\text{P}_{\text{H}_2\text{O}}]} \quad (8)$$

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

Equilibrage du carbone-

$$1 = x_2 + x_3 + x_5 \quad (9)$$

Equilibrage de l'hydrogène-

$$1.407 + 2w = 2x_1 + 2x_4 + 4x_5 \quad (10)$$

Equilibrage de l'oxygène-

$$0.605 + w + 2q = x_2 + 2x_3 + x_4 \quad (11)$$

Constante d'équilibre à partir de la méthanisation-

$$k_1 = x_5 / x_1^2 \quad (12)$$

Constante d'équilibre à partir de la méthanisation-

$$k_2 = \frac{x_3 \times x_1}{x_2 \times x_4} \quad (13)$$

La teneur en eau dans la biomasse est donnée par :

$$t_e = 100 \times \frac{18w}{(n \times M_{rb} + 18w)} \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} H_{frb}^0 + w(H_{frb}^0 + H_{frb}^0) + q \times H_{fO_2}^0 + 3.76q \times H_{fN_2}^0 = x_1 \times H_{fH_2}^0 + x_2 \times H_{fCO}^0 + \\ x_3 \times H_{fCO_2}^0 + x_4 \times H_{fH_2O}^0 + x_5 \times H_{fCH_4}^0 + \Delta T(x_1 \times C_{pH_2O} + x_2 \times C_{pCO}) + \\ \Delta T(x_3 \times C_{pCO_2} + x_4 \times C_{pH_2O} + x_5 \times C_{pCH_4} + (3.76q + 0.004) \times C_{pN_2}) \end{aligned} \quad (15)$$

A l'oxygène

$$\begin{aligned} H_{frb}^0 + w(H_{fH_2O_l}^0 + H_{fH_2O_v}^0) + q \times H_{fO_2}^0 = x_1 \times H_{fH_2}^0 + x_2 \times H_{fCO}^0 + x_3 \times H_{fCO_2}^0 + \\ x_4 \times H_{fH_2O}^0 + x_5 \times H_{fCH_4}^0 + \Delta T(x_1 \times C_{pH_2} + x_2 \times C_{pCO} + x_3 \times C_{pCO_2}) + \\ \Delta T(x_4 \times C_{pH_2O} + x_5 \times C_{pCH_4} + 0.004 \times C_{pN_2}) \end{aligned} \quad (16)$$

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 [3, 4] 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 donc la version la plus simplifiée est [3] :

$$C_{pm} = R \times \left[a + b \times T_m + c \times (4 \times T_m^2 + T_i \times T) + d / T_i \times T \right] \quad (17)$$

Zainal *et al.*, 2001 [4] montre que la constante d'équilibre k est une fonction de la température et peut être exprimée comme:

$$-R \times T \times \ln k = \Delta G^0 ; \quad \frac{d \ln k}{dT} = \frac{\Delta H^0}{R \times T^2} \quad (18)$$

Les valeurs de la constante de la capacité calorifique et les valeurs standards de formation des fonctions de Gibbs pour différente composition de gaz impliquée sont retrouvées dans la littérature [3]. La chaleur de formation est explicitement une fonction de la température et d'où on peut écrire:

$$\ln k = \int \frac{\Delta H^0}{R \times T^2} \times dT + I \quad (19)$$

Selon Robert *et al.*, 1984, $\Delta H^0 / R$ peut également être égalée comme – ci:

$$\frac{\Delta H^0}{R} = \frac{J}{R} + \Delta a T + \Delta b \frac{T^2}{2} + \Delta c \frac{T^3}{3} - \frac{\Delta d}{T} \quad (20)$$

En substituant l'équation (20) dans l'équation (19), on a:

$$\ln K = -\frac{J}{R \times T} + \Delta a \ln T + \Delta b \frac{T}{2} + \Delta c \frac{T^2}{6} + \frac{\Delta d}{2T^2} + I \quad (21)$$

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

$$\Delta G^0 = J - R \times T \left(\Delta a \ln T + \Delta b \frac{T}{2} + \Delta c \frac{T^2}{6} + \frac{\Delta d}{2T^2} + I \right) \quad (22)$$

Les valeurs de I et J sont respectivement calculées à partir de l'équation (19) et (22) à la température de 298 K. Deux équations d'équilibre sont requises pour déterminer les constantes d'équilibres et permettent d'évaluer les valeurs Δa , Δb , Δc , Δd suivants les équations suivantes:

Pour le cas de la réaction de WGS [5]

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

$$\Delta c = c_{H_2} + c_{CO_2} - c_{H_2O} - c_{CO} \quad ; \quad \Delta d = d_{H_2} + d_{CO_2} - d_{H_2O} - d_{CO} \quad (24)$$

L'application de ces équations révèlent la constante d'équilibre pour k_2 , similairement k_1 peut être résolue en adoptant la même procédure.

La concentration molaire des espèces peut être prédire en utilisant k_1 , k_2 et en résolvant les équations (1) à (6). 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.

3. ORGANIGRAMME

Programme de calcul développé, sous forme d'organigramme-

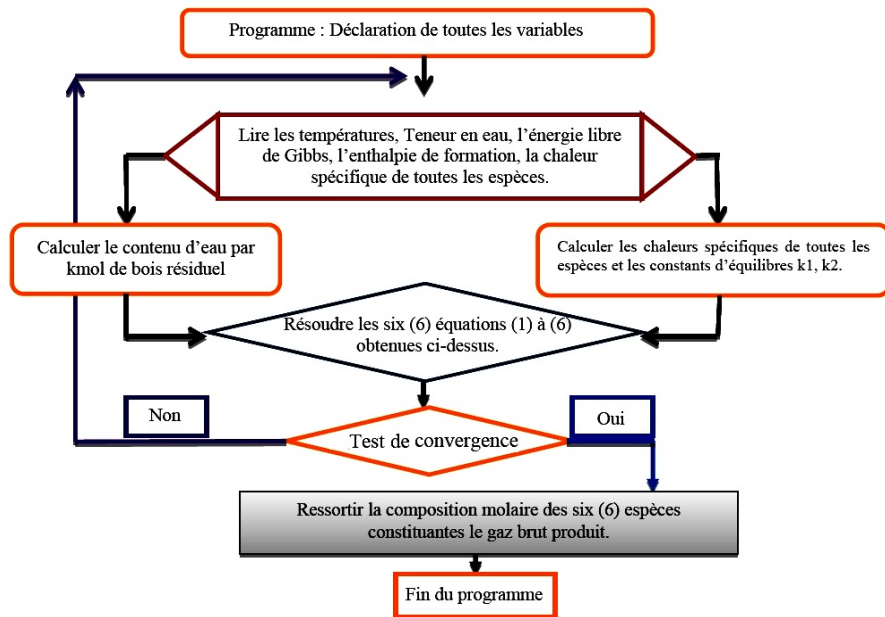


Fig. 1: Organigramme

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

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

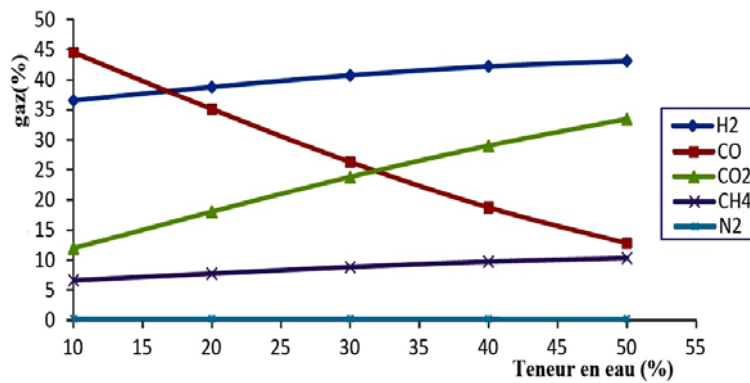


Fig. 2: Pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 800 °C (gazéifiée à l'air)

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 H₂, CO, CH₄ sont importantes.

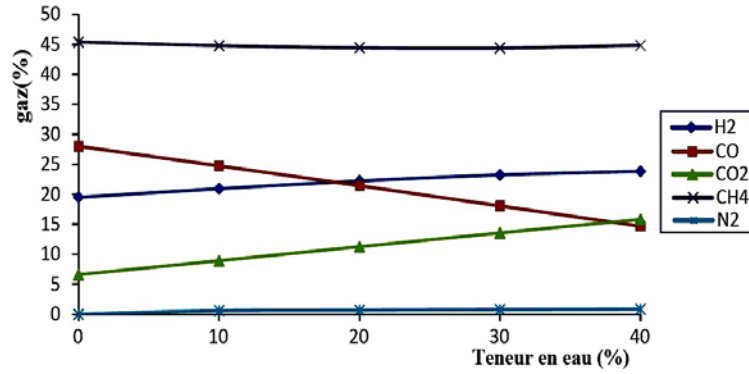


Fig. 3: Pourcentage molaire des espèces en fonction de la teneur en eau par kmol de bois à 900 °C (gazéifiée à l'oxygène)

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

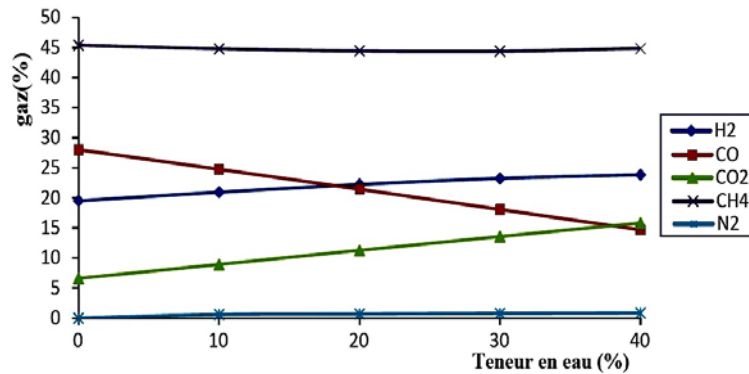


Fig. 4: Effet de la teneur en eau dans le bois sur la composition du gaz à 800 °C [4]

4.2 Influence de la température sur la composition du gaz

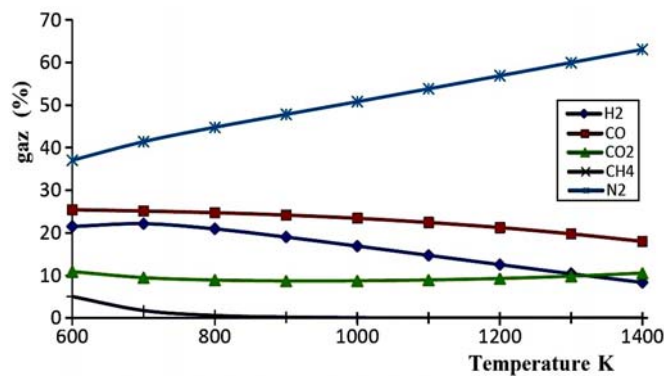


Fig. 5: Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifié à l'air)

Ici on observe la décroissance des fractions volumiques de CO , H_2 , CH_4 avec la croissance de la température, cette décroissance est due à la croissance de la dilution du gaz brut par le di azote N_2 à des températures élevées.

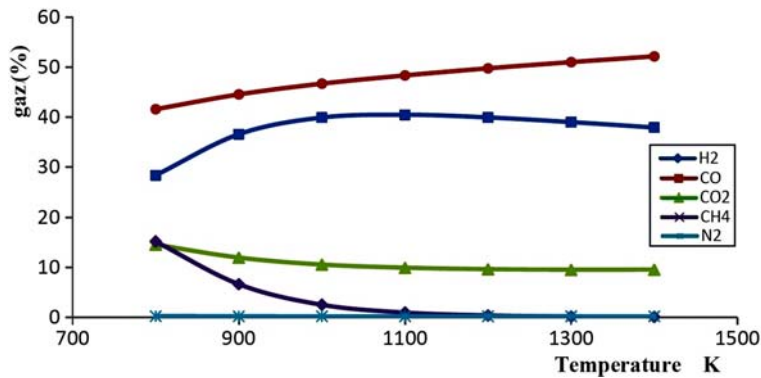


Fig. 6: Pourcentage molaire des espèces en fonction de la température (gazéifié à l'oxygène)

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

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:

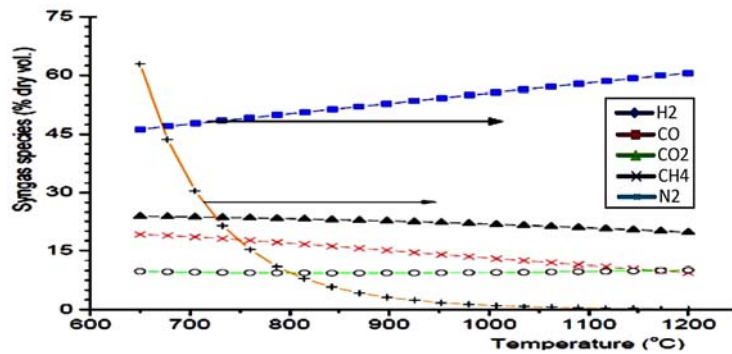


Fig. 7: Variation des fractions molaires en fonction de la température. [5]

5. CALCUL DU RENDEMENT DU REACTEUR DE GAZEIFICATION

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:

$$\eta_{\text{gazéification}} = \frac{V_{\text{gaz}} \times \text{PCS}_{\text{gaz par kg de bois}}}{m_{\text{r.bois}} \times \text{PCS}_{\text{moy r.bois}}} \quad (25)$$

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

$$\text{PCS}_{\text{gaz}} = x_{\text{H}_2} \times \text{PCS}_{\text{H}_2} + x_{\text{CO}} \times \text{PCS}_{\text{CO}} + x_{\text{CH}_4} \times \text{PCS}_{\text{CH}_4} + x_{\text{CO}_2} \times \text{PCS}_{\text{CO}_2} + x_{\text{N}_2} \times \text{PCS}_{\text{N}_2} \quad (26)$$

Tableau 4: Caractéristiques du gaz brut obtenu à 1073 K 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 (%)	8.75	10.56
Méthane (%)	1.30	1.22
Diazote (%)	42.40	0.24
Rapport H₂/CO	0.85	48.25
PCS_{gaz brut} (MJ/Nm³)	6.58	11.63

En connaissant les PCS_{gaz} , ($i = \text{H}_2, \text{CO}, \text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{N}_2$), on trouve que:

A l'air, le $\text{PCS}_{\text{gaz par kg de bois}} = 6.546 \text{ MJ/Nm}^3$, à l'oxygène, le $\text{PCS}_{\text{gaz par kg de bois}} = 11.63 \text{ MJ/Nm}^3$. Sachant que le $\text{PCS}_{\text{moy r.bois}}$ est calculé dans le programme du dit travail, on peut déduire que le rendement du gaz produit obtenu par simulating en équilibre thermodynamique est:

$$\text{A l'air- } \eta_{\text{gazéification}} = 30.72 \% , \text{ à l'oxygène- } \eta_{\text{gazéification}} = 58.66 \% \quad (27)$$

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 préférence 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 H_2/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 ($\eta_{\text{purification}}$) de cette étape est généralement compris entre 74 – 76 % [6, 7]. Le gaz purifié et conditionné pour respecter les spécifications des catalyseurs FT est une fois introduit dans le réacteur FT.

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

Dans le réacteur FT, les produits sont caractérisés par la distribution de ASF. Cette distribution est définie par la constante de probabilité de la croissance des chaînes des hydrocarbures [2, 7]. 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.

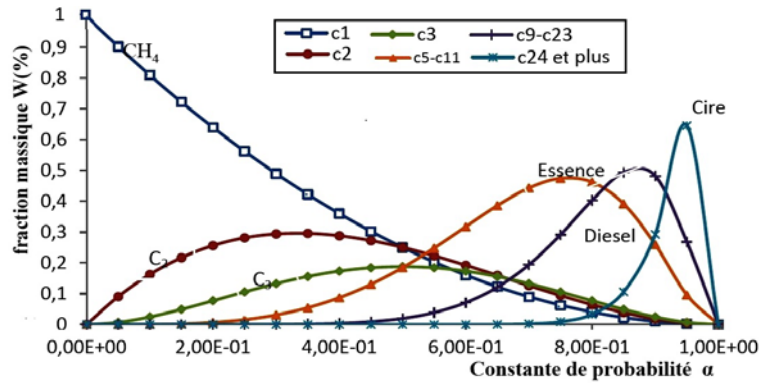


Fig. 8: Distribution massique des produits en fonction de α

6. 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 ' η_{FT} ' du biodiesel est dans ce cas limité à approximativement les 40 % [7].

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 $\eta_{FT} = 70\%$ (efficacité énergétique du syngaz au liquide en général) [7].

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

$$\eta_{\text{global-i}} = \eta_{\text{gazéification}} \times \eta_{\text{purification}} \times \eta_{\text{FT}} \quad (28)$$

Qui nous donne les valeurs respectives $\eta_{\text{global-N.O.}} = 15.19\%$ et $\eta_{\text{global-O.}} = 29.52\%$, ($i = \text{N.O.} : \text{non optimisée}, \text{O.} : \text{optimisée}$) connaissant le pouvoir calorifique net du biodiesel qui est calculé dans le programme. On peut déduire le volume du biodiesel produit par l'expression.

$$V_{\text{biodiesel-i}} = \eta_{\text{global-i}} \times \frac{m_{\text{r.bois}} \times \text{PCS}_{\text{moy r.bois}}}{100 \times \text{PCS}_{\text{net biodiesel}}} \quad (29)$$

Pour un kilogramme de résidus de bois, on trouve respectivement $V_{\text{biodiesel-N.O.}} = 0.110 \text{ l}$ et $V_{\text{biodiesel-O.}} = 0.214 \text{ l}$.

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

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 6: Récapitulatif de la composition du gaz de synthèse, la quantité de biodiesel produit à partir des différentes formes des résidus de bois

		Bois sans écorces	Résidus forestiers	Copeaux de bois	Boulettes de bois
Caractéristique de la biomasse [4]	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	.024	0.24
	PCS gaz (%)	11.41	11.42	11.47	11.60
	H ₂ /CO	0.77	0.75	0.76	0.77
	Volume 'Nm ³ '	1.64	1.63	1.64	1.66
Bio diesel	Volume pour Une tonne (l)	107.40	106.79	108.73	112.17
	Volume amélioré (l)	208.66	207.48	211.26	217.93
	PCS 'MJ/l'	40.52	40.52	40.52	40.52

7. 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.

Pendant la réaction de SFT, en fonction de la température, de la pression dans le réacteur et du catalyseur utilisée (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.

REFERENCES

- [1] 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,
- [2] B. Madani, '*Synthèse de Fischer-Tropsch sur Catalyseur à Base de Cobalt Supporté sur Carbone de Silicium*'. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2005.
- [3] M.V. Ramanan, E. Lakshmanan, R. Sethumadhavan and S. Renganarayanan, '*Performance Prediction and Validation of Equilibrium Modeling for Gasification of Cashew Nut Shell Char*', Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 25, N°3, pp. 585 – 601, 2008.
- [4] L. Fagbemi, '*Etude Expérimentale et Théorique des Etapes de la Gazéification: Application à la Prédiction de la Composition Moléculaire du Gaz*', Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 1984.
- [5] 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.
- [6] G. Gautam, '*Parametric Study of a Commercial-Scale Biomass Downdraft Gasifier: Experiments and Equilibrium Modeling*', Master of Sciences, University of Auburn, 2010,
- [7] A. van der Drift and H. Boerrigter, '*Synthesis Gas from Biomass for Fuels and Chemicals*', ECN-C--06-001, Januar 2006.
- [8] H. Boerrigter, H.P. Calis, D.J. Slort, H. Bodestaff, 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.
- [9] Equipe Technique du GTZ/ProPSFE/Antenne de la Province de l'Est Cameroun '*Contribution à l'Atelier sur le Bois Energie au Cameroun*', 2008.
- [10] W. Whittenberger, '*Thermochemical Conversion of Biomass to Syngas and Chemical Feedstock*', Draft Final Report, Energy and Environmental Research Center, University of North Dakota, 2008.
- [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 Toulouse2, Juin 2006.
- [12] R. Vîjeu, '*Etude Expérimentale de la Gazéification des Déchets de Bois*', PhD, Faculty of Power Engineering, University Politehnica of Bucharest, Romania, 2010.
- [13] 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.
- [14] G. Williamson and M. McCurdy, '*Biomass to Liquid*', CRL Energy Limited Report N°09-11046, December 2009.