

GAZÉIFICATION AU CO₂ ET À LA VAPEUR D'EAU DE COQUES D'ANACARDE, DE BOIS D'ANACARDE, DE TIGES DE COTON DE LA CASAMANCE

Lat Grand **NDIAYE**^{a,*}, Ansoumane **DIEDHIOU**^a, Ammar **BENSAKHRIA**^b, Anissa **KHELFA**^c
, Oumar **SOCK**^a

^a département de Physique, Université Assane Seck de Ziguinchor, BP.523 Ziguinchor, Sénégal

^b université de Technologie de Compiègne, Centre de recherche de Royallieu, EA 4297-TIMR, BP20529 - 60205 Compiègne, France^a

^c école supérieur de Chimie Organique et Minérale, EA 4297-TIMR, 1 allée du réseau Jean-Marie Buckmaster - 60200 Compiègne, France

RÉSUMÉ

Des études de la gazéification expérimentale du bois d'anacarde, de la coque d'anacarde et de tiges de coton de la Casamance (Sud du Sénégal) par utilisation de la vapeur et du dioxyde de carbone et ce, sur trois températures différentes 950, 1 000 et 1 050 °C sont reportées sur cet article. Le taux de conversion du carbone à une température donnée dépend de l'agent de gazéification utilisé, ce qui suggère l'utilisation de trois modèles différents dans ce présent travail afin d'interpréter les données et déterminer les paramètres cinétiques : le modèle dit volume de réaction (VRM), le modèle du cœur rétrécissant (SCM) et le modèle de pore aléatoire (RPM).

Les résultats montrent que la température, l'agent de gazéification et le type de coke de l'échantillon utilisé ont des effets déterminants sur la cinétique de conversion du carbone. En utilisant une fonction empirique, les résultats expérimentaux montrent que la cinétique de la réaction de la noix de cajou et des tiges de coton gazéifiés à la vapeur d'eau et au gaz carbonique sont plus rapides que celle du bois de cajou. Dans le même temps, les résultats montrent que la réactivité coke-H₂O est différente de celle du coke-CO₂.

Mots Clés : Gazéification, tiges de coton, coques de cajou, bois de cajou

NOMENCLATURE

Symboles :

m masse, kg
x taux conversion, -
R Constante universelle des gaz,
T température, °K
k constante cinétique, min⁻¹
VRM Volume Reaction Model
SCM Shrinking Core Model
RPM Random Pore Model

Lettres grecques :

δ constante

λ constante

α constante

Indices / Exposants :

c cendre

t temps

0 initial

1. INTRODUCTION

La demande d'énergie connaît une forte augmentation en raison de l'augmentation rapide de la population mondiale et du développement des technologies, tandis que les ressources énergétiques actuelles avec des réserves limitées sont en baisse. L'énergie provenant de la biomasse est appelée à jouer un rôle important dans les futurs systèmes énergétiques

du monde. L'abondance et le bas coût des ressources de la biomasse en Casamance, peuvent conduire à fournir de l'énergie propre comparée aux énergies fossiles. Dans cette zone du Sénégal, les résidus (déchets) de biomasse sont pour la plupart brûlés à l'air libre ou jetés sans aucune forme de valorisation. Cette façon de gérer ces résidus provoque plusieurs problèmes socio-environnementaux tels que des émissions de polluants y

* auteur correspondant

Adresse électronique : nlatgrand@gmail.com

compris la poussière, les gaz tels que les NO_x et de SO_x et de grandes quantités de méthane qui est un gaz à effet de serre plus impactant que le CO_2 .

Pour une utilisation importante de la biomasse, la gazéification se place parmi les technologies de conversion d'énergie les plus prometteuses [1]. Selon Van De Streene [2], la gazéification a émergé comme étant une manière propre et efficace de produire du gaz à partir de la biomasse. Compte tenu de la diversité des procédés de valorisation énergétique de la biomasse, le résultat escompté est fonction de plusieurs paramètres. Ainsi, la température est l'une des plus importants, ce qui affecte les performances du procédé de gazéification. En comparant et en analysant les procédés de gazéification, il est utile d'examiner les paramètres de performance que sont la température, la taille des particules, le type coke et l'agent de gazéification. Pour une meilleure conception des réacteurs, il est donc nécessaire de procéder à plusieurs opérations de gazéification d'une multitude de biomasses. Actuellement, les réacteurs en cours de développement et d'évaluation peuvent être généralement classés en trois catégories, les réacteurs à lit fixe, les réacteurs à lit fluidifié et les réacteurs à lit mobile. Parallèlement des études sur les agents de gazéification sont largement menées par de nombreux chercheurs. Ainsi, la réaction coke- CO_2 et la réaction coke- H_2O sont fondamentalement les deux réactions importantes qui adviennent selon [3]. En outre, [3] dans leurs études ont montré que, la réactivité du coke de biomasse était dans l'ordre bois > miscanthus > paille. Les mécanismes des réactions coke- CO_2 , coke- H_2O [4], et l'effet de la température expérimentale ont été largement étudiés par de nombreux auteurs.

À la lumière de cela, une méthode raisonnable pour évaluer la performance du processus de gazéification à la vapeur ou au CO_2 passe nécessairement par un examen minutieux de l'association des paramètres annoncés précédemment.

Dans cet article, la température de réaction, l'agent de gazéification, et différents échantillons de coke ont été utilisés pour analyser les performances du procédé de gazéification.

2. METHODES ET MATERIELS

2.1. Présentation des échantillons de cokes utilisés

Les échantillons de biomasse utilisés dans cette étude se composaient de trois échantillons de coke de coques de noix de cajou, de tiges de coton et le bois de cajou provenant de Ziguinchor, région située dans le sud du Sénégal. Ces derniers ont été lavés plusieurs fois avec de l'eau du robinet et séchés pendant 48 heures dans un four à $105\text{ }^\circ\text{C}$. Ces échantillons ont ensuite été pyrolysés à $450\text{ }^\circ\text{C}$ à l'aide d'un four à moufle pendant 7 minutes pour les tiges de coton, 15 minutes pour les

coques de noix de cajou et pour le bois de cajou. La fraction brute des cokes obtenue a été broyée et tamisée pour donner des particules de taille $<3\ 000\ \mu\text{m}$. Le tableau 1 résume les analyses élémentaires et immédiates des biomasses et des cokes de coques de noix de cajou, de tiges de coton et du bois de cajou utilisés.

2.2. Description du réacteur et des procédures expérimentales

Le schéma synoptique du réacteur à lit fixe (36 mm de diamètre intérieur et 350 mm de hauteur) équipé d'une plaque poreuse comme lit est présenté sur la Figure 1. Au début de chaque essai de gazéification, un mélange de 15 g de l'échantillon de coke et 70 g de sable est placé dans le réacteur. Le sable est utilisé afin d'améliorer le transfert de chaleur à l'intérieur du lit de particules et pour minimiser le passage préférentiel des gaz. Ensuite, le réacteur est chauffé électriquement.



G
a
s

c
o
n

Figure 1. Système de réacteur à lit fixe

La température du réacteur est contrôlée par un thermocouple en contact avec le lit de coke de biomasse et relié à un régulateur de température. Les tests sont réalisés à des températures isothermes de 950, 1 000 et 1 050 °C, en utilisant de la vapeur (90 NL/h) transportée par un flux d'azote inerte à 10 NL/h. Les débits d'écoulement de CO₂ et N₂ ont été fixés par l'utilisation

de régulateurs de débit massique tandis que le débit de la vapeur d'eau est ajusté par une pompe à piston HPLC. En sorti du réacteur, les gaz sont condensés et nettoyés. La composition de ces gaz est obtenue par une ligne d'analyseur de gaz, en utilisant un instrument d'analyse de gaz type SRA (μGC).

Table 1: Caractéristiques, sur une base sèche, des tiges de coton, des coques de cajou et du bois de cajou

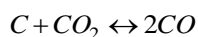
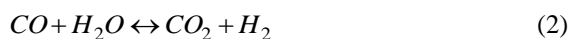
Échantillons	Analyse élémentaire (Wt. %)				Analyse immédiate (Wt. %)			PCI (MJ/kg)	
	C	H	N	O	Humidité	Carbone Fixe	Matières Volatiles	Cendres	PCI
Tiges de coton	51,41	4,05	1,31	43,22	5,04	23,78	65,41	5,74	11,63
Coke de tiges de coton	86,11	3,02	1,32	9,41	0,15	75,58	18,75	4,40	27,92
Bois de cajou	51,59	6,21	1,10	41,10	8,05	17,42	73,28	1,25	18,61
Coke du bois de cajou	76,02	2,52	0,34	21,12	0,26	76,24	17,87	5,63	31,42
Coque de cajou	58,10	7,30	0,62	35,12	---	15,80	81,40	2,60	21,29
Coke du coque de cajou	83,40	4,03	0,96	11,60	---	65,70	27,20	7,50	27,31

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pendant le processus de gazéification, dix séries de mesures ont été effectuées. Après sept séries de mesures, la reproductibilité était bonne avec une moyenne de l'erreur de l'ordre de 2,1 %.

3.1. Effet de la température sur le taux de conversion

Les réactions hétérogènes les plus importantes lors d'opérations de gazéification ont lieu en présence de



(3)

La fraction (ratio) du taux de conversion du carbone (X) a été évaluée en variant la température entre 950, 1 000, et 1 050 °C. Le calcul du taux de conversion se fait connaissant la perte de masse du carbone au cours de la gazéification et ce à partir de l'équation suivante :

$$X = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_c}$$

(4)

où X est la fraction de conversion du carbone, m₀ est la masse initiale de l'échantillon au début de la gazéification, m_t est la masse de l'échantillon à un

moment donné (t), et m_c la masse des cendres restantes à la fin de la réaction.

Le tracé du taux de conversion en fonction du temps pour les trois températures opératoires montre que pour le même temps mis, le taux de conversion du carbone à la température de 1050 °C demeure le plus élevé. Nous pouvons conclure que la température expérimentale a une influence sur la conversion du carbone. Cette corrélation entre les effets de la température et du taux de gazéification a également été observée par [5] lors de la gazéification au CO₂, par [6] lors de la gazéification à la vapeur d'eau, et par [7] dans une gazéification en présence d'un mélange de vapeur et de CO₂. Une température élevée de gazéification augmente la réactivité de la gazéification et le craquage des goudrons produits au cours de la gazéification de la biomasse.

3.2. Effet de la température sur le PCI

La pouvoir calorifique inférieur (MJ/Nm³) des gaz secs produits est calculé en utilisant l'équation suivante [8].

$$LHV = (30,0[CO] + 25,7[H_2] + 85,4 \times [CH_4] + 151,3[C_nH_m]) \times 4,2 / 1000 \quad (5)$$

Où [CO], [H₂], [CH₄], et [C_nH_m] sont les fractions respectives des gaz de CO, H₂, CH₄, et C_nH_m produits. Les valeurs du pouvoir calorifique inférieur du gaz ont

été déterminées (par l'équation 5) et ont été reportées dans le tableau 2 ci-dessous.

Table 2: Influence de la température sur le PCI

Tiges de Coton				
Température (°C)		950	1000	1050
PCI (MJ/Nm ³)	CO ₂	8,97	10,56	10,77
	H ₂ O	10,57	11,14	11,53
Coque de cajou				
Température (°C)		950	1000	1050
LHV (MJ/Nm ³)	CO ₂	10,69	10,75	11,52
	H ₂ O	10,78	10,85	11,93
Bois de cajou				
Température (°C)		950	1000	1050
LHV (MJ/Nm ³)	CO ₂	8,10	10,47	10,72
	H ₂ O	8,94	10,77	10,92

On peut noter que le PCI du gaz est d'environ 9-11 MJ/Nm³ pour le coton, et de 8 à 12 MJ/Nm³ pour le cajou. En outre, une importante température de réaction induit un effet positif sur le PCI des gaz. Nous pouvons conclure que la température a un effet positif sur la valeur du PCI des gaz. Ces résultats ont été confirmés par [9] qui montrent que le PCI des gaz augmente lorsque la température augmente pour des températures de 973 K et 1073 K et ce lors de la gazéification de plusieurs types de sciure de bois dans un réacteur à lit fluidisé sous air et vapeur d'eau. Cependant [10] en gazéification des coques de noix de cajou pour une application thermique (cogénération) dans une unité de réacteur à lit fixe, de transformation d'aliments, a trouvé un PCI de 3,51 MJ/m³. Enfin, sur la base des résultats de [10] et sur les valeurs de PCI des gaz données par [11], nous pouvons dire que les gaz obtenus dans notre

cas peuvent être classés comme étant des gaz semi-riches. Enfin, en raison des valeurs de PCI comprises entre 8 et 12 MJ/Nm³ (plus élevées que celles utilisées par [10]), les gaz obtenus dans la présente étude peuvent être utilisés directement dans des turbines à gaz, moteurs à gaz et autres applications industrielles alimentaires.

3.3. Effet de l'atmosphère réactive sur le taux de conversion

➤ Taux de conversion

Les résultats de la comparaison montrent que la gazéification du coke en présence de vapeur et de CO₂ est assez différente. Le taux de la réaction pour tous les échantillons suit l'ordre : vapeur pure (le plus rapide) > CO₂ pur (plus lent). Afin de confirmer cette observation, une fonction empirique a été utilisée pour évaluer les réactivités coke-vapeur et coke-CO₂ lors des opérations de gazéification.

➤ Fonction empirique

Une fonction empirique définie par [11] a été utilisée pour examiner les réactivités au CO₂ et à la vapeur.

$$F(X) = [(1 - X_t)(\delta X_t + \lambda)] \exp(-\lambda X_t^\alpha) \quad (6)$$

où X_t est le taux de conversion instantané du carbone, δ, λ et α, des constantes définies par des valeurs finies. Plusieurs valeurs furent testées et les meilleures valeurs obtenues pour les constantes δ, λ et α sont respectivement 31, 4 et 2,1. Ainsi par utilisation du taux de conversion, X, les valeurs de la fonction F(X) ont été obtenues et les tendances sont présentées dans la figure 2.

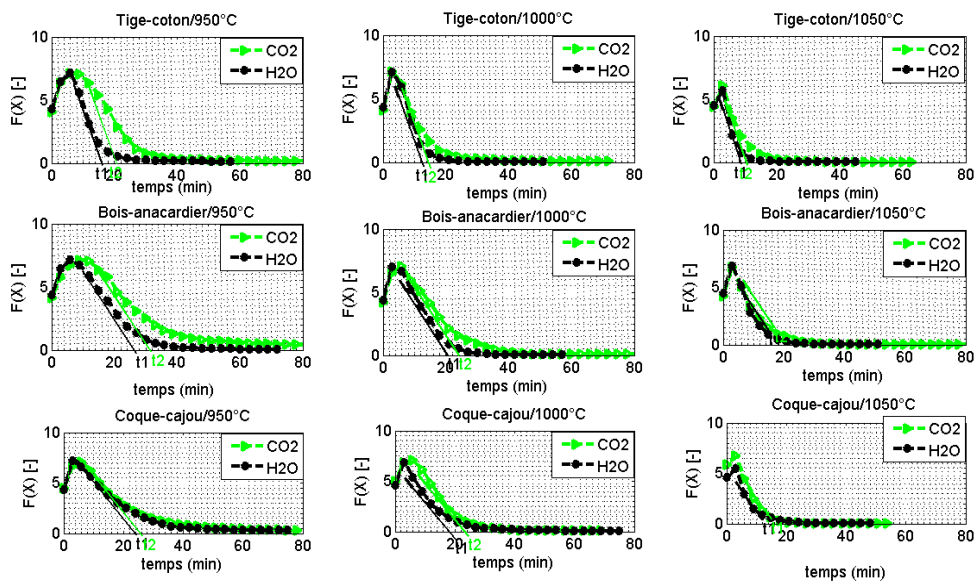


Figure 2 : Influence de l'agent réactif sur le taux de conversion (Fonction empirique)

La figure 2 montre que le temps de séjour, t_2 , obtenu avec du CO_2 est supérieur au temps de séjour, t_1 , obtenu par utilisation de la vapeur. En outre, le rapport, t_2/t_1 est compris entre 0,84 et 2. Ainsi, nous pouvons dire que la réaction de gazéification coke-vapeur est de 0,84 à 2 fois plus rapide que la réaction de gazéification coke- CO_2 . Les mêmes tendances ont été décrites par [12] lors de la gazéification avec H_2O et CO_2 en lit fluidisé de boues d'épuration séchées. Dans leurs études, ils ont vu que la réaction du coke de carbone avec le CO_2 est lente comparée à celle du coke avec H_2O . Pour la plupart des cokes, les auteurs montrent que la gazéification avec H_2O est plus rapide que celle avec le CO_2 .

3.4. Étude comparative de la réactivité des cokes

➤ Taux de conversion

Les expériences montrent que, avec du dioxyde de carbone à plusieurs températures, les cokes de tiges de coton sont un peu plus réactives que celui avec les coques de noix de cajou et ceux du charbon de bois de noix de cajou (les mêmes tendances ont été obtenues en utilisant la vapeur comme agent de gazéification). Une comparaison des réactivités entre les trois échantillons mise en évidence a montré que la réactivité en présence de la vapeur d'eau est plus rapide qu'en présence de CO_2 .

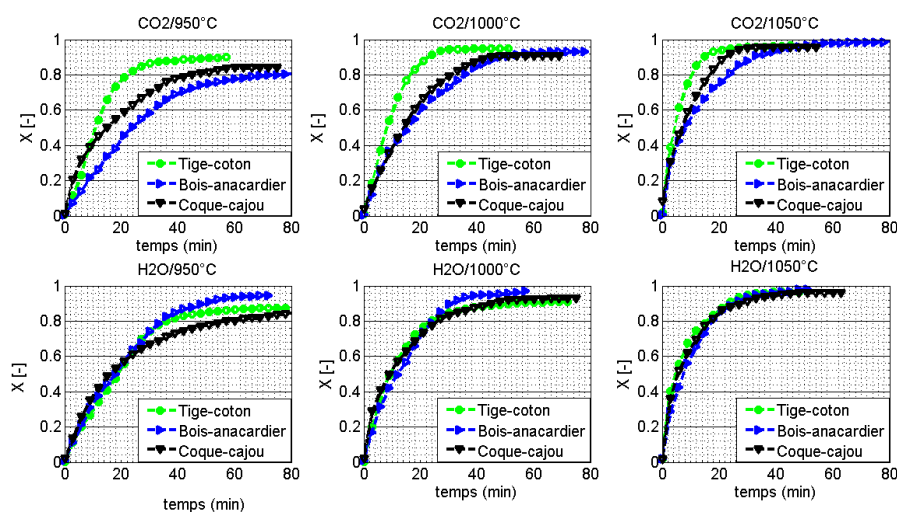


Figure 3 : Influence du type de coke sur le taux de conversion

La figure 3 montre que lors de la gazéification des trois échantillons de cokes avec CO_2 , la courbe du taux de conversion de tiges de coton est au-dessus de la tendance du taux de conversion obtenue avec les coques de noix de cajou et du bois de cajou. En ce qui concerne l'anacarde (cajou), le taux de conversion avec la noix de cajou est au-dessus de celui obtenu avec le coke de bois de cajou. Par conséquent, nous pouvons conclure à nouveau, qu'avec du CO_2 comme réactif, que le taux de conversion des tiges de coton est plus élevé que celui de la coque de noix de cajou et du coke de bois de cajou. Aussi lors de la gazéification avec de la vapeur, l'effet de la réactivité des trois différents échantillons demeure pratiquement le même pour une température de 1050 °C et devient plus marqué à 950 °C. Par conséquent, une fonction empirique peut être utilisée pour examiner la réactivité des échantillons de cokes pour les trois différentes températures d'opération.

➤ Fonction empirique

Afin d'étudier la réactivité de la vapeur et celle du CO_2 , une fonction empirique a été utilisée. Les pentes obtenues sur les différentes courbes, ont montré que la

réactivité de la réaction de gazéification suit l'ordre : coke de tiges de coton (le plus rapide) > coke de coques de noix de cajou > coke de bois de cajou (plus lent).

- D'un point de vue de transfert de chaleur : la différence obtenue dans la réactivité peut être expliquée d'un point de vue physique. En effet, les tiges de coton ont une densité de $0,21 \text{ g/cm}^3$; pour la coque de noix de cajou elle est $0,38 \text{ g/cm}^3$ et pour le bois de cajou elle est de $1,07 \text{ g/cm}^3$. Ainsi, les matières premières avec une petite densité conduisent mieux la chaleur que celles à densité élevée.

- D'un point de vue chimique : les coques de noix de cajou, les tiges de coton, et le bois de cajou n'ont pas la même composition chimique (voir le tableau 1). Cette différence dans la composition chimique pourrait être la cause de la différence de réactivité observée pour les mêmes conditions expérimentales.

3.5. Paramètres cinétiques des modèles

Afin de mieux évaluer l'effet des agents de gazéification sur la réactivité des cokes, les paramètres

cinétiques ont été calculés pour chaque situation, en utilisant le modèle volumique (VRM), le modèle du cœur rétrécissant (SMC) et le modèle de pores aléatoire (RPM), définis par les relations 7, 8 et 9. Ces dernières nous permettent de déterminer la constante de vitesse (k_{VRM} , et k_{RPM} k_{SCM}) pour chacune des températures testées. Le facteur pré-exponentiel, k_0 , et l'énergie d'activation (E_A) ont été obtenus à partir de l'équation d'Arrhenius, en traçant $\ln(k_{VRM}$, et k_{RPM} $k_{SCM})$ en fonction de $1/T$.

Le modèle VRM suppose une réaction homogène à l'intérieur du coke de la particule.

$$\frac{dX}{dt} = k_{VRM} (1 - X) \quad (7)$$

Le modèle de pore aléatoire considère le chevauchement des surfaces de pores, ce qui réduit la surface disponible pour la réaction.

$$\frac{dX}{dt} = k_{RPM} (1 - X) \sqrt{(1 - \psi \ln(1 - X))} \quad (8)$$

Le modèle de cœur rétrécissant suppose que la réaction s'initie à la surface externe du coke et se déplace progressivement à l'intérieur.

$$\frac{dX}{dt} = k_{SCM} (1 - X)^{2/3} \quad (9)$$

Les constante de vitesse (k_{VRM} , k_{SCM} , ou k_{RPM}), respectent:

$$k = k_0 \exp(-E_a/RT) \quad (10)$$

Les résultats du facteur pré-exponentiel et de l'énergie d'activation obtenus à partir du tracé des courbes de $\ln(k)=f(1/T)$, pour chacune des conditions opératoires, sont résumés dans le tableau 3. D'après ces résultats, on remarque que les données expérimentales sont bien corrélées par les différents modèles (VRM, SMC, et RPM) avec des coefficients de régression assez élevés ($R^2 > 0,9$). Les énergies d'activation obtenues avec les modèles VRM, RPM et SCM sont respectivement comprises entre 86 à 209 kJ / mol, 75 à 163 kJ / mol, et 68 à 141 kJ / mol et sont fonction des cokes utilisés et des agents de gazéification. Les énergies d'activation (tableau 3) pour les trois cokes lors de la gazéification avec de la vapeur et du CO_2 sont proches des valeurs de 29 à 209 kJ /mol publiées par [13].

Tableau 3: Paramètres cinétiques de la gazéification à la vapeur et au CO_2 des tiges de coton, de coques de noix de cajou et de bois de cajou

Modèles	E_a (kJ/mol)	K_0 (min ⁻¹)	R^2	Échantillons
VRM CO_2	86,18	0,21E+3	0,9819	Tiges de
SCM CO_2	67,92	0,22E+2	0,9984	
RPM CO_2	75,36	0,39E+2	0,9983	

VRM _{vapeur}	102,74	0,54E+3	0,9812	
SCM _{vapeur}	73,41	0,21E+2	0,9917	
RPM _{vapeur}	80,85	0,36E+2	0,9865	
VRM _{CO2}	122,59	0,41E+4	0,9984	
SCM _{CO2}	92,47	0,15E+3	0,9882	
RPM _{CO2}	99,91	0,26E+3	0,9873	
VRM _{vapeur}	150,22	0,49E+5	0,9997	Coquille de noix de cajou
SCM _{vapeur}	112,85	0,87E+3	0,9998	
RPM _{vapeur}	123,03	0,19E+4	0,9992	Bois de cajou
VRM _{CO2}	99,62	0,91E+3	0,9546	
SCM _{CO2}	83,23	0,76E+2	0,9884	
RPM _{CO2}	90,58	0,15E+3	0,9875	
VRM _{vapeur}	208,83	0,12E+8	0,9814	
SCM _{vapeur}	140,55	0,11E+5	0,9885	
RPM _{vapeur}	163,41	0,89E+5	0,9895	

4. CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette étude confirment que la température a une influence sur la réactivité du coke (réaction endothermique). En outre, les valeurs du pouvoir calorifique inférieur des gaz de synthèse obtenus varient de 8 à 12 MJ/Nm³: dans le cas du coke de tiges de coton, elle est de 9-11 MJ/Nm³, dans le cas du coke de coques de noix de cajou, elle est de 10-12 MJ/Nm³ et de 8-11 MJ/Nm³ dans le cas du coke du bois de cajou. En comparant les valeurs du PCI pour les trois différentes températures utilisées, nous pouvons conclure qu'une température de réaction élevée induit de meilleures valeurs du PCI des gaz. On constate aussi dans ces tests que le taux de conversion de la réaction de gazéification suit l'ordre : vapeur pure (le plus rapide) > CO_2 pur (plus lent). Les énergies d'activation obtenues sont de 92 à 150 kJ/mol pour les cokes de coques de noix de cajou, de 67 à 102 kJ/mol pour les cokes de tiges de coton et de 83 à 208 kJ/mol pour les cokes de bois de cajou. L'utilisation de la fonction empirique indique que la réactivité des cokes de charbon des tiges de coton est supérieure à celle du coke de coque de noix de cajou qui elle est supérieure à celle du coke de bois de cajou. Par ailleurs les observations montrent, en se basant sur un même bilan de masse entre les trois échantillons de cokes, que les cokes de coques de noix de cajou fournissent plus de gaz de synthèse que ceux avec le bois de cajou. Cette remarque confirme la valeur élevée du PCI obtenue avec les coques de noix de cajou comparée au bois de noix de cajou.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) pour leur soutien financier.

RÉFÉRENCES

- [1] Kentaro U., Tomoaki N., Kunio Y., (2012). Analysis of an updraft biomass gasifier with high temperature steam using a numerical model. *Appl. Energ.*, vol 90, pp. 38–45.
- [2] Van de Steene L., Tagutchou J.P., Mermoud F., Martin E., Salvador S., (2010). A new experimental continuous fixed bed reactor to characterize wood char gasification. *Fuel*, vol. 89, 3320–3329.
- [3] Leteng L., Michael S.; (2013). Investigation of the intrinsic CO₂ gasification kinetics of biomass charat medium to high temperatures. *Appl Energ* 109, pp. 220–228.
- [4] Susanna N., Alberto G.-B., Diego F. C., (2012). Gasification reactivity of char from dried sewage sludge in a fluidized bed. *Fuel*, vol. 92, 346–353.
- [5] Dong K. S., Sun Ki L., Min Woong K., Jungho H., Tae-U. Y., (2010). Gasification reactivity of biomass chars with CO₂. *Biomass Bioenerg.*, vol. 34, 1946–1953.
- [6] Sansha C., Hein W.J.P.N., John R. B., Raymond C. E., (2013). Improved reactivity of large coal particles by K₂CO₃ addition during steam gasification. *Fuel Process. Technol.*, vol. 114, 75–80.
- [7] Guizani C., Escudero S. F.J., Salvador S., (2013). The gasification reactivity of high-heating-rate chars in single and mixed atmospheres of H₂O and CO₂. *Fuel*, vol. 108, 812–823.
- [8] Qinglong X., Sifang K., Yangsheng L., Hui Z., (2012). Syngas production by two-stage method of biomass catalytic pyrolysis and gasification. *Bioresource Technol.*, vol. 110, 603–609.
- [9] Li X.T., J.R. Grace, (2004). Biomass gasification in a circulating fluidized bed. *Biomass. Bioenerg.*, vol. 26, 171-193.
- [10] Tippayawong C. C., Promwangkwa A., Rerkkriangkrai P., (2011). Gasification of cashew nut shells for thermal application in local food processing factory. *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, 69–72.
- [11] McKendry Peter, (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technol.*, vol. 83, 37–46.
- [12] Susanna N., Alberto G.-B., Pedro O., (2013). Gasification of char from dried sewage sludge in fluidized bed: Reaction rate in mixtures of CO₂ and H₂O. *Fuel*, vol. 105, 764–768.
- [13] Hyo J. J., Sang S. P., Jungho H., (2014). Co-gasification of coal–biomass blended char with CO₂ at temperatures of 900–1100°C. *Fuel*, vol. 116, 465–470.