

## Détermination des paramètres cinétiques globaux de la conversion thermochimique des rafles de maïs et balles de riz du Bénin

David. G. F. ADAMON<sup>1</sup>, Latif FAGBEMI<sup>2</sup>, Ammar BENSARKHRIA<sup>1</sup> et Emile SANYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire TIMR EA 4297, Département de Génie des Procédés Industriels et développement durable, Université de Technologie de Compiègne (UTC)

<sup>2</sup> Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Université d'Abomey-Calavi (UAC), 01 BP 2009 Cotonou, Bénin

\* Correspondance, courriel : [adamfaridavid07@yahoo.fr](mailto:adamfaridavid07@yahoo.fr)

### Résumé

La République du Bénin est caractérisée par une très faible électrification en milieu rural et produit cependant annuellement en moyenne, 4197858 T de résidus de maïs et 160503 T de balles de riz, selon une étude menée sur une période de dix ans (2004/2005-2013/2014). Dans ce contexte, une bonne compréhension, des propriétés chimiques des balles de riz et des rafles de maïs produites en République du Bénin et des cinétiques de leurs réactions de conversion thermochimique, devrait jouer un rôle important dans la modélisation et l'exploitation du procédé de valorisation énergétique. L'analyse thermogravimétrique des échantillons a été effectuée en utilisant l'appareil SETSYS -1750 CS Evol. (TG-DTA 1600°C) avec l'hélium comme gaz inerte, suivie de la détermination des propriétés physicochimiques selon les normes françaises en vigueur. Les résultats montrent que les deux types de biomasse testés présentent de forts taux de matières volatiles : respectivement de 70.6 % et 85.05 %. Les balles de riz, ont aussi un fort taux de cendre (18.31 %) contre 1.8 % aux rafles de maïs. Si les rafles de maïs offrent un fort taux de conversion 93.78 %, tel n'est pas le cas des balles de riz qui n'en affichent que 63.03 % à 800°C à la vitesse de chauffe de 20°C/min. De même, les paramètres cinétiques globaux (énergie d'activation et constante de vitesse) des deux types de biomasse ont été évalués, pour des granulés de l'ordre de 2 mm de diamètre avec respectivement 4813.5 J/mol, 0.0702 min<sup>-1</sup> pour les balles de riz et 4476.7 J/mol, 0.0671 min<sup>-1</sup> pour les rafles de maïs.

**Mots-clés :** biomasse, modélisation, propriétés physicochimiques.

### Abstract

**Determination of the total kinetic parameters of the thermochemical conversion of the corn raids and rice balls of Benin**

The Republic of Benin is characterized by a very weak electrification in rural medium and produces however annually on average, 4197858 T of corn residues and 160503 T of rice balls, according to a study undertaken over one ten years period (2004/2005-2013/2014). In this context, a good comprehension, chemical properties of the rice balls and raids of corn produced in Republic of Benin and kinetics of their reactions of thermochemical conversion should play a significant role in the modeling and the exploitation of the energy process of valorization.

The thermogravimetric analysis of the samples was carried out by using apparatus SETSYS -1750 CS Evol. (TG-DTA 1600°C) with helium like inert gas, followed determination of the physico-chemical properties according to French standards' into force. The results show that the two types of biomass tested show strong volatile matter rates: respectively of 70.6 % and 85.05 %. The rice balls, have also a strong rate of ash (18.31 %) against 1.8 % with the corn raids. If the corn raids offer a strong conversion rate 93.78 %, such is not the case of the rice balls which post of them only 63.03 % with 800°C at the speed of heating of 20°C/min. In the same way, the total kinetic parameters (energy of activation and constant speed) of the two types of biomass were evaluated, for pellets about 2 mm of diameter with respectively 4813.5 J/mol, 0.0702 min<sup>-1</sup> for the rice balls and 4476.7 J/mol, 0.0671 min<sup>-1</sup> for the corn raids.

**Keywords :** *biomass, modeling, physico-chemical properties.*

## 1. Introduction

Face au changement climatique lié en partie aux émissions de gaz à effets de serre et à la croissance sans cesse de la consommation énergétique, plusieurs pays ont recours aux énergies renouvelables. En raison de l'importance de son gisement, la filière biomasse est une voie prometteuse. Dans ce contexte, l'Afrique se démarque des autres continents puisque la biomasse constituait 58 % de sa consommation énergétique en 2002 [1] et représente environ 49 % de la fourniture totale en énergie primaire. L'utilisation totale de la biomasse primaire, à la fois traditionnelle et moderne, connaît une augmentation allant de 1225 Mtep en 2008 à près de 2000 Mtep en 2035 [2]. Plus de 60 % de la biomasse totale utilisée en 2008 était de la biomasse traditionnelle, laquelle a été consommée essentiellement en Inde et en Afrique sub-saharienne et orientée principalement vers la cuisson et le chauffage. En 2035, cette part sera de 37 %, parce que la demande pour la biomasse moderne augmente considérablement en raison des politiques gouvernementales. Il s'agit de la bioénergie, à travers des techniques de conversion innovantes, au nombre desquelles nous distinguons la pyrolyse, la gazéification, la combustion, la méthanisation et la fermentation et ce, en fonction de la biomasse. L'économie de la plupart des pays Africains repose sur l'agriculture, faisant de l'Afrique, un potentiel agricole. Cette production agricole génère des déchets qui méritent d'être valorisés.

Selon l'USDA, la production mondiale de riz pour 2010/2011 avait atteint le chiffre record de 459,7 millions de tonnes, soit 4 % de plus qu'en 2009/2010 et a atteint un seuil de 479,2 Mt en 2014, pendant que celle de maïs est de 943 Mt contre 863 Mt pour la récolte 2012/2013, selon les statistiques [3]. En effet, il est démontré que l'Afrique subsaharienne produit assez de céréales sans oublier le coton. Selon les statistiques de la FAO en 2006 [4] les taux moyens de croissance du sorgho, du maïs, du mil, du riz et du coton en Afrique de l'Ouest étaient respectivement de 1.4 %, 2.9 %, 3.5 %, 1.8 % et 4.8 %. Ainsi, le coton, le mil, le maïs et le riz viennent en tête de la production. Cependant, en termes de biomasses valorisables à partir de ces cultures agricoles, nous distinguons les balles de riz et les rafles de maïs, sachant que les feuilles, les tiges, les pailles et les sons de riz sont très souvent utilisées en milieu rural pour l'alimentation du bétail, soit pour lutter contre l'érosion du sol ou encore pour d'autres applications utiles à la vie rurale. La République du Bénin présente un fort taux en production de rafles de maïs dû à une forte production en maïs et un taux de production de balles de riz non négligeable dans les rizeries avec un taux de croissance en production de riz en pleine évolution ces dernières années [5]. Au Bénin, nous générons en moyenne 4197858T de résidus de maïs par an pendant que nous produisons moyennement 160503 de balles de riz par an à partir de nos rizeries selon les campagnes agricoles (2004/2005-2013/2014). Par ailleurs, la République du Bénin est caractérisée par un très faible taux d'électrification en milieu rural [6].

Dans ce contexte, la pyrogazéification de ces deux biomasses est envisageable pour la production d'électricité à partir du gaz de synthèse issu de la pyrogazéification. Plusieurs travaux scientifiques ont été consacrés à la détermination des paramètres cinétiques de la biomasse. Cette détermination est effectuée, soit en non isotherme [7, 8], soit en isotherme [9-15] ont assez travaillé sur les modèles cinétiques de la pyrolyse de la biomasse. L'utilisation de l'Analyse Thermo Gravimétrique (ATG), à défaut de fournir des informations sur chacune de l'ensemble des réactions qui s'opèrent en parallèles et simultanées lors de la décomposition thermique de la biomasse, donne des informations générales sur le comportement thermique global de la biomasse. L'objectif visé dans les travaux réalisés et rapportés dans le présent article est de trouver les valeurs des paramètres cinétiques caractérisant la pyrolyse des balles de riz et rafles de maïs en isotherme, après avoir déterminé leurs paramètres physicochimiques en vue de la pyrogazéification du charbon résiduel issu de la pyrolyse.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Matériel

Deux types de biomasse issus des cultures céréalières béninoises ont été étudiés : les balles de riz et les rafles de maïs. La biomasse est broyée et réduite en particules (granulométrie inférieure ou égale à 2 millimètres) avant toute manipulation. L'analyse thermogravimétrique des échantillons a été effectuée en utilisant l'appareil SETSYS -1750 CS Evol. (TG-DTA 1600°C) avec l'hélium comme gaz inerte.

### 2-2. Méthodes

La détermination du taux de cendres est effectuée selon la norme NF M 03-00326. L'indice de matières volatiles est déterminé en ATG avec une vitesse de chauffe de 5°C/min sous atmosphère inerte d'hélium avec un débit de gaz de 12NL/h. L'évaluation du taux de carbone fixe est effectuée selon la norme NF M 03-006. L'analyse élémentaire est effectuée selon la norme NF EN 15104 tandis que l'analyse physicochimique de la biomasse est faite d'après le dosage de Van Soest. Une analyse thermogravimétrique de la biomasse est réalisée pour une température de 800°C avec une vitesse de chauffe de 20°C/min. La détermination des paramètres cinétiques globaux est effectuée à température constante en faisant des paliers de 3h pour des températures de consigne respectives de 250°C, 350°C et 400°C avec une vitesse de chauffe de 20°C/min partant de la température ambiante.

## 3. Méthode analytique

Pour étudier la cinétique d'une décomposition thermique d'un solide, plusieurs chercheurs utilisent le degré de transformation  $\alpha$  définit par [7] :

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty} \quad (1)$$

Où  $m_0$ ,  $m_t$  et  $m_\infty$  sont respectivement la masse initiale de l'échantillon, la masse de l'échantillon à l'instant  $t$  et la masse de l'échantillon à la fin de la réaction. La vitesse de réaction est décrite généralement par :

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T) \times f(\alpha) \quad (2)$$

Où  $f(\alpha)$  est une fonction dont le type dépend du mécanisme de la réaction,  $K(T)$  la constante de vitesse en fonction de la température et est définie par :

$$K = A \times \exp^{-\frac{E}{R \times T}} \quad (3)$$

Où  $A$  est le facteur pré-exponentiel,  $E$  l'énergie d'activation et  $R$  la constante des gaz parfaits (8.314 J/K/mol).

[16] ont montré par exemple que la pyrolyse d'un matériau lignocellulosique dont la taille est inférieure à 0.2 cm soit 2 mm est contrôlée par une réaction chimique, celle dont la taille est comprise entre 0.2 cm-6 cm est contrôlée aussi bien par le transfert thermique que par une réaction chimique et enfin celle dont la taille est supérieure à 6 cm est contrôlée par un transfert thermique. Dans le cas de la présente étude, il s'agit de particules fines dont le diamètre est de 2 mm, par conséquent nous pouvons conclure que la réaction chimique est limitant lors de la décomposition thermique de nos échantillons. En considérant une réaction d'ordre 1 comme c'est le cas de nombreux auteurs [9] au sujet de la pyrolyse des balles de riz en thermogravimétrie, on a:

$$f(\alpha) = 1 - \alpha \quad (4)$$

Des **Equations (2) et (4)**, on a :

$$\ln(1-\alpha) = -K \times t \quad (5)$$

Le tracé de la courbe de  $\ln(1-\alpha)$  en fonction du temps permet de déterminer la constante de vitesse  $K$  pour chacune des températures. Ensuite, le tracé de la courbe  $\ln(K)$  en fonction de  $1/T$  permettra de déterminer les valeurs de  $A$  et  $E$  de chaque type de biomasse selon la **Formule 6**.

$$\ln(K) = \ln(A) - \frac{E}{R \times T} \quad (6)$$

Avec la **Formule 7**, nous évaluons selon la modèle analytique la masse de l'échantillon à tout instant  $t$  de l'expérience et ceci pour une température  $T$  constante :

$$m_t = m_\infty + \text{Exp}^{-K \times t} (1 - m_\infty) \quad (7)$$

#### 4. Résultats et discussion

Les résultats de l'analyse physicochimique de la biomasse figurent dans le **Tableau 1** pendant que l'analyse chimique des cendres réalisée à 850°C selon la norme NF M03-042 figure dans le **Tableau 2**.

**Tableau 1 : Analyse immédiate et ultime des échantillons étudiés**

Echantillons		Balles de riz	Rafles de maïs
Analyse immédiate	Humidité	7	8
	Taux de cendre	18.31	1.48
	Matières volatiles	70.6	85.05
	Taux de carbone fixe	11.09	13.47
	C	39.9	47.5
Analyse ultime	H	4.77	5.96
	O	35	42.9
	N	0.41	0.63
	S	4.9	0.42
	Cl	15.04	2.58
Analyse physicochimique	Cellulose	48.9	35
	Hémicellulose	18.4	31.4
	Lignine	14.8	7.9

**Tableau 2 : Analyse chimique des cendres**

Minéralisation	Balles de riz	Rafles de maïs
Silicium (SiO <sub>2</sub> )	93.5%	48.4%
Aluminium (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.4%	1.2%
Fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.4%	1.0%
Titane (TiO <sub>2</sub> )	<0.1%	0.2%
Calcium (CaO)	0.8%	1.4%
Magnésium (MgO)	0.4%	4.1%
Sodium (Na <sub>2</sub> O)	0.1%	0.1%
Potassium (K <sub>2</sub> O)	1.4%	30.7%
Soufre (SO <sub>3</sub> )	0.2%	0.6%
Phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.6%	9.9%
Manganèse (MnO <sub>2</sub> )	0.2%	<0.1%

L'analyse immédiate de la biomasse (balles de riz/rafles de maïs) diffère d'un auteur à un autre non seulement suivant la variété de l'espèce mais aussi et surtout en fonction de la provenance de cette dernière. C'est le cas de [17] qui obtiennent des résultats différents quant à l'analyse immédiate de quatre variétés de balle de riz (Lemont LG, ROK 14, CP 4 et Pa Potho) d'origines différentes selon le **Tableau 3**.

**Tableau 3 : Analyse immédiate de quatre variétés de riz [17]**

Balle de riz	Analyse immédiate sur matière sèche		
	Cendre	Matières volatiles	Carbone fixe
Lemont LG	20.00	66.40	13.60
ROK 14	18.80	67.30	13.90
CP 4	24.60	63.00	12.40
Pa Potho	18.20	67.60	14.20

Par ailleurs, la littérature nous renseigne sur plusieurs valeurs du taux de cendre, de la teneur en matières volatiles et celle en carbone fixe, telles indiquées dans le **Tableau 4a et 4b** respectivement pour les balles de riz et les rafles de maïs selon plusieurs auteurs.

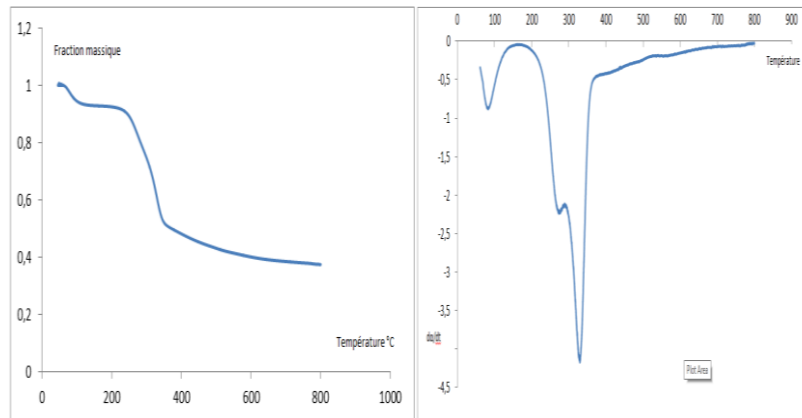
**Tableau 4a : Analyse immédiate des balles de riz selon plusieurs auteurs**

Origine de la balle de riz	Analyse immédiate			Auteurs
	Cendre	Matières volatiles	Carbone fixe	
Thaïlande : Taille : 0.25-1.0mm (MH)	17.1	59.5	15.5	Paul T Williams et al. 2000
Sud du Taiwan 0.125-0.5mm(MH)	11.7	81.93		Tsai et al.2007
Chine, <1mm (MH)	17.09	61.23	14.95	Peng Fu et al. 2012
<74µm (MS)	20.0	68.9	11.1	Nakom et al. 2007
Chine (MS)	18.91	64.27	13.85	Chao Gai et al. 2013
-	10.9	73.2	-	PEEL RB, 1989
Burkina-Faso	21.47	66.32	12.21	LBEB, 2013

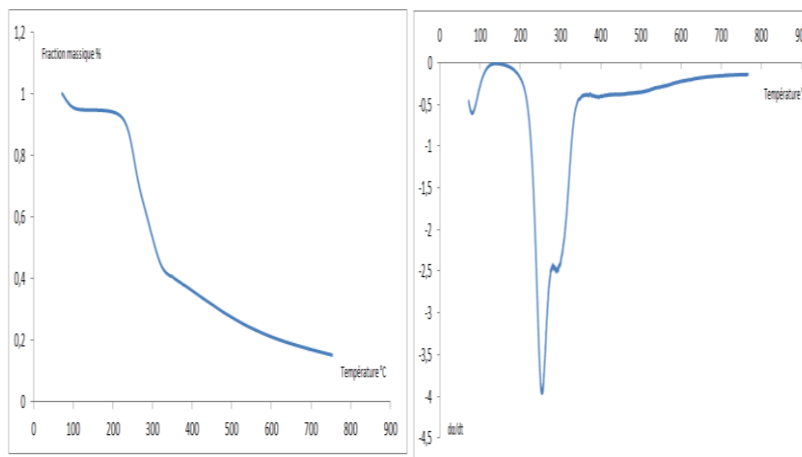
**Tableau 4b : Analyse immédiate des rafles de maïs selon plusieurs auteurs**

Origine des rafles de maïs	Analyse immédiate			Auteurs
	Cendre	Matières volatiles	Carbone fixe	
<74µm (MS)	0.9	82.2	16.9	Nakom et al. 2007
Segment (MS)	1.5	80	18.5	JENG-LIANG LIN et al.
Turky-particule (MH)	1.2	76.7	15.7	Eunda Ates et al.2009
Taiwan 1.19-1.68mm (MH)	0.9	78.7	16.1	Chang CF et al.1998
-	2.9	69.5	15.9	Xuan Liu et al. 2014
-	0.53	84	-	PEEL RB, 1989

D'après le **Tableau 4**, les balles de riz contiennent un taux important de cendre comparativement aux rafles de maïs (Pendant que le taux de cendre varie de 10.9 à 21.47 pour les balles de riz, elle est de 0.53 à 2.9 pour les rafles de maïs). Cependant, les rafles de maïs présentent un fort taux en matières volatiles. Les résultats obtenus à partir de nos analyses confirment encore une fois la variation de la composition de la biomasse agricole en fonction de la variété de l'espèce et de sa provenance tout en caractérisant chaque type de biomasse. L'analyse thermogravimétrique des échantillons nous a permis d'obtenir des thermogrammes illustrant respectivement le taux de conversion et la vitesse de conversion de la biomasse en fonction de la température de l'échantillon pour une vitesse de chauffe 20°C/min pour 800°C (**Figures 1 et 2**)



**Figure 1 : ATG et DTG des particules (2 mm) de balles de riz**



**Figure 2 : ATG et DTG des particules (2 mm) des rafles de maïs**

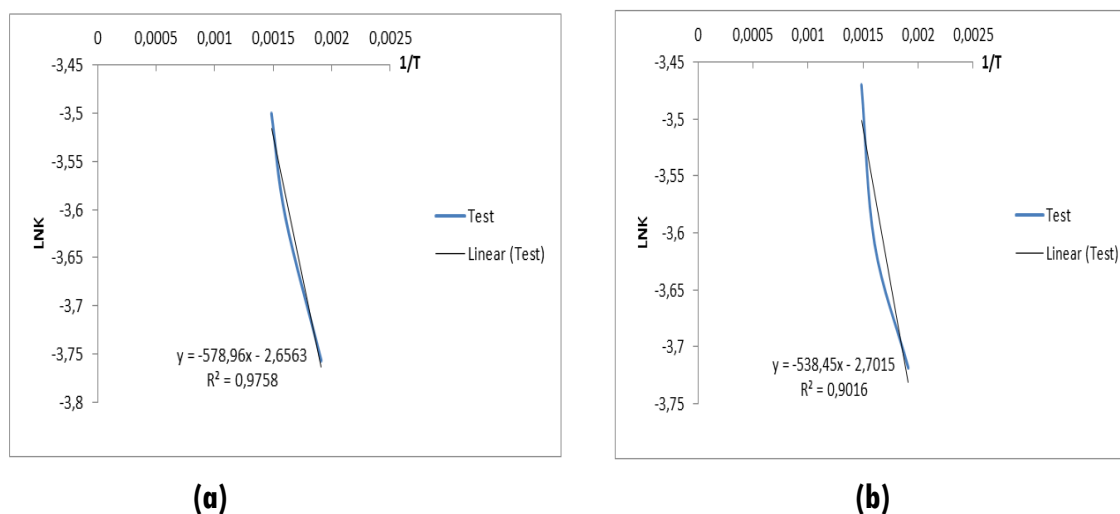
On s'aperçoit bien à travers les Figures **1 et 3**, que les rafles de maïs, à température et vitesse de chauffage (800°C et 20°C/min) égales dans les deux cas, présentent un taux de conversion supérieur à celui des balles de riz. Lors de l'étude du rendement et des caractéristiques des balles et pailles de riz suivis des rafles de maïs, au cours d'une pyrolyse rapide, [28] ont montré que les rafles de maïs présentent un taux élevé de conversion dû principalement à la présence d'un fort taux de métal ionique tels que (Na, Mg, Ca et K) responsables de l'augmentation du taux de volatilisation, outre son faible taux en lignine et un taux relativement important de cellulose. Si ce taux est de 64.03 % pour les balles de riz, il avoisine par contre 94 % pour les rafles de maïs à 800°C à vitesse de chauffe de 20°C/min. Les **Figures 2 et 3** présentent trois pics : le premier relatif à l'évaporation de l'humidité contenue dans la biomasse, le second pour la décomposition de l'hémicellulose et le dernier pour celle de la cellulose. Les températures de décomposition thermique de l'hémicellulose des balles de riz et rafles de maïs sont respectivement de 265°C et 250°C pendant que la décomposition thermique de la cellulose est de 325°C pour les balles de riz et 280°C pour les rafles de maïs. [29] ont montré que les intervalles de conversion de l'hémicellulose et de la cellulose sont respectivement compris entre 220°C-315°C et 315°C-400°C. [30] ont montré également que l'hémicellulose, représenté par le xylane, se décompose entre 220°C et 320°C pendant que la cellulose se décompose entre 250°C et 360°C.

De même, [9] ont montré que la décomposition thermique de l'hémicellulose, de la cellulose et de la lignine ont respectivement lieu entre les intervalles de températures (250°C-350°C), (325°C-400°C) et (200°C-720°C qui marque la température finale de la pyrolyse dans leur cas). La lecture des **Figures 1, 2, 3 et 4** montrent bien que la volatilisation de la biomasse s'effectue entre 250°C et 400°C. [31, 32] ont montré que la décomposition thermique des balles de riz s'effectue en trois principales étapes: le séchage dont la température est comprise 40°C et 150°C, l'élimination des matières volatiles dont la température est comprise entre 215°C et 350°C, outre la combustion du carbone résiduel dont la température de réaction se situe entre 350°C et 690°C. Tandis que [33] après une étude cinétique des résidus de maïs (feuilles, tiges, peau et rafles), montrent que les rafles de maïs se décomposent entre 227°C-500°C pour de petites particules de l'ordre de 0.60-1 mm avec 0.77 mm pour leur taille moyenne. Cependant, la plupart des auteurs ne déterminent que les paramètres cinétiques pour chacun des trois composés de la biomasse laissant de côté les paramètres cinétiques globaux qui en principe devrait nous permettre d'effectuer une comparaison. Les données de la thermogravimétrie sont utilisées dans la détermination des paramètres cinétiques globaux de la biomasse. A l'issue du tracé des courbes isothermes donnant  $\ln(1-\alpha)$  en fonction du temps pour chaque température 250°C, 350°C et 400°C, nous obtenons la pente qui représente la constante cinétique pour chaque biomasse. Le **Tableau 5** récapitule les résultats relatifs aux constantes cinétiques et linéaires pour chaque isotherme et pour les deux types de biomasse étudiés.

**Tableau 5 : Valeurs des constantes cinétiques et constantes linéaires pour chaque isotherme**

Biomasse	Balles de riz			Rafles de maïs		
	Température 250°C	350°C	400°C	250°C	350°C	400°C
K	0.02336	0.02711	0.03019	0.02427	0.02707	0.03112
R <sup>2</sup>	0.8722	0.9081	0.9334	0.8803	0.9002	0.9443

La détermination des paramètres cinétiques globaux proprement dits s'effectue connaissant la pente de l'équation 6 et l'ordonnée à l'origine (voir **Figure 3 (a) et 3(b)**).



**Figure 3 : (a) Evolution de  $\ln(K)$  en fonction de  $1/T$  des balles de riz, (b) Evolution de  $\ln(K)$  en fonction de  $1/T$  des rafles de maïs**

L'exploitation minutieuse des données fournies par ces **Figures** nous a permis d'accéder aux constantes cinétiques globales déterminées pour les deux types de biomasse et présentées dans le **Tableau 6**.

**Tableau 6** : Constantes cinétiques de pyrolyse des balles de riz et rafles de maïs

	Balles de riz	Rafles de maïs
E (J/mol)	4813.487	4476.663
A (min <sup>-1</sup> )	0.0702	0.0671

Les paramètres cinétiques d'une même biomasse varient d'un auteur à un autre et restent dépendant de la composition physicochimique de chaque type de biomasse y compris la structure physique et sans oublier surtout l'influence des métaux (K, Ca, Mg et Na) sur la décomposition thermochimique de la biomasse [28, 34]. Aussi, dépendent-ils de la méthode de détermination (isotherme ou non isotherme). Par exemple, après avoir déterminé les paramètres cinétiques en isotherme relatifs aux faibles températures (Température relative au premier pic de la DTG : 330°C) et aux fortes températures (Température relative au deuxième pic de la DTG : 380°C) des particules de balles de riz ayant des diamètres inférieurs à 1mm pour une vitesse de chauffe de 20°C/min, [9] déduisent les paramètres cinétiques globaux des balles de riz : 105.3 KJ/mol et  $8.47 \times 10^5 \text{ S}^{-1}$ . Remarquons tout de même que dans leur expérience, l'hémicellulose et la cellulose se décomposent à des températures très élevées comparativement à celles obtenues dans nos travaux (265°C pour l'hémicellulose et 325°C pour la cellulose). Ce qui peut se justifier non seulement par la variété de l'espèce et par la provenance de cette dernière (lesquelles s'illustrent bien par leurs caractéristiques physicochimiques) mais aussi par les conditions expérimentales et surtout par la géométrie des particules. Dans notre expérience, la biomasse une fois à l'intérieur du réacteur, subit une décomposition thermique avant d'atteindre la température de consigne, température à laquelle elle se volatilise pendant trois heures de temps.

## 5. Conclusion

L'étude ainsi rapportée nous a permis d'évaluer et de faire une étude comparative des caractéristiques des balles de riz et des rafles de maïs, deux types de biomasses béninoises distincts l'un de l'autre, non seulement, à travers l'analyse ultime, immédiate, mais aussi celle physicochimique. Il est à retenir que les balles de riz contiennent un fort taux de cendre contrairement aux rafles de maïs (18.31 % contre 1.48 %) tandis que les rafles de maïs présentent un fort taux de conversion au détriment des balles de riz. Aussi, faut-il rappeler que la décomposition thermique de ces biomasses a été effectuée entre 250°C et 400°C avec une énergie d'activation de 4476.663 J/mol pour les rafles de maïs et 4813.487 J/mol pour les balles de riz en isotherme pour des paliers de 3 h. Dans ce contexte, une pyrogazéification de ces biomasses est envisagée afin de quantifier l'énergie issue de leur valorisation.

## Références

- [1] - International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, 2004.
- [2] - <http://www.planetoscope.com/cereales/192-production-de-riz-dans-le-monde.html>, le 16/12/2014.
- [3] - International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, 2010.
- [4] - BLEIN ROGER, BIO GOURA SOULE, BENOIT FAIVRE DUPAIGRE, BORGUI YERIMA, Les potentialités agricoles de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), Février 2008.

- [5] - Direction de la statistique du ministère de l'Agriculture, de l'élevage et de la Pêche du Bénin (MAEP) : Evolution de la production végétale de 1995-2013.
- [6] - YATOPA ADRIEN BIO, SAKARIYOU MAHMAN, KOFFI ABBLE, Projet développer le Bénin à partir des sources d'énergies renouvelables : Identification et cartographie des potentialités et sources d'énergie renouvelables assorties des possibilités d'exploitation, rapport final, PNUD.
- [7] - L. T. VLAEV, I. G. MARKOVSKA, L. A. IYUBCHEV, Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk, *Thermochimica (2006) acta 406*, pages : 1-7.
- [8] - A SHARMA, T. R. RAO, *Bioresource Technol.*67 (1999) 53.
- [9] - BESLER SERPIL and PAUL T. WILLIAMS, The pyrolysis of rice husks in a thermogravimetric analyser and static batch reactor, Department of Fuel and Energy, The University of Leeds, Leeds LS.2 9JT. UK, 1992.
- [10] - S. ATUL, R. T. RAJESWARA, Kinetics of pyrolysis of rice husk, *Bioresource Technology* 67, 53-59, 1999.
- [11] - C. A. KOUFOPANOS, G. MASHIO, G. LUCCHESI, *Can.J. Chem. Eng.*67 (1989) 75.
- [12] - C. D.BLASI, BRANCA, G. DERRICO, Degradation characteristics of straw and washed straw. *Thermochimica Acta* 364, 133-142, 2000.
- [13] - CAO et al., Pyrolytic behavior of waste corn cob. *Bioresource Technology* 94, 83-89, 2004.
- [14] - CAI, LIU et al., New distributed activation energy model: Numerical solution and application to pyrolysis kinetics of some types of biomass. *Bioresource Technology* 99, 2795-2799, 2008.
- [15] - ZABANIOTOU et al.; Sunflower shells utilization for energetic purpose in an integrated approach of energy crops : Laboratory study pyrolysis and kinetics. *Bioresource Technology* 99, 3174-3181, 2008.
- [16] - P. S. MAA and R. C. BAILIE, *Combust. Sci. Tech* 1973, 6, 1.
- [17] - K. G. MANSARAY, A. E. GHALY, Determination of kinetic parameters of rice husks in oxygen using thermogravimetric analysis, *Biomass and Bioenergy*, Volume 17, Issue 1, Pages 19-31, July 1999.
- [18] - W. T. TSAI, M. K. LEE, Y.M. CHANG, Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions *Bioresource Technology*, Volume 98, Issue 1, Pages 22-28, January 2007.
- [19] - PENG FU, SONG HU, JUN XIANG, WEIMING YI, XUEYUAN BAI, LUSHI SUN, SHENG SU, Evolution of char structure during steam gasification of the chars produced from rapid pyrolysis of rice husk, *Bioresource Technology*, Volume 114, Pages 691-697, June 2012.
- [20] - NAKORN WORASUWANNARAK, TARO SONOBE, WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Pyrolysis behaviors of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 78, Issue 2, Pages 265-271, March 2007.
- [21] - CHAO GAI, YUPING DONG, TONGHUI ZHANG, The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non-isothermal conditions, *Bioresource Technology*, Volume 127, Pages 298-305, January 2013.
- [22] - RB PEEL, Fluidized bed combustion and gazification of biomass. *Proceedings of the 5th E.C Conference on Biomass for Energy and Industry*, II. London : Elsevier Applied Science, 1989.
- [23] - Laboratoire Biomasse et Biocarburant (LBEB) du 2IE, 2012/2013.
- [24] - JENG-LIANG LIN, HAROLD M. KEENER and ROBERT H. ESSENHIGH. Pyrolysis and Combustion of Corncobs in a Fluidized Bed: Measurement and Analysis of Behavior. *Combustion and Flame*, Special Issue: 25th Symposium (International) on Combustion Papers 271-282, 1995.
- [25] - FUNDA ATES, M. ASLI, Influence of temperature and alumina catalyst on pyrolysis of corncob, *Fuel* 88, (2009) 1991-1997.
- [26] - CF CHANG, CY CHANG, SL LEE, SY WANG, PC CHIANG, SK TSENG, WT TSAI, Effect of physical carbonization and activation methods on the preparation of activated carbon from corn cob. *J Chin Inst Environ Eng*, 8 : 227-32, 1998.
- [27] - XUAN LIU, YANG ZHANG, ZIFU LI, RUI FENG, YAOZHONG ZHANG, Characterization of corncob-derived biochar and pyrolysis kinetics in comparison with corn stalk and sawdust, *Bioresource Technology* 170, (2014) 76-82.

- [28] - JANEWIT WANNAPEERA, NAKORN WORASUWANNARAK and SUNEERAT PIPATMANOMAI, Product yields and characteristics of rice husk, rice straw and corncob during fast pyrolysis in a drop-tube/fixed-bed reactor, *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 30 (3), 393-404, May - Jun 2008.
- [29] - HAIPING YANG, RONG YAN, HANPING CHEN, DONG HO LEE, CHUGUANG ZHENG, Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, *Fuel*, Volume 86, Issues 12-13, Pages 1781-1788, August 2007.
- [30] - F. SHAFIZADEH, *Fuels from waste*, Eds L. Anderson and D.A. Tillman, Academic Press, New York, 1977.
- [31] - A. CHAKRAVETY, P. MISHRA, K. BANERJEE, *Thermochim. Acta* 94, 267, 1985.
- [32] - H. D. BANERJEE, S. SEN, H. N. ACHARYA, *Mater. Sci. Eng.* 52, 173, 1982.
- [33] - ZHENGQI LI, WEI ZHAO, BAIHONG MENG, CHUNLONG LIU, QUNYI ZHU, GUANGBO ZHAO, Kinetic study of corn straw pyrolysis: Comparison of two different three-pseudocomponent models, *Bioresource Technology* 99, (2008) 7616-7622.
- [34] - F. SHAFIZADEH, *Adv. Carbohydr. Chem*, 23, 419, 1968