

**Lantosoa Razanamparany RATSIMAMANGA<sup>1, 2</sup>, José ANDRIAMAMPIANINA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ecole de Génie Industriel, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

<sup>2</sup>Ecole doctorale Ingénierie et Géoscience de l'Université d'Antananarivo

Correspondant : [lantorazanamparany@gmail.com](mailto:lantorazanamparany@gmail.com)

## Résumé

Le développement économique durable, la sécurité alimentaire et la gestion de l'environnement sont quelques-unes des plus grandes priorités du monde moderne, qui concernent les générations présentes et futures. Les crises multidimensionnelles du changement climatique mondial, les pénuries d'énergie et d'eau ainsi que la dégradation des terres agricoles due à l'épuisement des nutriments constituent des défis technico-socio-économiques. Portant intérêt sur la gazéification du mélange charbon de terre - balle de riz comme source d'énergie, le présent travail consiste en la comparaison des différents résultats de recherches, afin de mettre en exergue les effets des paramètres caractéristiques, comme ceux de la température de combustion.

Une co-combustion doit être mise en œuvre avec d'autres approches, parmi lesquelles le régime de température dans les gammes de volatilisations, au cours de la pyrolyse des combustibles, peut fournir une solution significative à long terme.

En effet, des échantillons issus des régions de Jilin en Chine, d'Antananarivo et de Tshikondeni d'Afrique du Sud sont sujets d'analyses immédiates, élémentaires et thermogravimétriques. L'essentiel de la recherche a fait remarquer des forts paramètres cinétiques, suite à une augmentation du taux de chauffage. Les températures caractéristiques de combustion des échantillons qui sont la température d'inflammation, la température de dégagement maximal de matières volatiles, la température d'épuisement, se trouvent toutes abaissées avec une diminution de la vitesse de chauffe. Ainsi, l'augmentation de la vitesse de chauffage diminue la réactivité du combustible, car une courte durée de forte combustion peut entraîner inévitablement la formation de certaines parties du combustible imbrulées et ne permet pas aux réactions de se réaliser suffisamment.

**Mots clés :** Thermogravimétrie, cinétique, réactivité.

## Abstract:

### INFLUENCE OF COMBUSTION PARAMETERS DURING THE PYROLYSIS PHASE OF A COMBUSTIBLES MIXTURE

Sustainable economic development, food security and environmental management are some of the greatest priorities of the modern world, for present and future generations. The multidimensional crises of global climate change, energy and water shortages, and the degradation of agricultural land due to nutrient depletion are techno-socio-economic challenges. Bearing interest on gasification of the mixture of coal - rice husks as a source of energy, the present work consists in the comparison of the various research results, in order to highlight the effects of the characteristic parameters, such as those of the temperature of combustion.

Co-combustion must be implemented with other approaches, among which the temperature regime in the volatilization ranges, during the pyrolysis of fuels, can provide a significant long-term solution.

Indeed, samples from the regions of Jilin in China, Antananarivo and Tshikondeni of South Africa are subject to immediate, elementary and thermogravimetric analyzes. Most of the research has noted strong kinetic parameters, following an increase in the heating rate. The characteristic combustion temperatures of the samples, which are the ignition temperature, the maximum volatile evolution temperature, the exhaust temperature, are all lowered with a decrease in the heating rate. Thus, the increase in the heating rate reduces the reactivity of the fuel, because a short period of high combustion can inevitably lead to the formation of some parts of the unburned fuel and does not allow the reactions to be realized sufficiently.

**Keywords:** Thermogravimetry, kinetics, reactivity.

Fintina:

### NY FIANTRAIKAN'NY MASONTSIVANA MARIPANA MANDRITRA NY DINGANA PYROLYSIS NA SOLIKA MIFANGARO

Ny fampandrosoana ara-toekarena maharitra, ny fiarovana ara-tsakafo sy ny fitantanana ny tontolo iainana dia anisan'ireo laharam-pahamehana lehibe indrindra amin'ny tontolo maoderina, ho an'ny taranaka ankehitriny sy ny ho avy. Ny krizy mipaka amin'ny lafiny maro, ny fiovaovan'ny toetr'andro, ny angovo tsy mahahenika sy ny tsy fahampian-drano, ary ny fahasimban'ny tany fambolena vokatry ny fihenana ny singa mahavelona ao anatiny, dia fanamby ara-teknolojika-ekonomika. Mifandraika indrindra amin'ny "gazéification" ny fangarona arintany sy akofambary ho

loharanon'angovo, ity fikarohana ity dia manamarika ny vokatry ny tahana maripana, tamin'ny fandinihina ny voka-pikarohana maromaro, mba hampisongadina ny fiantraikan'ireo masontsivana manokan'ny maripana toy ny maripanan'ny firehetana, ny famaizana ary ny "épuisement". Rariny loatra raha ampiarahana amina fomba fijery isankarazany, toy ny tsinjara maripana sy ny maripana mamoaka entona mandritra ny pyrolysis, ny fanantanterahana ny "co combustion", mba andrandraina vahaolana maharitra. Raha ny marina, ny santionany avy tamin'ny faritra Jilin ao Shina, Antananarivo sy Tshikondeni ao Afrika Atsimo, dia mifandrindra amin'ny fanadihadiana fototra sy "thermogravimétrie". Ny ankamaroan'ny fikarohana dia nanamarika masontsivana ara-kinetika matanjaka, nanaraka ny fitomboan'ny hafaingan'ny hafanana. Ny maripanan'ny firehetana, ny famaizana ary ny "épuisement" dia midina miaraka amin'ny fiheanan'ny hafaingan'ny famanana daholo, ho an'ny santionany avy. Noho izany, ny fiakaran'ny hafaingan'ny famanana dia mampidina ny "réactivité" ny fandrehitra, satria ny hahohezan'ny faharetan'ny "combustion" dia miteraka tsy satry, faritra tsy may ary koa tsy fahafahan'ny "réactions" mivelatra.

Teny manandanja: « Thermogravimétrie », kinetika, « réactivité ».

## 1- Introduction

Le développement économique durable, la sécurité alimentaire et la gestion de l'environnement sont quelques-unes des plus grandes priorités du monde moderne, qui concernent les générations présentes et futures. Les crises multidimensionnelles du changement climatique mondial, les pénuries d'énergie et d'eau ainsi que la dégradation des terres agricoles due à l'épuisement des nutriments constituent des défis socio-économiques. Portant intérêts sur la gazéification de mélange charbon de terre - balle de riz comme source d'énergie, le présent travail consiste en la comparaison des différents résultats de recherches, afin de mettre en exergue les effets des paramètres caractéristiques, comme ceux de la température de combustion.

Par rapport à la combustion du charbon pur, la co-combustion du charbon avec la biomasse aide à réduire les niveaux des émissions de polluants NOx et SOx des centrales thermiques au charbon [1], [2], [3]. Le charbon et la biomasse ont une composition assez différente. Co-gazéification peut également réduire les coûts de carburant [4], minimiser les déchets et réduire la pollution des sols et de l'eau, en fonction de la composition chimique de la biomasse utilisée [5], [6], [7].

Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, les professionnels du charbon sont obligés de brûler des carburants renouvelables, tels que des déchets ou des biocombustibles issus des cultures énergétiques comme option la moins coûteuse. Les impacts de la co-combustion du charbon avec les résidus de la biomasse pourraient contribuer de manière significative à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de la production d'énergie.

Une co-combustion doit être mise en œuvre avec d'autres approches [8], parmi lesquelles le régime de températures dans les gammes de volatilisations, au cours de la pyrolyse des combustibles, peut fournir une solution significative à long terme.

En effet, dans ce travail, des échantillons issus des régions de Jilin en Chine, d'Antananarivo de Madagascar et de Tshikondeni d'Afrique du Sud (Sugar Milling Research Institute) sont sujets d'analyses immédiates, élémentaires, thermogravimétriques et cinétiques.

## 2- Matériel et méthodes

La présente étude est basée sur les résultats des valeurs de certaines références, y compris les nôtres, afin de mettre en exergue la raison d'être du thème.

En passant, signalons que les caractéristiques d'un combustible dépendent des régions où la biomasse qui le constitue était récoltée [9], [10].

Des résultats d'analyses sont tirés des références qui traitaient les échantillons de Jilin de Chine, d'Antananarivo de Madagascar et de Free State Province d'Afrique du Sud. Les premiers travaux traitaient les réactivités des biomasses dans différentes plages de températures et sous différentes vitesses de chauffage. Les seconds concernaient l'étude du comportement des bagasses de canne à sucre et de rafles de maïs mélangées chacune avec du charbon de terre. Les troisièmes consistaient en la recherche de la vitesse de chauffe optimale dans la pyrolyse d'un mélange de charbon de terre - balle de riz destiné à la gazéification.

### 2-1 Des biomasses de Chine [11]

Qing Wong et al. travaillaient en 2014 sur des échantillons de tige de maïs (TM), de paille de riz (PR), de balle de riz (BR) et de sciure de bois (SB) qui provenaient tous de la région de Jilin en Chine.

Les résultats de leurs analyses immédiates et élémentaires sont résumés dans le **Tableau 1**.

Les échantillons ont été chauffés de la température ambiante jusqu'à 850 ° C, à la vitesse de chauffage 20 °C / min. La **Figure 1** montre les évolutions des pertes de masse (TG) et les vitesses de perte de masse (DTG) en fonction des températures. De ces courbes, on a obtenu le **Tableau 2**.

L'auteur de la référence [11] a utilisé la méthode de Coats-Redfern pour évaluer les paramètres cinétiques, pour chacun de leurs échantillons dans une phase 1, aux environs de 130 à 400°C, et la phase 2 de 380 à 600 °C, dont nous pouvons les résumer sur le **Tableau 3**.

L'évolution des réactivités dans la phase 1, phase de dégradation des matières volatiles, et la phase 2, phase de dégradation du carbone fixe, ont été analysées pour les 4 échantillons **Figure 2**. On rappelle que l'expression  $\ln(\frac{1}{T_2} \ln(1 - \alpha))$  définit la réactivité de l'échantillon [11], [12].

Sur la **Figure 3**, les auteurs de [11] ont pris la TM, pour étudier l'influence du taux de chauffage 10 ; 20 ; 50 °C/min sur le procédé de pyrolyse des biomasses.

Les effets de la variation de vitesses de chauffe seront montrés sur le **Tableau 4**.

### 2-2 La balle de riz de Madagascar [12]

Comme le riz est la source de revenu des ménages dans 45 % des communes de Madagascar, sur presque toutes les Hautes-Terres de la grande Ile, dans les régions du Moyen-Ouest, Moyen- Est et celle du Menabe, le riz est la principale culture occupant les terres agricoles [13], [14], l'étude de la référence [12] trouve son intérêt sur ce point de vue, en se penchant sur les résidus d'une des usines à décortiqueuses de riz de la région centrale de Madagascar.

Les analyses immédiate et élémentaire ont pu sortir les résultats présentés sur le **Tableau 5**.

L'analyse thermogravimétrique reflète les comportements des balles de riz sous une vitesse de chauffage 10°C/mn (**Figure 4**).

Par la méthode Coats-Redfern, les paramètres cinétiques sont déterminés et ils sont regroupés dans le **Tableau 6**.

### 2-3 Des échantillons d'Afrique du sud [15]

Le travail d'Aboyade [15] vise à obtenir des informations sur le comportement thermique et la cinétique de volatilisation des tiges de maïs TM, des rafles de maïs RM, de la bagasse de canne à sucre BG et du charbon de terre Ch1. Les trois matières premières TM, RM et BG représentent la majeure partie des résidus agricoles en Afrique du Sud. Des épis et de maïs séchés ont été récoltés dans une ferme à « Free State Province », peu après la récolte des céréales en 2008. La bagasse de canne à sucre BG utilisée a été fournie par l'Institut sud-africain « Sugar Milling Research Institute » SMRI. Les résidus de maïs séparés en épis (RM) et en tiges de maïs (TM), étaient tous obtenus des fermes.

L'échantillon de charbon Ch1 utilisé était un mélange de divers charbons durs sud-africains typiques qui peuvent être décrits comme étant de qualité inférieure, avec une teneur élevée en cendres et en inertinite. Rappelons que l'inertinite est un composant microscopique, un macéral, riche en oxygène et à forte teneur en hydrogène indiquant la faible teneur en matières volatiles du charbon le contenant [16], [17], [18].

Les caractéristiques immédiates et élémentaires de TM, RM, BG et Ch1 tirées de cette étude sont résumées dans le **Tableau 7**.

Les résultats d'analyse TG et DTG des échantillons sont représentés sur les courbes de la **Figure 5**.

La biomasse, ligneuse ou herbacée, est principalement composée de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et des matières extractives et inorganiques en de moindre proportion. La cellulose est généralement le principal composant des tissus de la plante [19], (30-50 % en poids), suivie des hémicelluloses (20-40 % en poids) puis de la lignine (15-25 % en poids) [15] La volatilisation de la biomasse est basée sur le comportement de dégradation de ses composants lignocellulosiques individuels. Un exemple des évolutions de dégradation de ces composants a été fait sur la bagasse de canne à sucre BG, et de la rafle de maïs RM, sur la **Figure 7**.

### 2-4 Charbon de terre de la référence [11]

Des phénomènes géologiques anciens, des investigateurs géologues, climatologues, paléontologues, géophysiciens et géographes [20], les auteurs des références [21] et [22] arrivaient à réunir leurs données d'études et ont projeté que Madagascar est un fragment de l'Afrique australe [23] [24] et qu'après l'ère carbonifère, il s'était détaché de cette dernière en ramenant sa grande réserve de charbon avec lui.

Ratsimamanga et al. [12] travaillent le charbon type Tshikondeni d'Afrique du Sud, qui est de la même famille, du même groupe que celui de la Sakoa-Madagascar.

Les analyses immédiate et élémentaire aboutissent au **Tableau 8**.

L'analyse TG et DTG de Ch2 aboutit à la **Figure 8**.

Les paramètres cinétiques étaient déduits dans les deux intervalles décrits sur le **Tableau 9**.

### 2-6 Des mélanges de deux constituants de combustible.

A la vitesse de chauffe 10 °C/mn, les **Figures 9 et 10** montrent respectivement les courbes DTG des mélanges Ch1-BG et Ch1-RM (**Figure 9**), puis Ch2-BDR (**Figure 10**) à différentes proportions en masse.

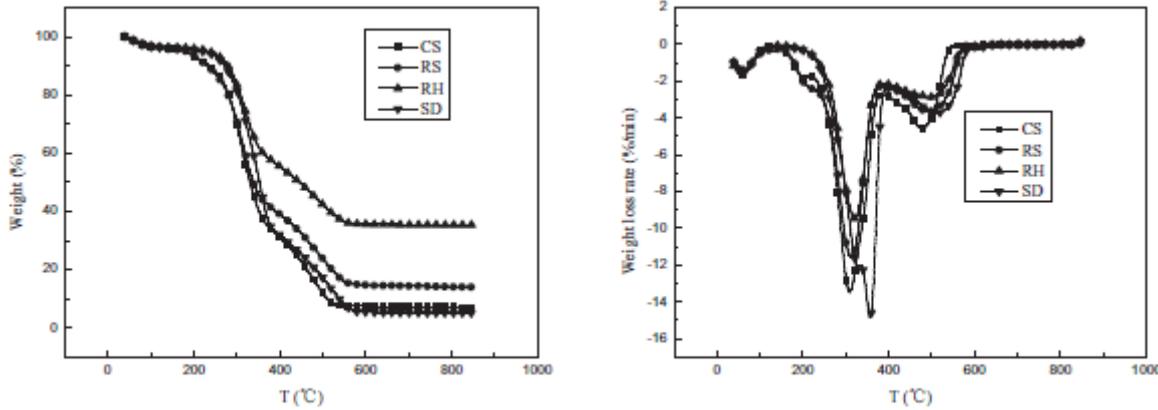
### 3- RESULTATS

Echantillon	Analyse immédiate [%]					Analyse élémentaire [%]			
	Hm	MV	Cd	CF	PC [J/kg]	C	H	O	N
TM	7,40	69,86	6,06	16,68	15286,78	37,95	6,47	40,76	0,77
PR	7,05	66,81	9,56	16,58	14468,90	36,55	5,49	40,01	0,78
BR	7,16	51,72	28,95	12,17	11453,77	36,31	4,05	22,90	0,51
SB	6,70	74,90	8,25	10,15	13617,06	45,55	5,42	33,31	0,60

**Tableau 1:** Les résultats des analyses immédiates et élémentaires des TM, PR, BR, SB [10]

TM : tige de maïs – PR : paille de riz – BR : balle de riz – SB : sciure de bois.

Hm : Humidité – M : Matières volatiles – Cd : Cendre – CF : carbone fixe – PC : Pouvoir calorifique – C : Teneur en carbone – H : Teneur en hydrogène – O : Teneur en oxygène – N : Teneur en azote.



Courbes TG des échantillons [11]

Courbes DTG des échantillons [11]

**Figure 1:** Courbes TG et DTG des TM, PR, BR, SB pour une vitesse de chauffage de 20 °C/mn [11]

CS : Tige de maïs TM – RS : Paille de riz PR – RH : Balle de riz BR – SD : Sciure de bois SB.

Echantillon	T <sub>i</sub> [°C]	T <sub>1</sub> [°C]	(dW/dt) <sub>1</sub> max [%/min]	T <sub>2</sub> [°C]	(dW/dt) <sub>2</sub> max [%/min]	T <sub>e</sub> [°C]
TM	261	308	13.49	475	4.57	535
PR	257	313	11.56	492	3.65	564
BR	276	322	09.49	495	2.89	568
SB	293	357	14.86	512	3.73	578

**Tableau 2:** Paramètres caractéristiques de combustion de TM, PR, BR, SB sous une vitesse de chauffage 20 °C/min [11]

T<sub>i</sub>: Température d'inflammation - T<sub>1</sub>: Température du premier extremum - T<sub>2</sub>: Température du deuxième extremum

(dW/dt)<sub>1</sub> max : vitesse de conversion dans la plage de température T<sub>1</sub>

(dW/dt)<sub>2</sub> max : vitesse de conversion dans la plage de température T<sub>2</sub>

Echantillon	Intervalle de température [°C]	Energie d'activation E [kJ/mol]	Facteur d'Arrhenius A [min <sup>-1</sup> ]
TM	130-383	62.39	1.42x10 <sup>5</sup>
	383-555	124.02	2.36x10 <sup>8</sup>
TR	142-390	62.20	1.44x10 <sup>5</sup>
	390-586	102.06	3.49x10 <sup>6</sup>
BR	154-388	78.09	2.97x10 <sup>6</sup>
	388-586	98.61	2.19x10 <sup>6</sup>
SB	155-400	75.07	1.08x10 <sup>6</sup>
	400-597	108.40	7.62x10 <sup>6</sup>

**Tableau 3:** Paramètres cinétiques par la méthode de Coats-Redfern de la combustion de TM, TR, BR, SB [11].

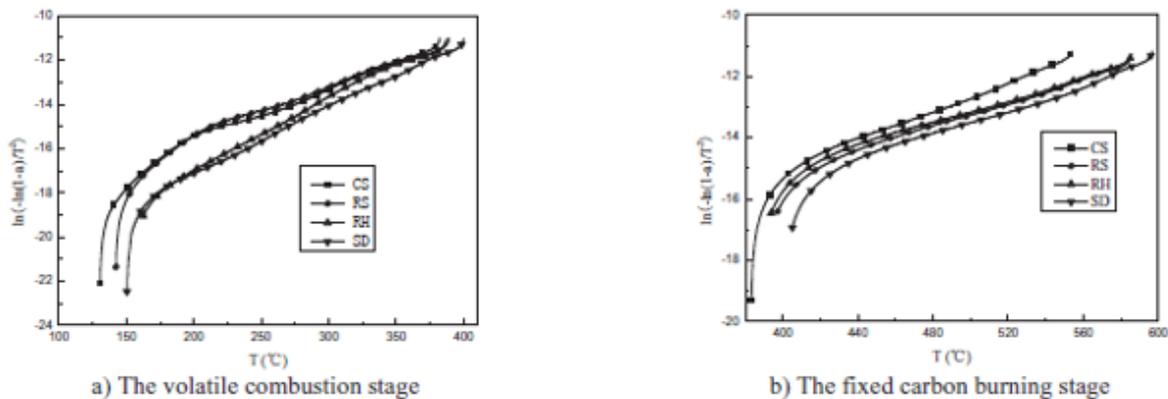


Figure 2 : Réactivités des TM, TR, BR, SB à la vitesse de chauffage 20°C/min [11]

CS : Tige de maïs TM – RS : Paille de riz PR – RH : Balle de riz BR – SD : Sciure de bois SB.

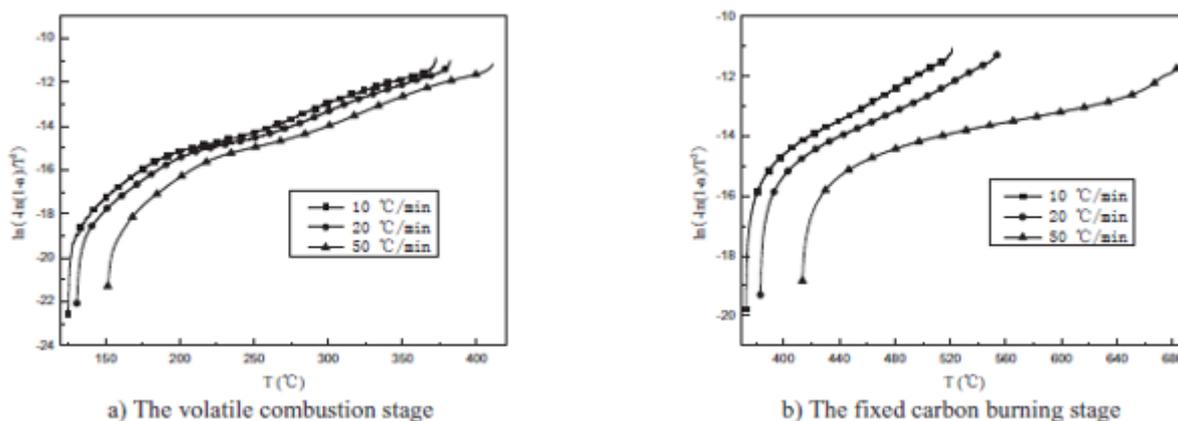


Figure 3 : Réactivité de TM, à différentes vitesses de chauffe, aux phases de combustion de matières volatiles et carbone fixe [11]

Vitesse de chauffage [°C/mn]	T <sub>i</sub> [°C]	T <sub>e</sub> [°C]	T <sup>1</sup> max [°C]	(dW/dt) <sup>1</sup> max [%/mn]	T <sup>2</sup> max [°C]	(dW/dt) <sup>2</sup> max [%/mn]
10	251	509	296	6,59	456.15	2.54
20	261	535	308	13,49	475.23	4.57
50	284	676	335	31,66	534.78	5.04

Tableau 4 : Paramètres caractéristiques de la combustion de TM à différentes vitesses de chauffe [11].

T<sub>i</sub> la température d'inflammation, T<sub>e</sub> température d'épuisement, T<sup>1</sup>max température du premier pic, T<sup>2</sup>max température du deuxième pic, (dW/dt)<sup>1</sup> max vitesse de conversion de la phase du premier grand dégagement et (dW/dt)<sup>2</sup> max la vitesse de conversion à la phase du deuxième dégagement.

Paramètres	Balle de riz [BDR]
<b>Analyse immédiate</b>	
Humidité [%]	7,29
Matières volatiles [%]	72,93
Cendre [%]	17,66
Carbone fixe [%]	9,41
Pouvoir calorifique [MJ/kg]	14,83
<b>Analyse élémentaire</b>	
C [%]	42,1
H [%]	5,01
O [%]	37,58
N [%]	0,35
S [mg/kg]	0,04

Tableau 5 : Les analyses immédiate et élémentaire de balles de riz BDR [12]

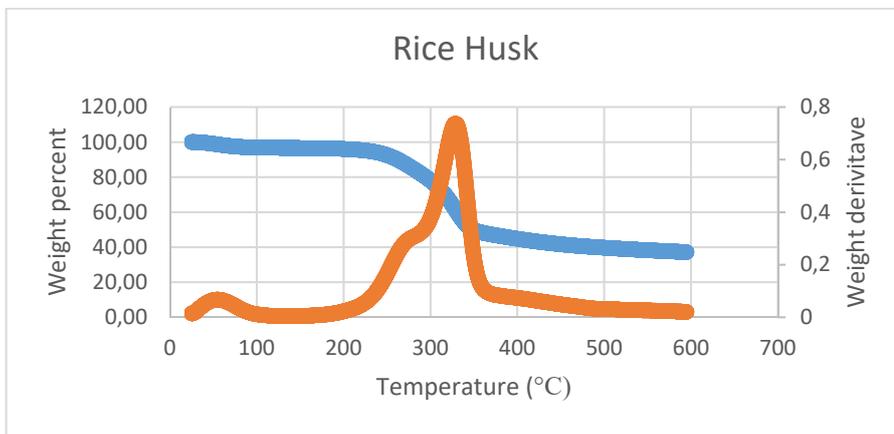


Figure 4 : Courbe TG et DTG sous vitesse de chauffe 10 °C/min de la balle de riz de Madagascar [12].

Balle de riz	Intervalle de températures	Energie d'activation E [kJ/mol]	Facteur d'Arrhenius A[s <sup>-1</sup> ]
	150-400 °C	83,31	2,77x10 <sup>6</sup>
	400-600 °C	78,84	0,02x10 <sup>6</sup>

Tableau 6 : les paramètres cinétiques lors de la pyrolyse à la vitesse de chauffe 10 °C/min de BDR [12]

Paramètres	Bagasse de canne à sucre [BG1]	Tige de maïs [TM1]	Rafle de maïs [RM1]	Charbon [Ch1]
<b>Analyse immédiate</b>				
Humidité [%]	6,7	6,9	7,0	4
Matières volatiles [%]	91,7	84,1	84,3	31,7
Cendre [%]	10,3	24,5	1,6	38,6
Carbone fixe [%]	8,3	15,9	15,7	68,3
Pouvoir calorifique [MJ/kg]	16,6	13,2	18	17,4
<b>Analyse élémentaire</b>				
C [%]	43,1	34,2	45,7	45,4
H [%]	5,7	4,8	6	3,0
O [%]	40,3	35,7	46,2	10,9
N [%]	0,3	0,6	0,2	1,1
S [mg/kg]	0,3	0,2	0,32	1,0

Tableau 7 : Analyses immédiate et élémentaire de BG, TM, RM, Ch1 [15]

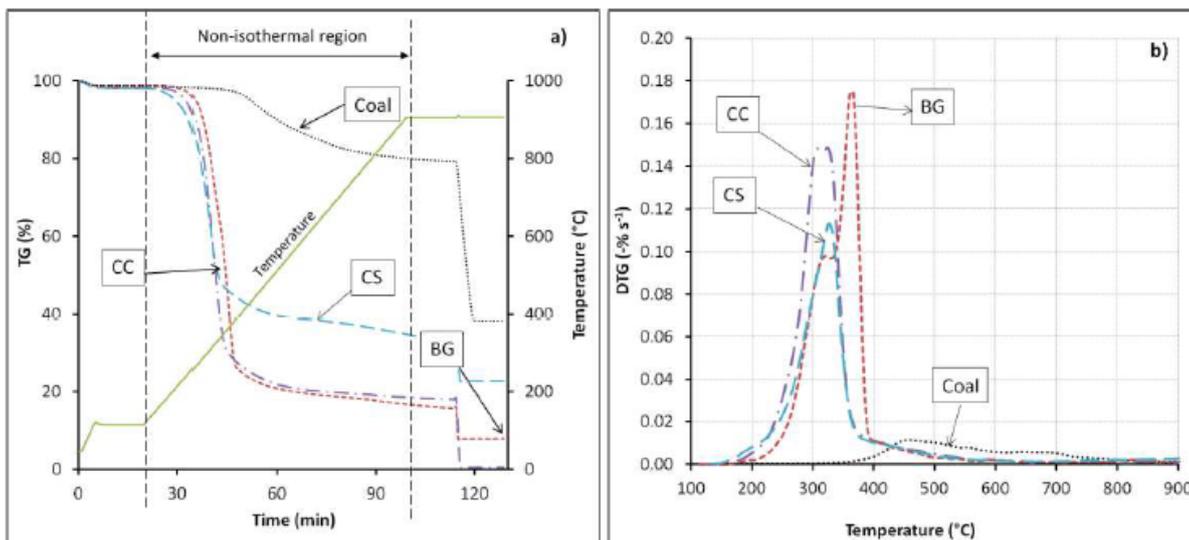
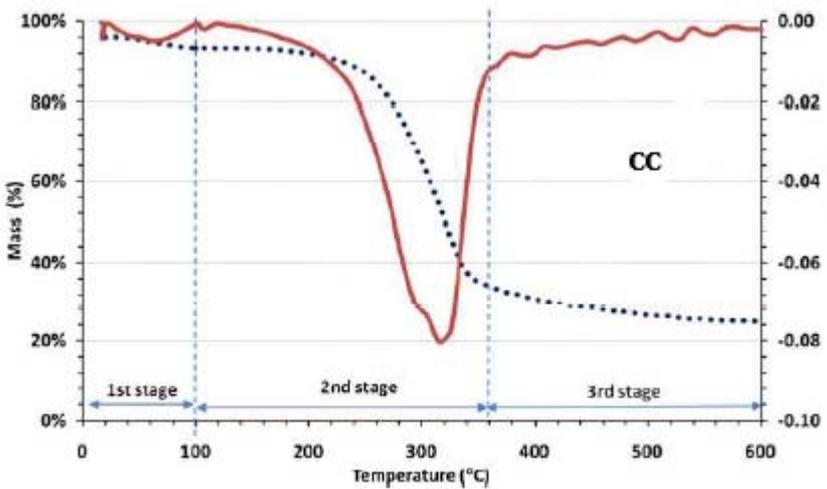
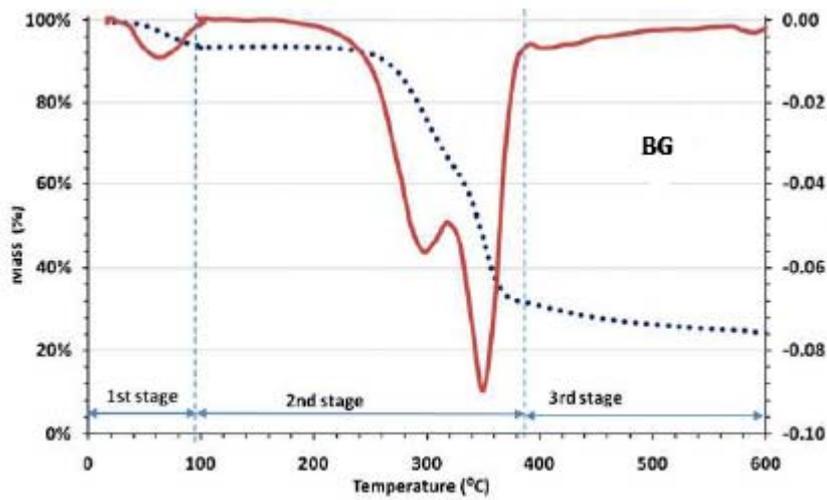


Figure 5 : Courbes TG a) et DTG, à 10 °C / min, de Bagasse BG, Rafles de maïs RM (CC), tiges de maïs TM (CS), Charbon Ch1 (Coal) (les lignes pointillées représentent les courbes TG et DTG tandis que la ligne non interrompue en a) montre le profil de température fonction du temps) [15]



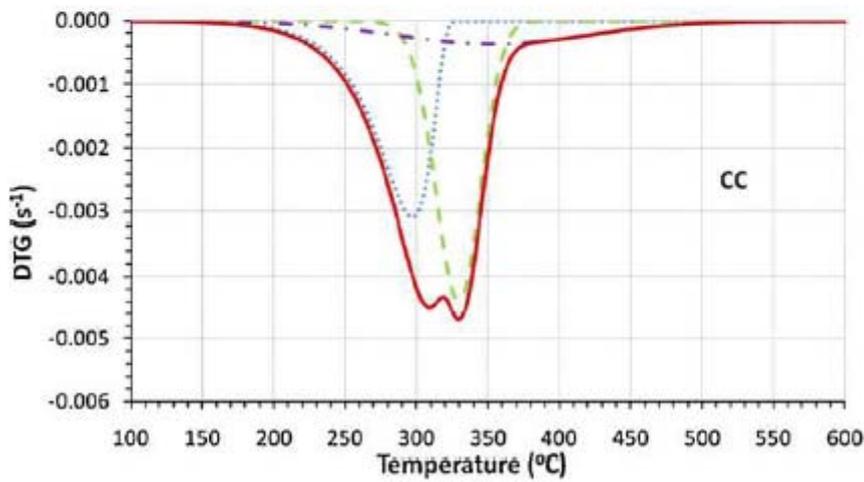
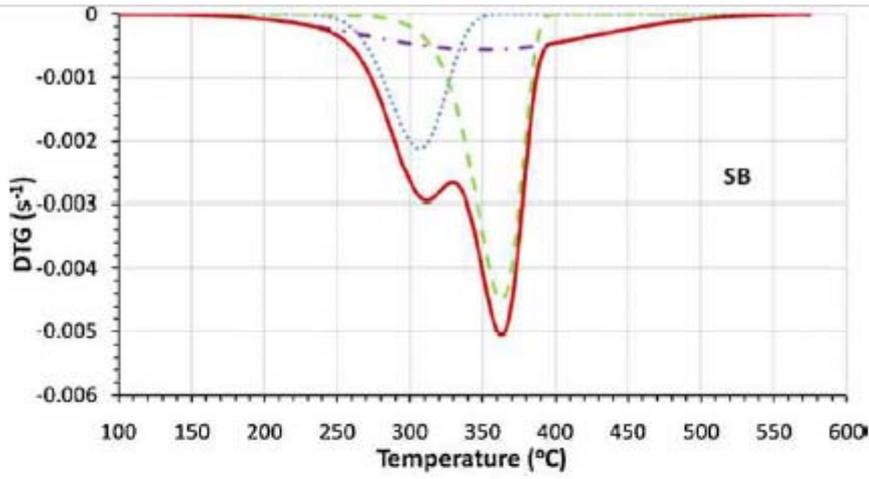
TG and DTG curves of CC and SB at  $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$  heating rate with TG (●●●) and DTG (■) curves.

**Figure 6 :** Courbes TG et DTG de BG (SB) et RM (CC) à  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  [15]

BG : Bagasse de canne à sucre – CC : Rafles de maïs RM

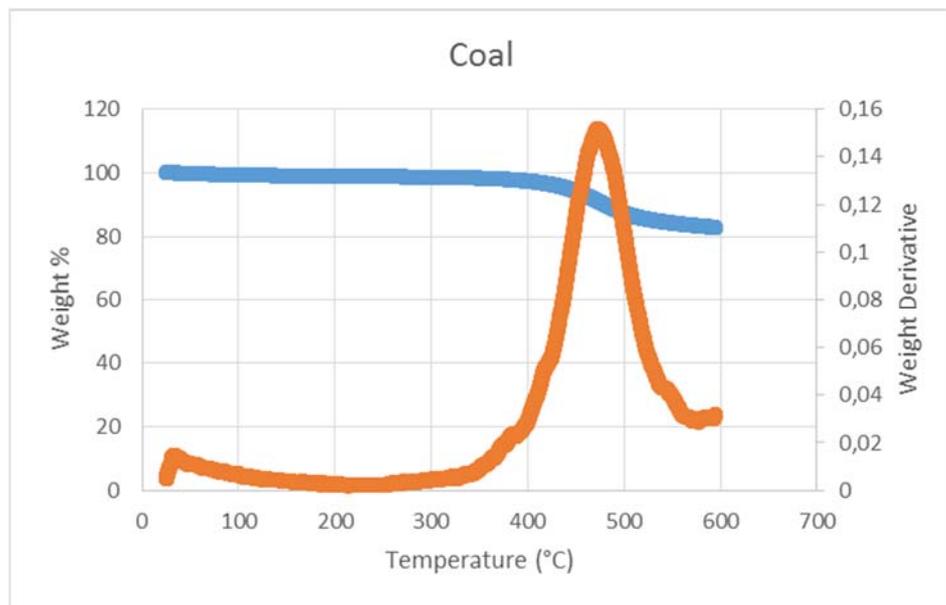
Paramètres	Charbon de terre [Ch2]
<b>Analyse immédiate</b>	
Humidité [%]	0,56
Matières volatiles [%]	19,22
Cendre [%]	16,10
Carbone fixe [%]	64,68
Pouvoir calorifique [MJ/kg]	29,94
<b>Analyse élémentaire</b>	
C [%]	62,5
H [%]	4,56
O [%]	28,81
N [%]	1,46
S [mg/kg]	0,11

**Tableau 8 :** Résultats d'analyses immédiate et élémentaire du charbon Ch2 type Tshikondeni [12]



DTG curves for CC and SB at  $20^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$  with hemicelluloses (●●●), cellulose (■ ■ ■), lignin (—●—) and the sum of the curves (—).

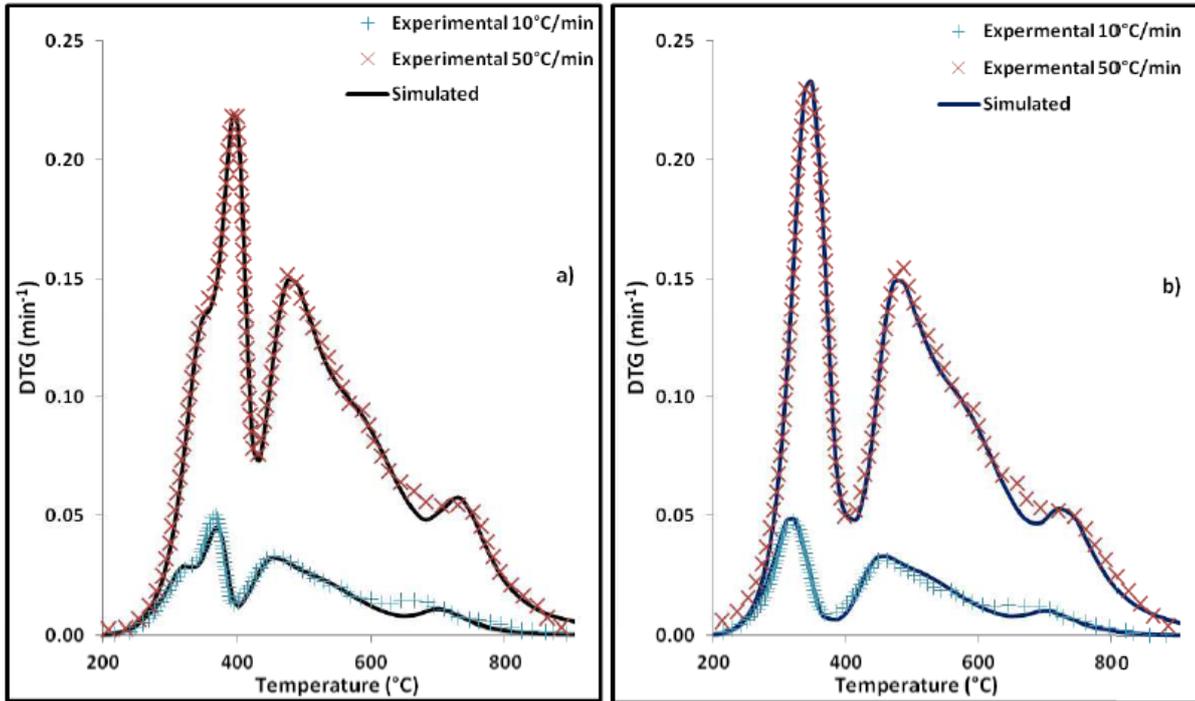
**Figure 7** : Courbes DTG pour BG (SB) et RM (CC) à  $20^{\circ}\text{C/min}$  avec l'hémicellulose, la cellulose, la lignine et la somme des courbes [15].



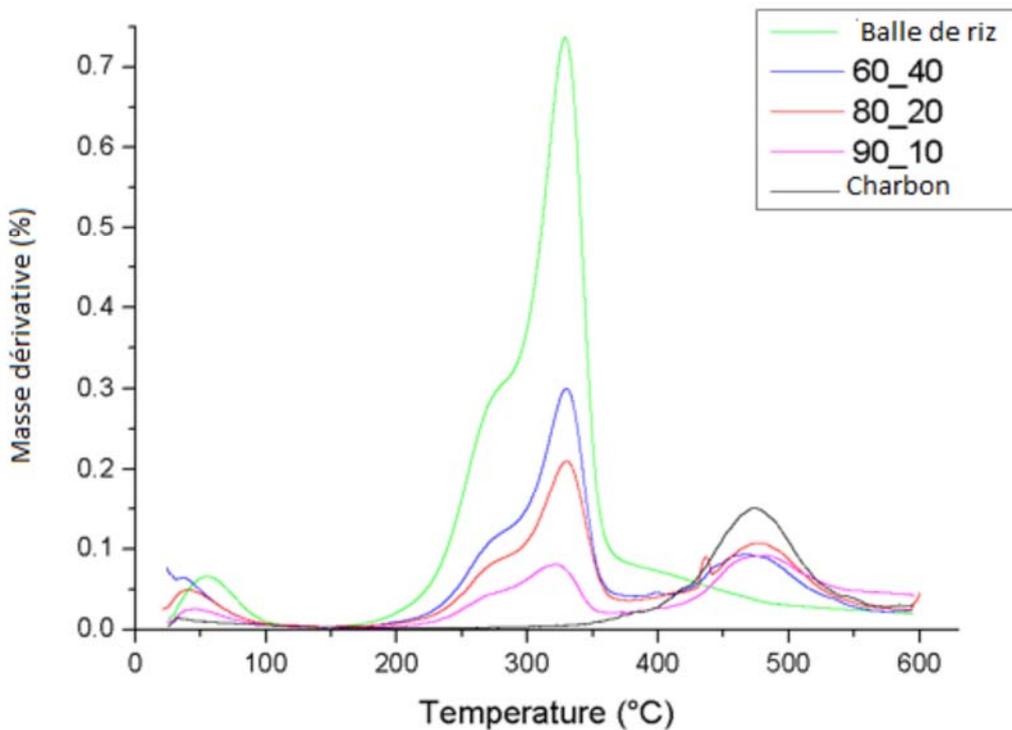
**Figure 8** : Courbes TG et DTG de la pyrolyse du charbon Tshikondenii Ch2 à  $10^{\circ}\text{C/min}$  [12].

Charbon Ch2	Intervalle de températures	Energie d'activation E [kJ/mol]	Facteur d'Arrhenius A[s <sup>-1</sup> ]
	150-400 °C	31.02	0
	400-600 °C	125.35	26.67x10 <sup>6</sup>

**Tableau 9** : Paramètres cinétiques du Ch2 lors de la pyrolyse à vitesse de chauffe 10 °C [12]



**Figure 9** : Courbes DTG, à 10 et 50 °C/mn, des mélanges Ch1-BG (a) et Ch1-RM (b) pour le taux massique 90:10 [15].



**Figure 10** : Courbes DTG à vitesse de chauffe 10 °C/mn de Ch2-BDR à différentes proportions en masse [12]

#### 4- Interprétations des résultats

##### 4-1 Combustible à un seul constituant

###### 4-1-1 Les analyses immédiate et élémentaire des biomasses

Malgré la forte teneur en humidité 7,40 % de la tige de maïs TM, il a la plus haute teneur en carbone fixe 16,68 %, ce qui lui attribue le plus grand pouvoir calorifique 15286,78 J/kg, parmi les trois biomasses, paille de riz PR, balle de riz BR et Sciure de bois SB (Tableau 1).

Tandis que la sciure de bois SB a la plus haute teneur en matières volatiles 74,90 %, qui lui facilite la combustion car une teneur élevée en MV indique une inflammation facile du combustible, mais sa teneur en carbone fixe FC qui agit comme générateur de chaleur, pendant la combustion, est de faible valeur 10,15 %, alors son pouvoir calorifique PC est de valeur inférieure 13617,06 J/kg (Tableau 1).

Puisque la faible teneur en H ne suffit pas pour obtenir un meilleur rendement en MV, la plus faible teneur en matières volatiles MV de la balle de riz BR est de 51,72 %, la forte teneur en cendre Cd est égale à 28,95 % et la plus faible teneur, en carbone C est de 36,31 %, en hydrogène H égale à 4,05%, en oxygène O, 22,90%, ces caractéristiques prouvent la richesse en matières minérales de l'échantillon BR. Même si sa teneur en CF 12,17% est supérieure à celle 10,15% de la sciure de bois SB, elle a un faible pouvoir calorifique PC 11453,77 J/kg par rapport à celui de SB 13617,06 J/kg, car la sciure de bois SB a une teneur en hydrogène H de 5,42 %, qui lui suffit pour avoir un haut rendement en matières volatiles MV 74,90 % (Tableau 1).

On remarque pour la paille de riz PR, sa plus haute teneur en élément azote N de 0,78% (Tableau 1). Comparée à la balle de riz BDR de Madagascar (Tableau 5), parmi les quatre biomasses précédentes, BDR a la plus faible teneur en azote N de 0,35 %. Sa grande valeur de PC 14830 J/kg par rapport à ceux de TM, PR, BR se fait remarquer, malgré son taux de cendres Cd 17,66 % et sa teneur en MV 72,93 % plus élevés que ceux de TM, PR, SB et BR respectivement. La forte teneur en matières volatiles 72 %, explique ses teneurs élevées en hydrogène 5,01 % et en oxygène 37,58 %. Sa haute teneur en cendre et sa basse teneur en carbone fixe lui confèrent un pouvoir calorifique de 14 MJ/kg, mais au-dessus de la moyenne parmi ceux d'autres biomasses [15].

###### 4-1-2 La fonction température et vitesse de chauffe des biomasses.

La Figure 1, qui montre les résultats d'analyses TG-DTG à vitesse de chauffe 20 °C /mn de quatre échantillons TM, PR, BR, SB de Jilin de Chine, fait surgir deux pics ou extremums de dégradations pour chacune des biomasses : Deux extremums de pertes de masse, pour chacun des échantillons, correspondent à des considérables dégagements de matières volatiles. Pour tous les échantillons, le premier est très profond, à 308, 313, 322, 357 °C respectivement pour TM, TR, BR, SB, tandis que le deuxième ne l'est pas, à 475, 492, 495, 512 °C respectivement pour TM, TR, BR, SB.

Les auteurs de la référence [11] font remarquer trois zones distinctes : la zone d'évaporation d'eau jusqu'à 150 °C, la zone de dégagement et de combustion des matières volatiles de 150 à 400 °C et la zone de combustion du carbone fixe de 400 à 600 °C.

Comparés aux résultats d'analyses : TG-DTG à vitesse de chauffe 10 °C /mn de la balle de riz BDR de Madagascar (Figure 4) qui ne présentent qu'un seul pic ; on remarque que les paramètres caractéristiques de combustion (Tableau 2) se trouvent tous déplacés. Le grand dégagement de matières volatiles de BDR est à 330 °C, le début de dégradation est à 200 °C (Figure4) contre ceux des quatre échantillons variant de 257 à 293 °C (Tableau 2). La zone de dégradation s'étend sur 200 à 370 °C pour les BDR, tandis que sur 200 à 500 °C pour les quatre échantillons de Jilin. La température d'épuisement est vers 500 °C pour les BDR et celles de TM, PR, BR, SB sont respectivement 535, 564, 568, 578 °C (Tableau 2). Les différentes courbes TG font remarquer les pertes de masse élevées pour les pyrolyses à 20 °C/mn, 5 à 10% restante comme masse résiduelle contre 22 à 37% restante pour celles à 10 °C/mn. Aussi les températures d'épuisement se trouvent toutes augmentées et attardées à des taux de chauffage supérieur.

###### 4-1-3 Paramètres cinétiques et vitesse de chauffe.

Les paramètres cinétiques, pour chaque plage de températures, sont regroupés dans les tableaux 3 et 6. Dans la zone de températures comprises entre 150 et 400 °C, la balle de riz BDR est très réactive, énergique avec  $E=83,31$  kJ/kg et très animée car  $A=2,77 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ , tandis que dans la deuxième zone comprise entre 400 à 600 °C, elle est presque insensible ( $A=0,02 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ) avec une faible énergie d'activation (Tableau 6).

. Dans le cas contraire, le Tableau 3 montre pour tous les échantillons que dans la deuxième plage de températures, toutes les énergies d'activation ont respectivement pour valeur 124,02 kJ/kg, 102,02 kJ/kg, 98,61 kJ/kg, 108,40 kJ/kg pour TM, PR, BR, SB. L'échantillon le plus insensible dans la première plage de températures se trouve plus animé et très réactif dans la deuxième plage. C'est le cas de la tige de maïs TM : première plage  $E=62,39$  kJ/kg et  $A = 1,42 \times 10^5 \text{ min}^{-1}$ , deuxième plage  $E= 124,02 \text{ kJ/kg}$  et  $A=2,36 \times 10^8 \text{ min}^{-1}=3,9 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ . PR et SB réagissent mieux dans la deuxième plage, mais la collision des molécules de BR s'atténue, allant de  $A=2,97 \times 10^6 \text{ min}^{-1}$  à  $A=2,19 \times 10^6 \text{ min}^{-1}$  entre 388 et 586 °C.

#### 4-1-4 Réactivités et vitesse de chauffe.

La Figure 2 montre les résultats des évolutions des réactivités des combustibles TM, PR, BR, SB, de laquelle Qing Wong et al [11] démontrent que la tige de maïs a la meilleure réactivité, comparée à la paille de riz PR, la balle de riz BR et la sciure de bois SB dans la phase de dégagement des volatils et dans la phase de combustion de carbone fixe. Ainsi, ils étudient la combustion de la TM à différentes vitesses de chauffage 10, 20, 50 °C/min comme la Figure 3 la montre. On remarque que l'augmentation de la vitesse de chauffe diminue la réactivité du combustible, et augmente les valeurs des paramètres caractéristiques de combustion,  $T_i$ ,  $T_e$ ,  $T_1^{max}$ ,  $T_2^{max}$ , qui sont respectivement la température d'inflammation, la température d'épuisement, la température de la première plus haute dégradation et la température de deuxième plus haute dégradation (Tableau 4). Pour la BDR à 10 °C/min. Un seul extremum est remarquable à  $T_1=330$  °C. Le début de dégradation se passe vers  $T_i=220$  °C (Figure 4) contre 251 à 284 °C pour ceux à 20 °C /min (Tableau 4) et la température d'épuisement est à plus de  $T_e=500$  °C (contre vers 450 °C à la pyrolyse à 10 °C/mn) :

Le taux de chauffage influe sur la température d'inflammation  $T_i$ , la température de pics, où il y a les dégagements 1 et 2 maximaux de matières, et la température d'épuisement  $T_e$  où la masse résiduelle reste inchangée ou varie peu, comme les montre.

#### 4-1-5 Présentation des échantillons du mélange

Ce paragraphe traite les données d'analyses des biomasses : La bagasse de canne à sucre BG, la rafle de maïs RM, tige de maïs TM (Figure 5, 6) [15], la balle de riz BDR (Figure 7) [12].

Sur la Figure 5, la perte significative de poids due à la volatilisation de matières des combustibles de biomasse a commencé à 210, 200 et 170 °C pour BG, RM et TM, respectivement, qui étaient considérablement inférieures à la température correspondant au début de la phase de volatilisation du charbon (390 °C). Le pic RM s'est produit à une température plus basse 320 °C (Figure 6). On compte deux pics pour la BG, l'un aux environs de 300 °C, l'autre à 365 °C. La volatilisation du charbon s'est poursuivie jusqu'à 900 °C. À la température de 900 °C, la perte de masse totale due à la volatilisation était de 90,8 %, 82,7 %, 80,3 % et 31 % pour BG, RM, TM et charbon, respectivement [15], mais le plus grand dégagement était à 365 °C. Les différentes courbes DTG ont les mêmes allures après les pics de biomasses, à un peu moins de 400 °C, marquant la fin de la perte de poids rapide. D'autre part, 400 °C n'était que le début des taux significatifs de perte de masse pour le charbon, de sorte que seulement 15 % en poids de la volatilisation du charbon avait eu lieu à cette température comparativement à 89 % en poids et 82 % en poids pour BG et RM respectivement. La dégradation du Ch1 se poursuit jusqu'à 900 °C lui soustrait 31 % de sa masse initiale. La BG, le RM et le TM en perdent 90,8 ; 82,7 ; 80,3 % à cette température.

#### Extremums résultants de ceux des composants de biomasse.

Pour démontrer l'allure de DTG de BG, dans la première phase de dégagement de volatils, la Figure 7 représente les dégradations des trois principaux composants de biomasse, hémicellulose, cellulose, lignine des BG et RM, le long de la pyrolyse, à la vitesse de chauffe 20 °C/min. La proportion de ces trois composants peut être extrêmement variable en fonction de l'espèce végétale, de l'âge et des conditions de croissance. La lignine est à l'origine des fractions les plus lourdes dans les huiles de pyrolyse et les goudrons, pourtant elle constitue le composé le plus stable thermiquement, même si sa décomposition thermique démarre plus tôt que celle de la cellulose [10].

L'hémicellulose, la cellulose et la lignine présentent leurs températures de dégradations maximales à 310, 370, 325 °C respectivement, en donnant un extremum résultant à 350 °C pour la BG. Pour celles de RM, 320, 340, 400 °C sont respectivement les températures des extremums des composants, ce qui aboutit à 330 °C de dégradation maximal résultant.

#### 4- 2 Mélange de deux constituants de combustible

Dans ce paragraphe, on se basera sur trois biomasses lesquelles sont prévues comme des échantillons de base pour être mélangés avec du charbon. La première est la balle de riz BDR et les deux dernières de la bagasse de canne à sucre BG1 et de la rafle de maïs RM1, dont les caractéristiques sont illustrées [15] dans le Tableau 7. Le charbon Ch1 est un mélange de divers charbons sud-africains, qui est riche en inertinite et ainsi classé parmi des charbons de qualité ou de rang inférieur [16]. Le Tableau 7 décrit les résultats d'analyse de la bagasse de canne à sucre BG1, la rafle de maïs RM1, la tige de maïs TM1, mais seules la bagasse et la rafle de maïs sont assujetties à l'étude d'Aboyade [15], comme l'est la balle de riz BDR de la référence [12] (Tableau 5) pour être mélangées au charbon de terre. Les forts pouvoirs calorifiques 16, 6 et 18 MJ/kg, respectivement pour BG1 et RM1, comparés à celui de BDR 14,83 MJ/kg, peuvent être décrits par leurs faibles teneurs en cendre 10,3 et 1,6 % et les valeurs considérables de teneurs en matières volatils de 84 et 91,7 % (Tableau 7), favorisées par les basses teneurs en humidité respectivement 6,7 et 7 %, comparées à celle de la BDR 7,29 % (Tableau 5).

En se référant au Tableau 7 pour Ch1 et au Tableau 8 pour Ch2, selon la référence [24], le Ch1 est une tourbe : sa teneur en carbone 45,4 % est inférieure à 50 % et son pouvoir calorifique 17 % inférieur à 25 kJ/kg.

Le Ch2 se trouve dans le rang du lignite car sa teneur en carbone 64,68 % est supérieure à 60 % et son pouvoir calorifique 29,94 % supérieur à 25 kJ/kg. Ses fortes teneurs en matières volatiles et carbone fixe expliquent son fort pouvoir calorifique.

Les courbes de combustion DTG de Ch1 et Ch2 sont respectivement représentées sur les Figures 5 et 8 : On remarque le début de dégradation à 320 °C et l'extremum de grande perte de masse à 467°C. La pyrolyse laisse 83% de la masse initiale à 600°C. Ch2 reste insensible entre 150 à 400 °C, vue sa faible énergie d'activation 31,02 kJ/mol et son facteur d'Arrhenius nul dans cette zone. Des valeurs considérables de E et de A marquent la grande réactivité du charbon de Tshikondeni dans l'intervalle comprise entre 400 et 600 °C (Tableau 9).

Le Ch1 est mélangé avec la BG1, puis à RM1, à différentes proportions en masse, en donnant comme résultats d'analyse DTG (Figure 9). De même, Ch2 est mélangé avec la BDR, donnant les courbes DTG de la Figure 10. Tous les mélanges sont travaillés à des vitesses de chauffe 10 °C/min. Les Figures 4, 5, et 8 ne présentent qu'un seul point de dégagement maximal, tandis que les Figures 9, et 10 montrent deux points de dégagement maximal pour chaque mélange.

## 5- Conclusion

Les températures caractéristiques de combustion des combustibles qui sont, la température d'inflammation, la température de volatilisation maximale, la température d'épuisement, se trouvent toutes abaissées avec la diminution de la vitesse de chauffe. Cette situation peut être expliquée par le fait que lorsque les échantillons sont chauffés rapidement, la vitesse de montée en température dépasse la séquence des événements pyrolytiques observés au cours des phases de pyrolyse lente et certaines plages de températures bénéficient d'énergies d'activation élevées, suite à la montée brutale du taux de chauffage.

Ainsi, l'augmentation de la vitesse de chauffage diminue la réactivité du combustible car une courte durée de forte combustion peut entraîner inévitablement la formation d'imbrulés et ne permet pas aux réactions de se réaliser suffisamment.

## Remerciements :

L'auteur tient à remercier, l'équipe du laboratoire du « Department of Forest and Wood Sciences », de l'Université de Stellenbosch, pour la réalisation de nos expérimentations ; l'Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, de son appui incessant.

## Références :

- [1]- Philip C.W. Kwong, Christopher Y.H. Chao, J.H. Wang, C.W. Cheung, Gail Kendall, Co-combustion performance of coal with rice husks and bamboo. *Atmospheric Environment*, 41 (2007) 7462-7472
- [2]- T. Madhiyanon, P. Sathitruangsak, S. Soponronnarit, Co-firing characteristics of rice husk and coal in a cyclonic fluidized-bed combustor under controlled bed temperatures, *Fuel*, 90 (2011) 2103-2112
- [3]- Christopher Y.H. Chao, Philip C.W. Kwong, J.H. Wang, C.W. Cheung, Gail Kendall, Co-Wiring coal with rice husk and bamboo and the impact on particulate matters and associated polycyclic aromatic hydrocarbon emissions, *Bioresource technology*, 99 (2008) 83-93
- [4] Ayhan Demirbas. Sustainable cofiring of biomass with coal, *Energy Conversion and Management* 44 (2003) 1465–1479.
- [5]- Le Quyen Luu, Anthony Halog, Rice husk based bioelectricity vs. Coal-fired electricity: Life cycle sustainability assessment case study in Vietnam, *Procedia CIRP* 40 (2016) 73 – 78
- [6]- Zhaosheng Yu, Shiwen Fang, Yousheng Lin, Yanfen Liao, Xiaoqian Ma, Investigation of Rice Straw Combustion by Using Thermogravimetric Analysis, *Energy Procedia* 75 ( 2015 ) 144 – 149
- [7]- Compendium of technologies, Converting Wastes Agricultural biomass into a resource, *United Nation Environment Program* (2009)
- [8]- He Chunhui, Chen Xianmei, Wang Jianhao, Ni Hongliang, Xu Yupeng, Zhou Haijun, Xiong Yuanquan, Shen Xianglin Conveying characteristics and resistance characteristics in dense phase pneumatic conveying of rice husk and blendings of rice husk and coal at high pressure, *Powder Technology* 227 (2012) 51–60
- [9]- P.W. Olupot, A. Candia, E. Menya, R. Walosi, Characterization of rice husk varieties in Uganda for biofuels and their techno-economic feasibility in gasification, *Chemical Engineering Research and Design* 107 ( 2016 ) 63–72
- [10]- Cirad-Foret, Pyrolyse et gazéification de la biomasse pour la production d'électricité, *Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie* (2001)
- [11]- Qing Wang, Weizhen Zhao, Hongpeng Liu, Chunxia Jia, Hao Xu, Reactivity and Kinetic Analysis of Biomass during Combustion, *Energy Procedia* 17 (2012) 869 – 875
- [12]- L. Ratsimamanga, J. Andriamampianina, M. Meincken, Optimisation du mélange Charbon de terre-Balles de riz destiné pour la gazéification, *Afrique SCIENCE* 14(2) (2018) 316 – 326
- [13]- Alain Michel Rasamindisa, Analyse de la disponibilité de biomasse énergie d'origine agricole, *Projet 9 ACP RPR 49#31, Facilité ACP-UE pour l'Energie* (2009)
- [14]- Bart Minten, Jean-Claude Randrianarisoa, Lalaina Randrianarison, Agriculture, Pauvreté rurale et Politiques économiques à Madagascar, *FOFIFA, INSTAT, Cornell University, USAID* (2003)

- [15]- Akinwale Olufemi Aboyade, Co-gasification of coal and biomass: Impact on condensate and syngas production, PhD, *Faculty of Engineering at Stellenbosch University* (2012)
- [16]- Michel Gastou, Le charbon, Matière combustible, Histoire scientifique et humaine du charbon, *Saga Information* - N° 360 –Septembre-Octobre 2017
- [17]- Georges PRUDHON, François JACQUESSON, Juliette LETE, Stéphanie PARIS, combustible solide. Le Charbon, Origine, Constitution, classification, *Combustibles solides. Caractéristiques. Propriétés. Analyse* (2008)
- [18]- W. Pickel, J. Kus, D. Flores, S. kalaitzidis, K. Christianis, B.J. Cardott, M. Misz-kennan, S. Rodrigues, A. Hentschel, M. Hamor-Vido, P. Crosdale, N. Wagner, Classification of liptinite – ICCP system 1994, *International Journal of Coal Geology*, Volume 169, 2 January 2017, Pages 40-61
- [19]- Diana C. Marin, Antonela Vecchio, Leandro N. Ludueña<sup>1</sup>, Diana Fasce, Vera A. Alvarez, and Pablo M. Stefani, Revalorization of Rice Husk Waste as a Source of Cellulose and Silica, *Fibers and Polymers* (2015), Vol.16, No.2, 285-293
- [20]- P. Fourmarier, Le problème de la dérive des continents, *Académie Royale des sciences d'Outre-Mer, Classe des Sciences naturelles et médicales*, VI11-1, Bruxelles, (1968)
- [21]- Christian Arsène Roger ANDRIAMIRADO, Recherches paléomagnétiques sur Madagascar Résultats et interprétations dans le cadre de la dislocation de la partie orientale du Gondwana, Thèse de doctorat *Université Louis Pasteur de Strasbourg* (1972)
- [22]- L.P. Langford, Permian coal and paleogeography of Gondwana, *Bureau of Mineral Resources/ Australian Petroleum Industries Research Association Palaeogeographic Maps Project* (1991/1995)
- [23]- Malagasy Mineral limited prospectus du 23 mai 2008 ABN 84 121 700 105
- [24]- Elizabeth M. Truswell, Permo-Carboniferous palynology of Gondwanaland: Progress and problems in the decade to 1980, *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 5, 1980, 95-111
- [25]- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Categorie:Combustible\\_solide](http://fr.wikipedia.org/wiki/Categorie:Combustible_solide) (13Mai 2018)