



## The 1<sup>st</sup> International Conference on Local Resource Exploitation

[www.lorexp.org](http://www.lorexp.org) / [info@lorexp.org](mailto:info@lorexp.org)  
REF: LOREXP\_2021\_A1110 Pages: 478–494



### Influence du liant sur les propriétés thermomécaniques des briquettes énergétiques à base de coques de cacao.

#### *Influence of the binder on the thermomechanical properties of energy briquettes based on cocoa hulls.*

Ngamo Yannick Gervais<sup>1,2</sup>, Jiokap Nono Yvette<sup>1,3,\*</sup>, Mouangue Ruben<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Analyse, Essais et Simulations (LASE), IUT, Université de Ngaoundéré, P.O. Box 455, Ngaoundéré, Cameroun

<sup>2</sup> UFD PAI, GEEA, ENSAI, Université de Ngaoundéré, P.O. Box 455, Ngaoundéré, Cameroun

<sup>3</sup> Département de Génie Chimique et Environnement, IUT, Université de Ngaoundéré, Cameroun

<sup>4</sup> Département de Génie Thermique Energétique, IUT, Université de Ngaoundéré, Cameroun

\* Corresponding Author: [jiokapnonoy@yahoo.fr](mailto:jiokapnonoy@yahoo.fr)

#### RÉSUMÉ :

Ce travail avait pour objectif de déterminer les caractéristiques physicochimiques des coques de cacao et d'étudier l'influence de différents facteurs (taux et type de liant, taille des particules, temps et pression de compaction) dans la formulation des briquettes énergétiques à base de coques de cacao. Les liants étudiés ont été la mélasse de canne à sucre, les peaux de manioc et l'amidon de manioc. Les techniques d'analyse classiques ont été utilisées pour la détermination des teneurs en sucres totaux, matière grasse, protéines et fibres. Les opérations de briquetage se sont effectuées à l'aide d'un moule conçu et d'une presse hydraulique ayant une charge maximale de 150 tonnes. Un plan de criblage a été utilisé afin de déterminer les facteurs expérimentaux qui ont le plus d'impact sur les réponses (Indice de résistance à l'impact, masse volumique, charge de pointe et charge finale, propriétés thermiques). L'étude de l'influence des facteurs s'est faite à travers un plan factoriel fractionnaire à niveaux mixtes. Les analyses physicochimiques ont montré que la matière sèche des coques de cacao se compose en majorité de  $60,36 \pm 7,19$  g/100 g de fibres et en minorité, de  $0,20 \pm 0,03$  g/100 g de protéines. Des essais préliminaires de briquetage ont montré qu'il existe une plage pour le taux d'incorporation de liant, comprise entre 9,4 et 12,5 %, permettant d'assurer de bonnes propriétés mécaniques et thermiques des briquettes à base des coques de cacao. Les liants conférant de meilleures propriétés aux briquettes ont été la mélasse de canne à sucre et l'amidon de manioc, contrairement aux peaux de manioc qui ont pourtant présentés de bonnes propriétés texturales mais une faible résistance à l'impact. Il a été également observé que la présence de l'amidon et de la mélasse de canne à sucre comme liants améliore les propriétés thermiques des briquettes énergétiques, en augmentant leurs pouvoirs calorifiques ( $19,80 \pm 4,69$  kJ.kg<sup>-1</sup>). La taille des particules a montré une influence significative sur les propriétés mécaniques des briquettes énergétiques produites. Ces résultats montrent une possibilité de l'exploitation des coques de cacao comme alternative au bois de chauffe.

**Mots clés :** Coques de cacao, Liant, Briquettes énergétiques, Indice de résistance à l'impact, Pouvoir calorifique.

#### ABSTRACT:

The objective of this work was to determine the physicochemical characteristics of cocoa hulls and to study the influence of different factors (rate and type of binder, particle size, compaction time and pressure) in the formulation of energy briquettes using cocoa shells. The binders studied were sugar cane molasses, cassava peels and cassava starch. Standard analytical techniques have been used to determine the contents of total sugars, fat, protein and fiber. The briquetting operations were carried out using a designed mold and a hydraulic press with a maximum load of 150 tons. A screening design was used to determine the experimental factors that have the most impact on responses (Impact Resistance Index, density, peak and final load, thermal properties). The study of the influence of the factors was carried out through a fractional factorial design with mixed levels. Physicochemical analyzes have shown that the dry matter of cocoa shells consists mainly of  $60.36 \pm 7.19$  g/100 g of fiber and a minority of  $0.20 \pm 0.03$  g/100 g of protein. Preliminary briquetting tests have shown that there is a range of binder incorporation rate, between 9.4 and 12.5 %, making it possible to ensure good mechanical and thermal properties of the briquettes made from the cocoa shells. The binders giving better properties to the briquettes were sugar cane molasses and cassava starch, unlike cassava peels which nevertheless exhibited good textural properties but low impact resistance. It has also been observed that the presence of starch and sugarcane molasses as binders improves the thermal properties of energy briquettes, by increasing their calorific values ( $19.80 \pm 4.69$  kJ.kg<sup>-1</sup>). The particle size showed a significant influence on the mechanical properties of the energy briquettes produced. These results show a possibility of exploiting cocoa shells as an alternative to firewood.

**Keywords:** Cocoa hulls, Binder, Energy briquettes, Impact resistance index, Calorific value.

## 1. INTRODUCTION

Les biocombustibles représentent une source potentielle d'énergie renouvelable (Samomssa et al., 2021 ; Mukherjee et al., 2020 ; Clarke et Preto 2011 ; PERACOD 2011). Cependant, leur contenu énergétique est inférieur à celui des combustibles fossiles traditionnels (Lacour, 2016 ; Laval, 2014 ; Rezvani et al., 2014 ; Clarke et Preto 2011) ce qui fait obstacle à leur usage général car il en faut plus pour obtenir la même quantité d'énergie. Lorsque ce contenu énergétique faible se double d'une faible masse volumique, le volume de biomasse dont on a besoin croît de façon considérable (Pratoto et Abhen 2021 ; Laval, 2014) . Le compactage ou densification sous forme de brique énergétique est un moyen d'accroître la densité d'énergie (García et al., 2019 ; Tumuluru et al., 2010 ; FAO 2014a ; Rezvani et al., 2014 ; Madhurjya et Deben 2013) et de réduire les problèmes de manutention (Tumuluru et al., 2010) . Selon Tumuluru et al. (2010), la taille des particules a un effet important dans le mécanisme d'association des particules et sur les propriétés du produit final obtenu. Les poudres fines ont un avantage dans le processus de densification en ce sens qu'ils ont un plus grand nombre de points de contact (Lorenzo Riva et al., 2019), les surfaces spécifiques sont plus exposées et au regard des caractéristiques physico-chimiques, une très grande surface énergétique par unité de masse. Il n'existe pas de standard qui définisse à partir de quel type de résidus peuvent être produites les briquettes énergétiques.

Les sources bibliographiques soulignent une grande variété de biomasse, valorisables en charbon écologique sous la forme de briquettes énergétique, tels que les résidus agricoles (tiges de mil, de manioc, de coton, balles de riz, coques d'arachide, bagasse de canne à sucre, rafles de maïs, coque d'anacardier, coque de cacao etc.) (Samomssa et al., 2021 ; Mukherjee et al., 2020 ; FAO 2014b) . Cependant, à la limite de nos connaissances, les coques de cacao, principale déchet agricole au Cameroun (Kokou et Ngo-Samnack, 2014 ; Pitcholo, 1990), n'ont pas encore fait l'objet d'une valorisation énergétique, dans la production des charbons écologiques. Par ailleurs, plusieurs travaux ont montré que l'ajout de liant améliore les propriétés thermomécaniques et texturale de ces charbons (Lorenzo Riva et al., 2021 ; Lorenzo Riva et al., 2019 ; Kaliyan et Morey 2010). Toutefois, l'influence de ces liants sur le rendement énergétique ainsi que sur les paramètres de combustion n'a pas été investiguée.

Le présent travail vise à effectuer une caractérisation physico chimique des coques de cacao, de déterminer l'influence de divers liants (mélasse, amidon gélatinisé, et peau de manioc) dans la formulation des briquettes dérivées, ainsi que leurs effets sur les différents paramètres énergétique et de combustions de ces combustibles.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1. Matériel

Les coques de cacao de variété trinitario, ont été collectées auprès des cultivateurs, dans la région du littoral au Cameroun. La mélasse de canne à sucre servant de liant, a été obtenue auprès de l'industrie sucrière SOSUCAM à Mbandjock-Cameroun. Le matériel utilisé pour le briquetage était constitué d'un moule en fer (de diamètre 43 mm et de hauteur 46,7 mm) fabriqué à l'atelier de fabrication mécanique de l'ENSAI ; d'une presse hydraulique de marque CAT (30TONES PULLER 8T5347) ayant une charge maximale de 150 tonnes situé dans le même atelier mécanique.

### 2.2. Méthodes

#### 2.2.1. Traitement de la matière première

Après réception des cabosses fraîches de cacao au laboratoire, elles ont été lavées puis séchées à l'ombre à la température ambiante (25 à 28 °C) pendant une période de 15 jours, puis séchées à nouveau dans une étuve ventilée (de marque Memmert) à 45 °C pendant 12 h avant d'être broyées d'abord dans un mortier traditionnel en bois (broyeur à marteau). Ensuite le broyat a été broyé une seconde fois à l'aide d'un broyeur à manivelle. Par la suite, le broyat a été tamisé à l'aide d'un tamis de 1000 µm et le refus a été broyé et tamisé à nouveau. Les poudres ainsi obtenues ont été conditionnées dans des sacs plastiques à fermeture étanche afin d'être conservées à l'abri de l'air et de l'humidité. L'extraction de l'amidon de manioc a été effectuée suivant le protocole décrit par Willinger (1964) modifié par Alves, Grossmann et Silva (1999) tels que cités par Mbougoung (2009). Le schéma de procédé est présenté sur la figure 1.

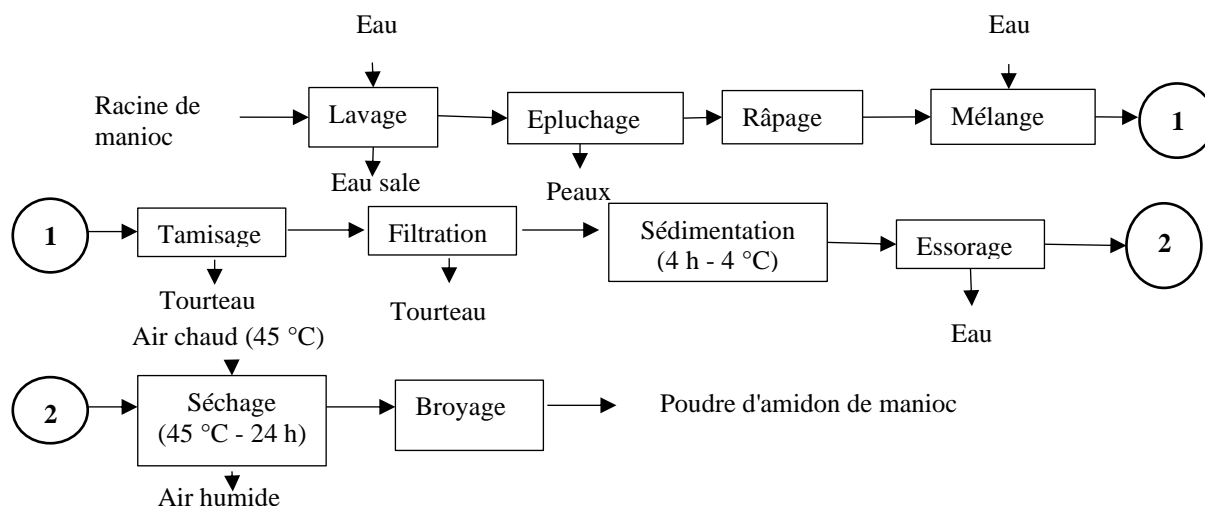


Figure 1 : Procédé d'obtention de la poudre d'amidon de manioc

### 2.2.2. Caractérisation de la matière première

La granulométrie des poudres de coque de cacao et de peau de manioc obtenues après broyage a été analysée à l'aide d'un analyseur de particule de marque MASTERSIZER 2000. Pour cela, l'analyse a été effectuée sur 0,5 g de poudre et les solvants utilisés ont été l'éthanol à 96 % et de l'eau distillée pour les poudres de peaux de manioc et de coques de cacao respectivement. La matière sèche ou résidu sec total est l'ensemble des substances qui ne se volatilisent pas dans les conditions de dessiccation définies par la méthode utilisée. La détermination de la matière sèche a été effectuée par la méthode d'AFNOR (1982). Les cendres totales ont été quantifiées par la méthode décrite dans AFNOR (1981). La méthode de détermination de la capacité d'adsorption d'eau utilisée est celle décrite par Phillips et al. (1988). 1g de poudre ( $M_0$ ) est mélangé à 10 mL d'eau distillée, l'ensemble est agité pendant 15 minutes puis centrifuger à 2500 trs/min pendant 30 minutes dans une centrifugeuse de marque Heraeus-kendro, modèle biofuge primo R. Le culot est pesé ( $M_2$ ) et séché à l'étuve à  $105 \pm 2$  °C pendant 24 heures. La masse du culot sec ( $M_1$ ) est déterminée. L'eau absorbée est calculée en capacité d'absorption d'eau apparente (CAEa) et en capacité d'absorption d'eau réelle (CAEr) selon les équations 1 et 2 respectivement :

$$CAE_a = \frac{M_2 - M_0}{M_0} \times 100 \tag{1}$$

$$CAE_r = \frac{M_2 - M_0}{M_1} \times 100 \tag{2}$$

La quantité de lignine a été déterminée selon la norme (lignines klason insolubles). Les fibres brutes ou insolubles regroupent la cellulose, quelques hémicelluloses, la lignine. La teneur en fibres brutes des échantillons a été déterminée par la méthode de Weende (Wolff, 1968). La teneur en cellulose brute a été déterminée selon le protocole de Weende (Wolff, 1968). Les sucres totaux ont été extraits et quantifiés par la méthode au phénol (Dubois et al., 1956). L'azote total a été déterminé après minéralisation des échantillons selon la méthode de Kjeldahl (AFNOR, 1984), et dosage selon la technique colorimétrique de Devani et al. (1989). Les lipides totaux sont extraits au Soxhlet selon la méthode Russe décrite par Bourelly (1982). Le degré Brix de la mélasse a été mesuré à 23 °C à l'aide d'un réfractomètre de marque HANNA (HI 96801 fabriqué en Roumanie) dont les plages de mesure varient de 0 à 85 °Brix. Le résultat est la moyenne de trois mesures.

### 2.2.3. Détermination de la teneur en amidon dans les peaux de manioc

L'iode ( $I_2$ ) interagit avec l'amylose et l'amylopectine pour donner une coloration respectivement bleue et brune. Les spectres des complexes  $I_2$ -amylose et  $I_2$ -amylopectine sont différents. De ce fait ces complexes ont des longueurs d'ondes maximales pour l'amylose ( $\lambda_{max} = 630$  nm) et l'amylopectine ( $\lambda_{max} = 548$  nm) qui sont différentes. En plus l'amylose absorbe dans le proche visible tandis que l'amylopectine n'y absorbe pas. On peut donc utiliser cette différence spectrale pour doser

simultanément l'amidon total, l'amylose et l'amylopectine dans un matériel biologique. Dans cette manipulation on considérera que l'absorbance à 580 nm est liée à la fois à l'amylose et à l'amylopectine et donc à l'amidon total.

#### \* Préparation de l'amidon standard

0,5 g d'amidon sont dispersés dans 20 mL d'eau distillée dans un tube à essai, puis 80 mL d'eau distillée bouillante ajoutés. Le mélange est agité légèrement et l'ébullition poursuivie pendant 5 min sur une plaque chauffante pour obtenir une solution d'amidon limpide. Le mélange est refroidi et complété à un volume de 100 mL avec l'eau distillée. Ceci constitue une solution stock d'amidon à 5 mg/mL.

#### \* Préparation de l'échantillon à analyser

0,1 g de broyat de peau de manioc est prélevé et 5 mL de KOH (1N) ajoutés dans un tube. La solution est homogénéisée à la température ambiante et neutralisée ensuite avec 5 mL de HCl (1N). La neutralité est assurée à l'aide d'un pH mètre. Le mélange est mis en ébullition au bain-marie pendant 15 minutes et centrifugé à 4500 trs.min<sup>-1</sup> pendant 10 minutes. Le volume du surnageant est réajusté à 20 mL. La courbe d'étalonnage a pour expression  $A = aQ + b$ . La concentration en amidon dans l'échantillon ;

$$Q = \frac{A-b}{a} \quad (3)$$

La teneur en amidon en % de matière sèche (MS) est donnée par la relation :

$$\text{Amidon (\%)} = \frac{Q \times V_t}{m \times V \times MS} \times 100 \quad (4)$$

Q : Concentration d'amidon dans la prise d'essai (mg/mL) ; V<sub>t</sub> : le volume total de l'extrait (5 mL) ; m : masse prélevée (0.1 g) ; V : le volume d'échantillon analysé (0.06 mL) ; A : Densité optique ; a : gradient ; b : Intersection à l'origine

#### \* Détermination des propriétés rhéologiques de l'amidon extrait

Les conditions optimales de gélatinisation de l'amidon ont été déterminées à l'aide d'un analyseur rapide de viscosité (RVA). C'est un viscosimètre rationnel qui enregistre en continu la viscosité d'un échantillon dans des conditions de température et de cisaillement contrôlées. La capacité du RVA à homogénéiser les échantillons dans un solvant, à les maintenir en suspension tout au long du test et à appliquer une force de cisaillement adaptée en fonction des conditions de traitement en fait un outil particulièrement utile dans de nombreuses applications de processus et de développement. La combinaison du cisaillement, du chauffage et du refroidissement, appliquée pendant un certain temps, crée une courbe de viscosité. L'analyseur rapide de viscosité (RVA) est connecté à un ordinateur pour la mesure et les résultats s'affichent automatiquement. L'analyse a été effectuée sur un échantillon de 3,57g de poudre d'amidon non gélatinisé. Pour se faire, 26 g d'une solution de lait d'amidon de 0,15 g/l a été introduite dans le godet de cet équipement, puis l'appareil est mis en marche. L'analyse dure 13 minutes. La courbe de viscosité obtenue apparaît ensuite sur l'écran de l'ordinateur.

#### 2.2.4. Détermination du pourcentage de matière volatile

La Matière Volatile (MV) exprimée en g/100 g de matière sèche (MS) représente la quantité de matière organique du résidu sec (Matière Sèche) ; elle est également appelée matière organique (MO). La détermination des matières volatiles fait référence à la fraction de biomasse qui est libérée lorsqu'elle est incinérée à une température comprise entre 400 et 500 °C. Au cours de la combustion, la biomasse est décomposée en deux fractions que sont la fraction gazeuse et la fraction solide (Parikh et al., 2007). 1 g de matière première est pesé dans un creuset en porcelaine et séché jusqu'à masse constante (m<sub>1</sub>), puis, on détermine. MV : par combustion après 10 minutes (m<sub>2</sub>) à 600 °C dans le four

$$MV = m_1 - m_2 \quad (5)$$

La teneur en carbone fixe (CF) exprimée en g/100 g de matière sèche (MS) est obtenue par la différence à 100 de la somme des matière volatile (MV) et teneur en cendres (TC).

$$CF = 100 - (MV + TC) \quad (6)$$

### 2.2.5. Détermination du pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique (PC), représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de combustible. Il a été déterminé par utilisation des modèles mathématiques basée sur la connaissance de la teneur en cendres (TC), matière volatile (MV) et carbone fixe (CF) (Parikh et al., 2007).

$$PC = 0,3536CF + 0,1559MC - 0,0078TC \quad PC \text{ (en MJ/kg de MS)} \quad (7)$$

### 2.2.6. Compactage des poudres

La poudre de coques de cacao obtenue après broyage a été mélangée aux différents liants à des proportions variables et compactée suivant le procédé présenté par la figure 2.

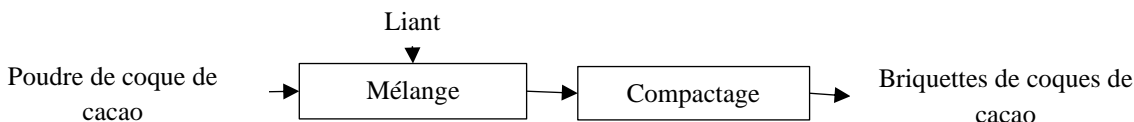


Figure 2 : Procédé de compactage des poudres de coque de cacao

Les mesures de volume après relaxation et de masses ont été effectuées sur chaque briquette dès la sortie du moule et jusqu'à stabilité massique et volumique. Le volume V des briquettes a été déterminé à l'aide d'un pied à coulisse à travers la mesure de leur diamètre et hauteur. Le volume de la briquette est alors donné par la relation :

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad (8)$$

Où d est le diamètre de la briquette exprimé en m et h la hauteur de la briquette exprimé également en cm et V le volume de la briquette en m<sup>3</sup>.

L'analyse texturale des briquettes énergétiques a été effectuée à l'aide d'un pénétromètre de marque « brookfield lfra texture analyser 4500 ». Il s'agit ici de la mesure du *Peak Load* et du *Final Load* exprimée en g. Pour ce faire une sonde à aiguille a été choisie, le test a consisté à la faire pénétrer jusqu'à une distance de 4,5 mm (environ 56 % de l'épaisseur de la briquette) à l'intérieur de la briquette avec une sensibilité d'1g et une vitesse de pénétration d'1mm/s. Trois répétitions ont été faites pour chaque briquette. La résistance de la briquette a été déterminée suivant une méthode de caractérisation décrite par Suparin (Madhurjya et Deben, 2013). Elle consiste à laisser tomber une briquette sur une masse métallique à une distance de 1,5 m ; sans vitesse initiale, et de façon répétée jusqu'à fractionnement de la briquette. Les résultats peuvent s'exprimer en Indice de Résistance à l'Impact (IRI), afin d'étudier l'effet combinée de la pression, de l'incorporation du liant et de la taille des particules sur la résistance au choc des briquettes énergétiques (Madhurjya et Deben, 2013). L'Indice de Résistance à l'Impact (IRI) d'une briquette est donc définie comme le rapport du nombre de chutes de la briquette par le nombre de fragments de la briquette obtenus après la chute, le nombre maximal de chute étant fixé à 10.

$$IRI = \frac{\text{nombre de chutes} \times 100}{\text{nombre de fragments de la briquette}} \quad (9)$$

### 2.2.7. Choix du liant, du plan d'expérience et des facteurs

Une série d'expériences préliminaires au laboratoire a permis de choisir les liants appropriés ainsi que leurs plages de variation sur la base de leurs propriétés mécaniques : Indice de résistance à l'impact et de leurs propriétés texturales (mesure du Peak Load et Final Load). La matrice expérimentale qui a été utilisée est constituée de huit essais. La mélasse et les peaux de manioc ont été incorporées, mais l'amidon a été gélifié. Une solution d'amidon à 0,15 g.l<sup>-1</sup> a été préparée et portée à température sur une plaque chauffante jusqu'à l'obtention du gel d'amidon, puis laissée refroidie avant utilisation. En ce qui concerne le choix du plan d'expérience, la plupart des méthodes classiques sont soit coûteuses en nombre de simulations ou/et soit une cause de perte d'information dans le contexte des plans d'expériences numériques (Franco, 2008). Dans l'optique d'étudier l'influence des facteurs, un plan de criblage a été utilisé afin de déterminer les facteurs expérimentaux qui ont le plus d'impact sur les réponses.

Un plan factoriel fractionnaire de Fraction à niveaux mixtes a été utilisé. Le tableau 1 présente la matrice expérimentale utilisée pour la suite du travail

**Tableau 1.** Matrice d'expérience pour un plan factoriel fractionnaire à niveaux mixtes à quatre facteurs

Essais	Liant (%)	Taille (µm)	Temps (min)	Charge (Tonnes)	IRI	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	PL (g)	FL (g)
1	9,4	500	1	20				
2	9,4	500	1	10				
3	9,4	1000	2	20				
4	12,5	500	1	10				
5	12,5	1000	1	20				
6	9,4	500	2	20				
7	9,4	500	1	15				
8	12,5	1000	2	15				
9	9,4	500	2	10				
10	12,5	1000	1	10				
11	12,5	1000	2	20				
12	12,5	500	2	20				
13	12,5	500	1	20				
14	12,5	500	2	10				
15	9,4	500	2	15				
16	12,5	500	1	15				
17	9,4	1000	2	10				
18	9,4	1000	2	15				
19	9,4	1000	1	15				
20	12,5	1000	2	10				
21	12,5	1000	1	15				
22	9,4	1000	1	20				
23	12,5	500	2	15				
24	9,4	1000	1	10				

PL (Peak Load); FL (Final Load); IRI (Indice de Resistance à l'Impact)

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Caractérisation physico-chimique

Le tableau 2 présente la caractérisation physicochimique des coques de cacao et des différents liants

**Tableau 2.** Caractérisation physicochimique de la matière première

Teneurs (g/100 MS)	Coques de cacao	Peaux de manioc	Amidon de manioc	Mélasses
Teneur en eau	22,35 ± 0,05 <sup>Ad</sup>	15,29 ± 0,56 <sup>Bc</sup>	19,42 ± 0,26 <sup>Aa</sup>	30,79 ± 4,97 <sup>Ca</sup>
Teneur en cendres	6,05 ± 1,67 <sup>Aab</sup>	1,80 ± 0,72 <sup>Ba</sup>	/	9,81 ± 0,15 <sup>Cb</sup>
Teneur en sucres totaux	10,2 ± 0,12 <sup>Ab</sup>	41,87 ± 0,82 <sup>Bd</sup>	/	/
Teneur en matières grasses	6,6 ± 1,68 <sup>Ab</sup>	13,48 ± 0,53 <sup>Bc</sup>	/	/
Teneur en protéines brutes	0,20 ± 0,03 <sup>Aa</sup>	0,12 ± 0,05 <sup>Aa</sup>	/	/
Teneur en amidon	/	10,20 ± 0,80 <sup>b</sup>	/	/
Teneur en fibre brute	60,36 ± 7,19 <sup>e</sup>	/	/	/
Teneur en cellulose	44,35 ± 3,04 <sup>f</sup>	/	/	/
Teneur en lignine	50,98 ± 3,07 <sup>g</sup>	/	/	/
Degré Brix	/	/	/	107,17 ± 0,6 <sup>c</sup>

A, b, c, ... : pour chaque colonne, les valeurs affectées de la même lettre minuscule en exposant ne sont pas significativement différentes (P < 0,05 %). A, B, C : pour chaque ligne, les valeurs affectées de la même lettre majuscule en exposant ne sont pas significativement différentes (P < 0,05 %).

Les coques de cacao ont une composition variée. En effet on y retrouve de l'eau, des sucres, de la matière grasse, de protéines et des fibres. Cette dernière classe à la plus grande proportion avec une valeur de 60,36 ± 7,19 g pour 100 g de matière sèche. Les protéines sont les moins représentées avec une teneur de 0,20 ± 0,03g pour 100 g de matière sèche. Le tableau 3 présente la capacité d'adsorption d'eau apparente (CAEa) et réelle (CAEr) des poudres de coques de cacao.

**Tableau 3.** Capacité d'adsorption d'eau apparente et réelle des poudres de coque de cacao

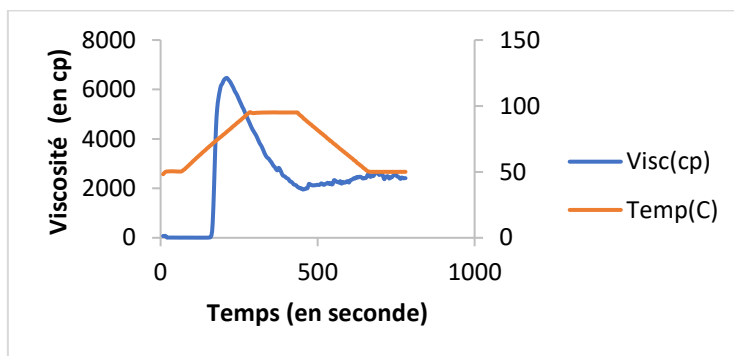
Tailles	CAEa	CAEr
500µm	8,63 ± 0,34 <sup>Aa</sup>	11,21 ± 0,23 <sup>aB</sup>
1000µm	7,64 ± 0,17 <sup>bA</sup>	9,76 ± 0,15 <sup>bB</sup>

Pour chaque colonne, les valeurs affectées de la même lettre minuscule en exposant ne sont pas significativement différentes (P < 0,05). Pour chaque ligne, les valeurs affectées de la même lettre majuscule en exposant ne sont pas significativement différentes (P < 0,05).

Au regard des résultats présentés dans le tableau 3, il apparait clairement que les capacités d'adsorption d'eau réelle et apparente des poudres de coques de cacao sont différentes. La CAEa diminue significativement (p<0.05) avec l'augmentation de la taille des particules. Il en est de même pour la CAEr. Par contre, pour la même taille des particules de poudre, la CAEa et la CAEr ne varient pas significativement (p < 0.05).

### 3.2. Propriétés rhéologiques de l'amidon

La figure 3 présente les courbes du profil de viscosité et de température de l'amidon de manioc en fonction du temps.



**Figure 3 :** Profil de viscosité et de température de l'amidon de manioc en fonction du temps

Il ressort de la figure 3 que la température de gélatinisation est de 80,65 °C. Elle permet d'indiquer la température minimale requise pour cuire un échantillon. Elle informe également sur les coûts énergétiques. Le pic de viscosité est de 6462 cp. Il indique la capacité de rétention d'eau de l'amidon et le temps nécessaire pour atteindre le pic de gélatinisation est de 212 secondes.

Le tableau 4 présente les différentes propriétés énergétiques des matières premières utilisées.

**Tableau 4.** Propriétés énergétiques des matières premières

	TC (g/100 g MS)	MV (g /100 g MS)	CF (g/100 g MS)	PC (MJ/kg)
Cacao	6,05 ± 1,67 <sup>bA</sup>	87,33 ± 3,21 <sup>bcC</sup>	6,62 ± 1,54 <sup>abA</sup>	15,91 ± 0,03 <sup>aB</sup>
Peaux de manioc	3,35 ± 0,73 <sup>aA</sup>	96,98 ± 0,89 <sup>cC</sup>	1,25 ± 0,16 <sup>aA</sup>	15,54 ± 0,09 <sup>aB</sup>
Mélasses	9,81 ± 0,15 <sup>cA</sup>	70,08 ± 2,72 <sup>abC</sup>	20,11 ± 2,56 <sup>bcB</sup>	17,96 ± 4,54 <sup>abB</sup>
Coques de cacao + 9,4 % de mélasses	5,88 ± 1,45 <sup>bA</sup>	72,91 ± 8,72 <sup>abC</sup>	19,90 ± 8,23 <sup>bcB</sup>	19,36 ± 1,79 <sup>abB</sup>
Coques de cacao + 12,5 % de mélasses	4,98 ± 2,49 <sup>bA</sup>	85,31 ± 1,83 <sup>bcB</sup>	9,71 ± 3,22 <sup>abC</sup>	16,69 ± 1,00 <sup>aD</sup>
Coques de cacao + 9,4 % d'amidon	6,05 ± 1,36 <sup>bA</sup>	82,63 ± 6,90 <sup>bcC</sup>	11,32 ± 5,57 <sup>abAB</sup>	16,84 ± 0,89 <sup>aB</sup>
Coques de cacao + 12,5 % d'amidon	6,05 ± 1,37 <sup>bA</sup>	67,62 ± 21,34 <sup>aB</sup>	26,32 ± 22,64 <sup>cA</sup>	19,80 ± 4,69 <sup>bA</sup>

Teneur en Cendres (TC), Matière Volatile (MV) et Carbone Fixe (CF).

Pour chaque colonne, les valeurs affectées de la même lettre minuscule en exposant ne sont pas significativement différentes (P < 0,05). Pour chaque ligne, les valeurs affectées de la même lettre majuscule en exposant ne sont pas significativement différentes (P < 0,05).

La teneur en cendre a une valeur plus élevée pour la mélasse. Toutefois, il n’y a pas de différence significative au seuil de 5 % entre les valeurs des teneurs en cendres des coques de cacao, et celles des coques de cacao additionnées de liants. Globalement, les coques de cacao additionnées de liants présentent un pouvoir calorifique supérieur aux autres matières premières, d'où on peut dire que l'incorporation de la mélasse et de l'amidon contribue à augmenter le pouvoir calorifique de cette matière première. La mélasse présente également un pouvoir calorifique plus élevé que celui des coques de cacao sans addition de liant et un pouvoir en cendres plus élevé.

Le tableau 5 compare la teneur en eau des poudres de coque de cacao additionnées de liant d'amidon et de mélasse fixés aux taux minimal (9,4 %) et maximal (12,5 %) d'incorporation.

**Tableau 5.** Teneur en eau des poudres de coques de cacao additionnées d’amidon ou de mélasse, à deux taux différents.

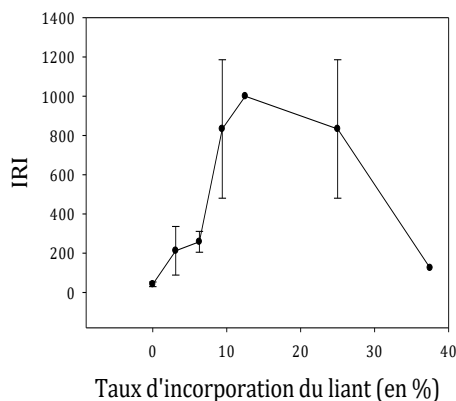
Liant (%)	Amidon	Mélasse
9,4	23,81 ± 0,28 <sup>aA</sup>	17,57 ± 1,15 <sup>aB</sup>
12,5	25,80 ± 0,62 <sup>bA</sup>	18,24 ± 0,77 <sup>aB</sup>

Pour chaque colonne, les valeurs affectées de la même lettre minuscule en exposant ne sont pas significativement différentes (P < 0,05). Pour chaque ligne, les valeurs affectées de la même lettre majuscule en exposant ne sont pas significativement différentes (P < 0,05).

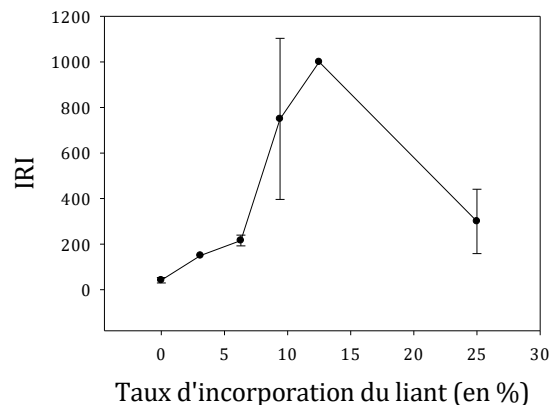
La teneur en eau est plus élevée pour les briquettes ayant un taux d'incorporation en liant élevé. Toute fois on note que pour un taux d'incorporation en liant de 9,4 %, la teneur en eau ne présente pas de différence significative au seuil de 5 %.

### 3.3. Propriétés mécaniques des coques de cacao

La figure 4 présente la résistance à l'impact des coques de cacao en fonction du taux d'incorporation de l'amidon.



**Figure 4.** Indice de résistance à l'impact des briquettes énergétiques additionnées d'amidon



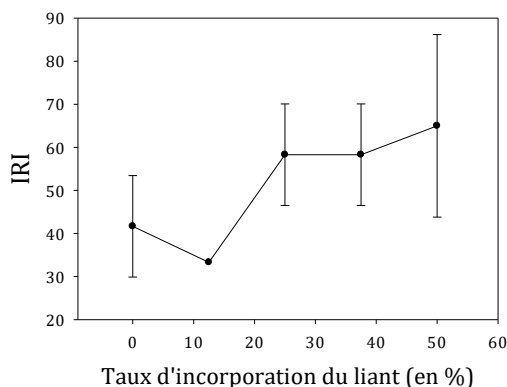
**Figure 5.** Indice de résistance à l'impact des briquettes énergétiques additionnées de mélasse de canne à sucre comme liant.

La figure 4 présente une courbe à allure parabolique présentant un maximum à 1000, pour un taux d'incorporation compris entre 2,5 % et 9,4 %. Cette plage de variation d'incorporation de l'amidon gélatinisée comme liant correspond à une zone d'incorporation de liant pour laquelle l'IRI présente une valeur maximale comprise entre 833,3 et 1000. Ce qui montre que l'incorporation d'amidon améliore la résistance à l'impact des briquettes énergétiques à base des coques de cacao. Toute fois une incorporation faible ou trop importante diminue la résistance à l'impact.

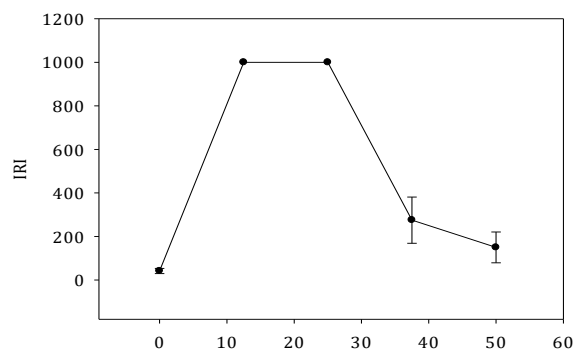
La figure 5 présente une courbe à allure parabolique présentant un maximum à 1000, pour un taux d'incorporation de mélasse de canne à sucre compris entre 2,5 % et 9,4 %. Cette plage de variation d'incorporation de la mélasse de canne à sucre correspond à une zone d'incorporation de liant pour laquelle l'IRI présente une valeur maximale comprise entre 300 et 1000. Ce qui montre



que l'incorporation de la mélasse de canne à sucre améliore la résistance à l'impact des briquettes énergétiques à base des coques de cacao. Toute fois une incorporation faible ou trop importante diminue la résistance à l'impact.



**Figure 6.** Indice de résistance à l'impact des briquettes énergétiques additionnées de peaux de manioc comme liant



**Figure 7.** Indice de résistance à l'impact des briquettes énergétiques additionnées de peaux de manioc comme liant + 2 mL d'eau

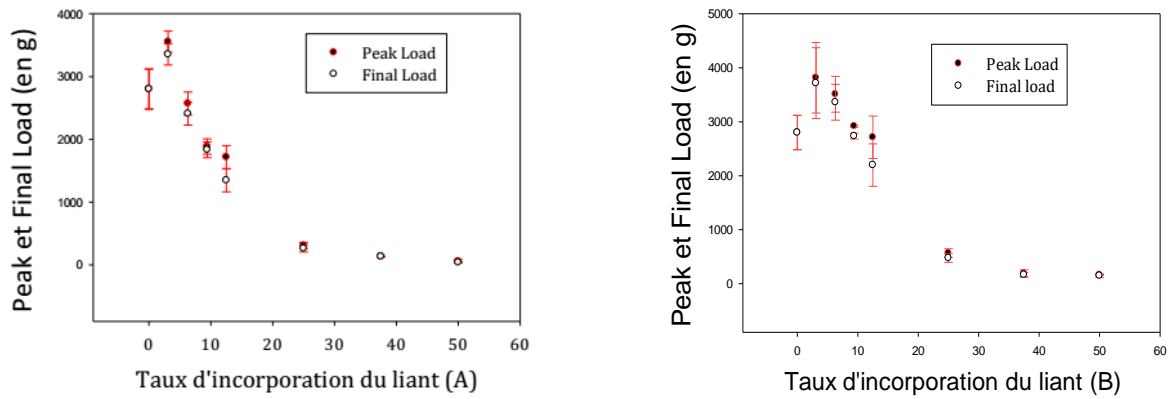
La figure 6 présente la résistance à l'impact des coques de cacao en fonction du taux d'incorporation de mélasse sous forme d'une droite dont la pente est positive avec un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) de 0,7311. La valeur maximale d'IRI atteinte est de 65, correspondant à un taux d'incorporation de 50 %. Ce qui montre bien que l'addition de peaux de manioc améliore la résistance à l'impact des briquettes énergétiques à base des coques de cacao. Le tableau 6 présente la matrice d'expérience utilisée ainsi que des valeurs d'IRI observées.

**Tableau 6.** Valeurs d'IRI observées

Essai	Liant	Amidon	Mélasse	Peaux de manioc
1	0	41,67	41,67	41,67
2	3,1 %	212,5	150	/
3	6,3 %	258,3	216	/
4	9,4 %	833,3	750	/
5	12,5 %	1000	1000	33,3
6	25 %	833,3	300	58,3
7	37,5 %	125	/	58,3
8	50 %	/	/	65

Le Tableau 6 montre que les valeurs d'IRI obtenues pour les peaux de manioc sont de loin inférieures à celles d'amidon et de mélasse de canne à sucre, ce qui montre que l'amidon améliore faiblement les propriétés mécaniques en termes de résistance à l'impact des briquettes énergétiques à base des coques de cacao. La plage d'incorporation de liant comprise entre 9,4 % et 12,5 % correspond aux valeurs d'IRI max pour la mélasse de canne à sucre et pour l'amidon de manioc gélatinisée. En effet cette différence serait due d'une part aux quantités d'eau apportées par l'amidon gélatinisée et la mélasse de canne à sucre plus importantes que celle apportée par les peaux de manioc, raison pour laquelle l'expérience avec les peaux de manioc a été reprise avec cette fois une addition d'eau (2 mL). Au regard de la figure 7, le constat fait est que l'eau a permis d'améliorer la résistance à l'impact des briquettes énergétiques additionnées de peaux de manioc.

La figure 8 présente les propriétés texturales des briquettes énergétiques sous forme des courbes aux allures décroissantes en fonction du taux d'incorporation du liant aussi bien pour la mélasse que pour l'amidon, ces deux courbes semblent être identiques et montrent que l'incorporation de l'amidon et de la mélasse comme liant diminuent la fermeté des briquettes énergétiques d'où il convient donc de trouver une plage optimale d'incorporation de liant qui assure une bonne fermeté et une bonne résistance à l'impact.



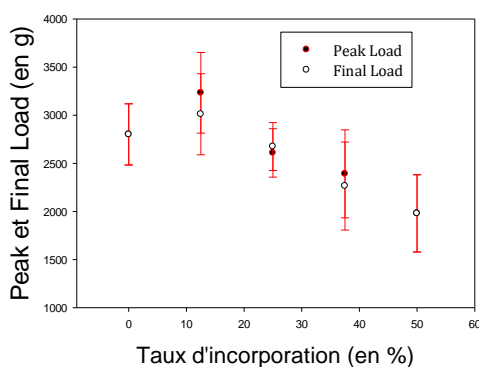
**Figure 8 :** Peak et Final Load des coques de cacao en fonction du taux d'incorporation de l'amidon

Le tableau 7 présente les valeurs observées de *Peak Load* et *Final Load* pour chaque type de liant ainsi que les valeurs d'IRI correspondantes.

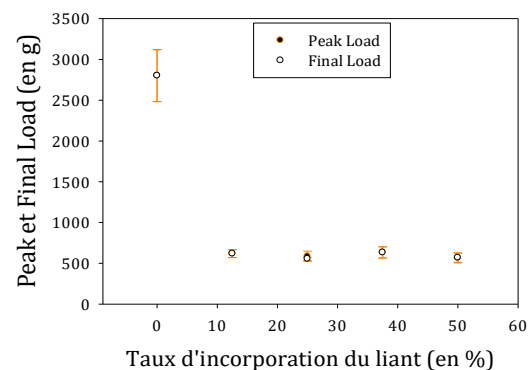
**Tableau .7.** Valeurs observées de *Peak Load* et *Final Load* pour chaque type de liant ainsi que les valeurs d'IRI correspondantes

Essai	Liant	Amidon			Mélasse		
		Peak Load	Final Load	IRI	Peak Load	Final Load	IRI
1	0	2802	2801	41,67	2802	2801	41,67
2		3554	3354	213	3815	3716	150
3	0,63	2571	2411	258	3511	3363	216
4	0,94	1886,5	1834,5	833,3	2919	2735	750
5	1,25	1717	1348	1000	2713	2198	1000
6	2,5	310	263	833	567	474	300
7	3,75	134	133,5	125	189	165	/
8	5	57,5	40	/	161	146	/

Le tableau 7 montre que la plage optimale d'incorporation de liant correspondant à un IRI max présente également des valeurs de Peak et Final Load acceptables pour la mélasse et l'amidon de manioc. La figure 9 présente la résistance à l'impact des coques de cacao en fonction du taux d'incorporation de mélasse.



**Figure 9 :** Peak et Final Load des briquettes énergétiques additionnées de peaux de manioc comme liant.



**Figure 10 :** Peak et Final Load des briquettes énergétiques additionnées de peaux de manioc comme liant + 2 mL d'eau.

A la différence de l'IRI, les valeurs de Peak et Final Load obtenues pour les peaux de manioc sont bien élevées comparé à celles obtenues avec l'amidon et la mélasse comme liant. On observe que les Peak et Final Load diminuent avec l'incorporation des peaux de manioc, c'est également ce qui a été observée pour les deux autres liants. Etant donné que les valeurs d'IRI obtenues sont faibles et qu'il a été convenue d'incorporer de l'eau, la mesure du Peak et Final Load a également été effectuée sur les ces

briquettes telles que présentée par la figure 7. Au regard de la figure 8, le constat fait est que l'addition d'eau diminue considérablement les paramètres texturaux des briquettes énergétiques de coque de cacao additionnées de peau de manioc.

En ce qui concerne le choix du liant, Le tableau 8 et le tableau 9 présentent la matrice expérimentale des valeurs réelles ainsi que les réponses obtenues après expérimentation pour chaque type de liant (amidon et mélasse respectivement).

**Tableau 8.** Matrice expérimentale (incorporation de l'amidon comme liant)

Essais	Liant (%)	Taille (µm)	Temps (min)	Charge (Tonnes)	IRI	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	PL (g)	FL (g)
1	9,4	500	1	20	750	912,66	2309	2305
2	9,4	500	1	10	1000	903,23	2441	2440
3	9,4	1000	2	20	750	904,31	2220	2218
4	12,5	500	1	10	750	862,28	1408	1408
5	12,5	1000	1	20	300	878,42	1649	1634
6	9,4	500	2	20	400	945,48	2680	2680
7	9,4	500	1	15	1000	909,65	2679	2679
8	12,5	1000	2	15	1000	886,56	2385	2261
9	9,4	500	2	10	750	906,90	2819	2819
10	12,5	1000	1	10	1000	837,97	1347	1325
11	12,5	1000	2	20	1000	840,39	1361	1306
12	12,5	500	2	20	725	879,70	1631	1631
13	12,5	500	1	20	1000	889,62	1917	1917
14	12,5	500	2	10	750	893,24	1913	1913
15	9,4	500	2	15	1000	928,10	3102	3101
16	12,5	500	1	15	1000	871,76	2050	2048
17	9,4	1000	2	10	1000	853,61	1868	1867
18	9,4	1000	2	15	1000	863,36	1492	1465
19	9,4	1000	1	15	1000	839,12	1361	1243
20	12,5	1000	2	10	1000	825,36	1621	1611
21	12,5	1000	1	15	1000	838,69	1389	1389
22	9,4	1000	1	20	650	868,36	2128	2128
23	12,5	500	2	15	1000	915,64	2202	2201
24	9,4	1000	1	10	1000	848,25	1519	1786

**Tableau 9.** Matrice expérimentale (incorporation de la mélasse comme liant)

Essais	Liant (%)	Taille (µm)	Temps (min)	Charge (Tonnes)	IRI	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	PL (g)	FL (g)
1	9,4	500	1	20	325	954,39	3231	3231
2	9,4	500	1	10	750	838,60	3139	3139
3	9,4	1000	2	20	175	954,09	2016	1968
4	12,5	500	1	10	725	879,46	2212	2212
5	12,5	1000	1	20	275	971,30	1277	1204
6	9,4	500	2	20	1000	943,51	4103	4103
7	9,4	500	1	15	600	913,81	3156	3421
8	12,5	1000	2	15	250	918,42	1928	1855
9	9,4	500	2	10	475	892,29	3099	3099
10	12,5	1000	1	10	50	865,16	1080	932
11	12,5	1000	2	20	225	934,61	1613	1508
12	12,5	500	2	20	1000	955,10	2629	2607
13	12,5	500	1	20	1000	945,73	2156	2156
14	12,5	500	2	10	366,7	908,84	1664	1664
15	9,4	500	2	15	616,7	941,48	3751	3751
16	12,5	500	1	15	625	942,42	2164	2164
17	9,4	1000	2	10	100	895,09	1712	1709
18	9,4	1000	2	15	225	945,76	2369	2161
19	9,4	1000	1	15	287,5	924,94	2250	2244
20	12,5	1000	2	10	150	875,92	1020	739
21	12,5	1000	1	15	133,3	930,75	1629	1552
22	9,4	1000	1	20	133,3	929,52	1495	1318
23	12,5	500	2	15	1000	955,95	2450	2450
24	9,4	1000	1	10	137,5	913,41	1485	1406

### 3.4. Indice de résistance à l'impact

L'analyse de la variance (Tableau 10) résume les résultats de l'ajustement du modèle statistique reliant l'IRI aux facteurs expérimentaux.

**Tableau 10.** Statistique résumée des différents modèles pour les deux types de liant utilisés

Statistiques	Amidon	Mélasse
Rapport <i>F</i>	1,56914	4,21225
Probabilité	0,2512	0,0179
Coefficient de détermination ( <i>R</i> <sup>2</sup> )	70,9377%	86,75%
Coefficient de détermination ajusté ( <i>R</i> <sup>2</sup> ajusté)	25,7298%	66,16%
Significativité du modèle (à 5 %)	Non Significatif	Significatif

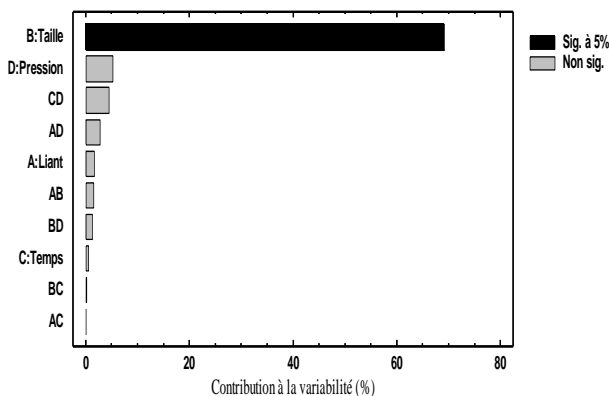
La probabilité correspondant au rapport *F* est inférieure à 0,05 pour la mélasse, ce qui rend le modèle valide au seuil de 5 %. Par contre, pour l'amidon de manioc, la probabilité correspondante au rapport *F* est supérieure à 0,05 ce qui rend le modèle mathématique invalide au seuil de 5 %.

Le modèle mathématique obtenu pour la mélasse est donnée par l'équation 10, où *L*, *T<sub>i</sub>*, *T* et *P* sont respectivement le liant, la taille, le temps et la pression.

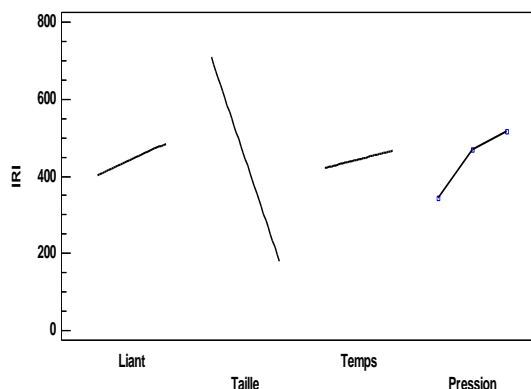
$$IRI(mélasse) = 442,708 + 40,625L - 264,242T_i + 22,575T + 98,433P - 38,541LT_i + 7,291LT + 61,975LP - 13,541T_i + 21,004T_iP + 93,762TP \tag{10}$$

Les figure 11 et 12 présentent respectivement le diagramme de Pareto et le graphique des effets directs sur l'IRI et pour les briquettes contenant la mélasse.

Les graphiques de Pareto montrent que le facteur taille est le plus influent (au seuil de 5 %) sur la réponse pour la mélasse. En dehors de ce facteur, les effets des autres facteurs ne sont pas significatifs au seuil de 5 % sur l'IRI des briquettes à base de mélasse. L'analyse des effets poursuit cette décomposition de la variabilité expliquée par le modèle en éléments séparés pour chacun des effets. Elle teste alors la significativité statistique de chaque effet en comparant la moyenne quadratique à l'erreur expérimentale estimée.



**Figure 11 :** Graphique de Pareto pour l'IRI (mélasse de canne à sucre)



**Figure 12 :** Graphique des effets directs pour l'IRI (mélasse de canne à sucre)

### 3.5. Masse volumique des briquettes énergétiques après relaxation

L'analyse de la variance (Tableau 11) résume les résultats de l'ajustement du modèle statistique reliant la masse volumique aux facteurs expérimentaux.

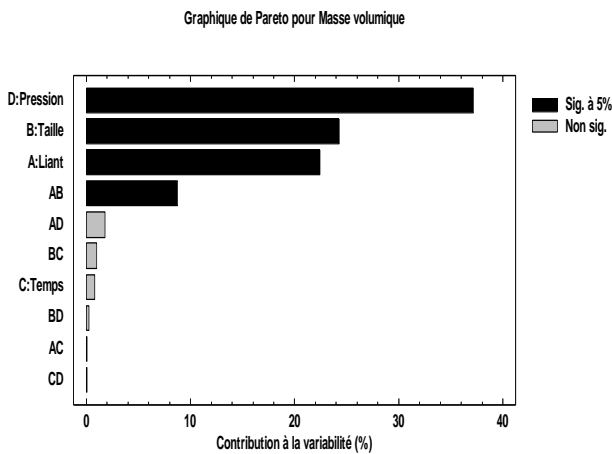
**Tableau 11.** La statistique résumée des différents modèles pour les deux types de liant utilisés

Statistiques	Amidon	Mélasse
Rapport <i>F</i>	1,94593	19,0134
Probabilité	0,1587	0,0001
Coefficient de détermination ( <i>R</i> <sup>2</sup> )	75,1676 %	96,7295 %
Coefficient de détermination ajusté ( <i>R</i> <sup>2</sup> ajusté)	36,539 5%	91,6421 %
Significativité du modèle (à 5%)	Non significatif	Significatif

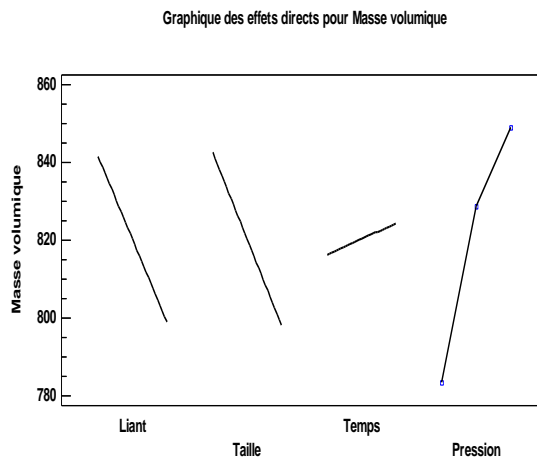
Du tableau ci-dessus, la probabilité correspondant au rapport *F* est inférieure à 0,05 pour la mélasse, ce qui rend le modèle valide au seuil de 5%. Par contre, pour l'amidon de manioc, la probabilité correspondante au rapport *F* est supérieure à 0,05 ce qui rend le modèle mathématique invalide au seuil de 5%. L'équation 11 fournit le modèle de la masse volumique pour les briquettes à a mélasse :

$$\begin{aligned}
 \text{Masse Volumique(Mélasse)} = & 820,192 - 21,329L - 22,201T_i + 4,039T + 38,005P + 13,343LT_i - 1,343LT - \\
 & 3,082LP - 4,477T_iT + 0,935T_iP - 0,201TP \tag{11}
 \end{aligned}$$

Les figures 13 et 14 présentent les graphiques de Pareto et le graphe des effets correspondants.



**Figure 13 :** Pareto pour masse volumique (mélasse de canne à sucre)



**Figure 14 :** Graphique des effets directs pour la masse volumique (Mélasse de canne à sucre)

Il ressort des figures 13 et 14 qu'après relaxation, la pression, la taille, le liant et l'inter action taille - liant influencent significativement la réponse de la masse volumique des briquettes à base de mélasse., contrairement à l'amidon où ceux non pas d'effet significatif. Au regard des figures, les poudres de taille inférieure à 500µm avec un faible taux d'incorporation de liant contribuent grandement à l'augmentation de la masse volumique des briquettes. Toutefois la pression appliquée doit être assez importante.

### 3.6. Peak Load

L'analyse de la variance (Tableau 12) résume les résultats de l'ajustement du modèle statistique reliant le Peak Load aux facteurs expérimentaux.

**Tableau 12.** Statistique résumée des différents modèles pour les deux types de liant utilisés

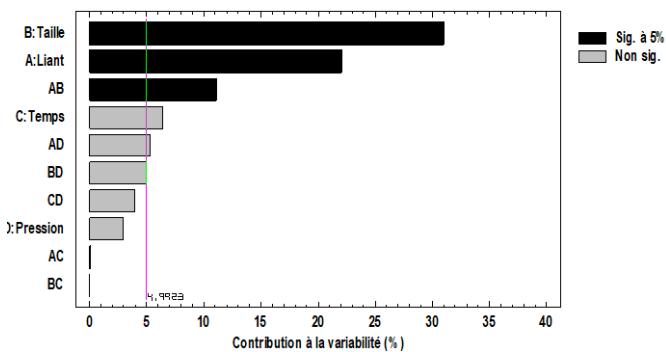
Statistiques	Amidon	Mélasse
Rapport <i>F</i>	4,67159	42,4001
Probabilité	0,0127	0,0000
Coefficient de détermination ( <i>R</i> <sup>2</sup> )	87,9036	98,5065 %
Coefficient de détermination ajusté ( <i>R</i> <sup>2</sup> ajusté)	69,0869	96,1832%
Significativité du modèle (à 5 %)	Significatif	Significatif

Le tableau 12 montre que la probabilité correspondant au rapport *F* est inférieure à 0.05 pour les deux liants utilisés, ce qui rend les modèles valides au seuil de 5 %. Toute fois on note des valeurs de *R*<sup>2</sup> supérieur à 98 % et *R*<sup>2</sup>ajuté supérieur à 96 % pour la mélasse. Les modèles obtenus sont de second ordre et sont présenté par les équations 12 et 13, respectivement pour l'amidon et la mélasse.

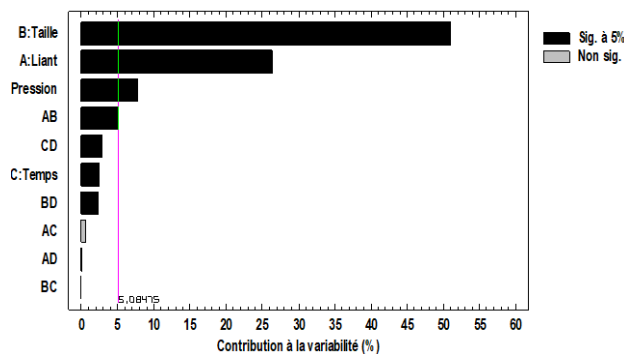
$$PL(amidon) = 1978,72 - 239,412L - 283,729T_i + 129,021T + 111,946P + 169,721LT_i - 16,345LT + 55,287LP + 0,387T_iT - 5,554T_iP - 59,180TP \tag{12}$$

$$FL(mélasse) = 224,34 - 415,988L - 578,346T_i + 128,362T + 307,979P + 184,337LT_i - 62,870LT + 19,413LP - 8,162T_iT + 23,779T_iP - 108,937TP \tag{13}$$

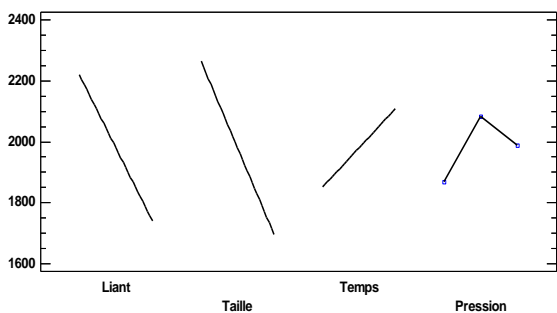
Les figures 18 et 19 présentent les graphiques de Pareto pour la masse volumique des briquettes énergétiques et pour chaque type de liant utilisé



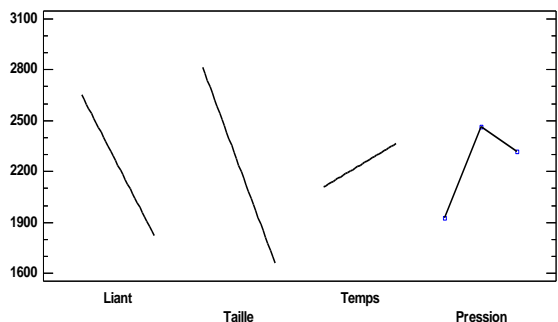
**Figure 15 :** Graphique de Pareto pour le Peak Load (Amidon de manioc)



**Figure 16 :** Graphique de Pareto pour le Peak Load (Mélasse de canne à sucre)



**Figure 17 :** Graphique des effets directs pour la masse volumique (amidon de manioc)



**Figure 18 :** Graphique des effets direct pour la masse volumique (mélasse de canne à sucre)

Les graphes de Pareto montrent que les facteurs taille et liant ainsi que leur interaction ont une influence significative sur le Peak Load au seuil de 5 % pour l'amidon, tandis que pour la mélasse, tous les facteurs ont une influence significative sur le Peak Load ainsi que leur inters actions en dehors de l'inter action taille – liant (AC) au seuil de 5 %. Toute fois les facteurs taille et liant sont les plus influents pour l'amidon comme pour la mélasse.

Les graphes des effets présentés par les figures 17 et 18 montrent que les particules de petite taille (< 500µm) influencent grandement sur le Peak Load tout comme la faible incorporation de liant (9,4 %). La pression maximale nécessaire est de 15 tonnes. L’analyse de la variance résume les résultats de l’ajustement du modèle statistique reliant le Final Load aux facteurs expérimentaux (tableau 14).

**Tableau 14.** Statistique résumée des différents modèles pour les deux types de liant utilisés

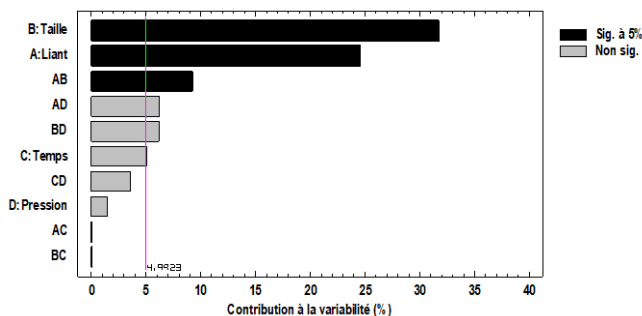
Statistiques	Amidon	Mélasse
Rapport <i>F</i>	4,847	35,5307
Probabilité	0,0112	0,0000
Coefficient de détermination ( <i>R</i> <sup>2</sup> )	88,2901 %	98,2229 %
Coefficient de détermination ajusté ( <i>R</i> <sup>2</sup> ajusté)	70,0747 %	95,4584 %
Significativité du modèle (à 5 %)	Significatif	Significatif

Du tableau 14, la probabilité correspondant au rapport *F* est inférieure à 0.05 pour les deux liants utilisés, ce qui rend les modèles valides au seuil de 5 %. Toute fois on note des valeurs de *R*<sup>2</sup> supérieur à 98% et *R*<sup>2</sup>ajusté supérieur à 95 % pour la mélasse. Les modèles obtenus sont de second ordre et sont présenté par les équations 14 et 15 pour l’amidon et la mélasse respectivement

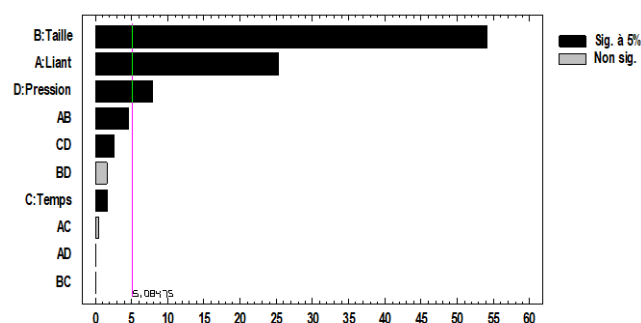
$$PL(amidon) = 1978,72 - 239,412L - 283,729T_i + 129,021T + 111,946P + 169,721LT_i - 16,345LT + 55,287LP + 0,387T_iT - 5,554T_iP - 59,180TP \tag{14}$$

$$FL(mélasse) = 2191,390 - 437,787L - 641,638T_i + 109,762T + 328,875P + 186,421LT_i - 59,545LT + 38,000LP - 2,879T_iT + 24,375T_iP + 169,450T \tag{15}$$

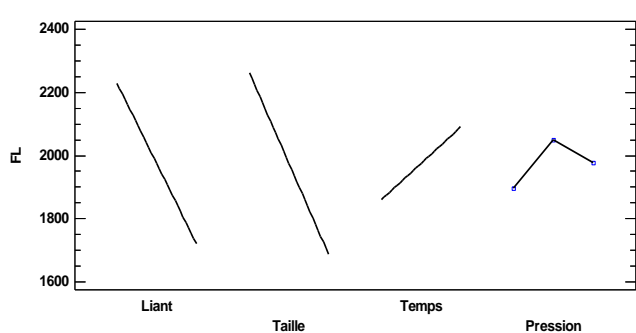
Les figures 19 et 20 présentent les graphiques de Pareto pour la masse volumique des briquettes énergétiques et pour chaque type de liant utilisé. Les figures 21 et 22 présentent le graphique des effets directs pour la masse volumique des briquettes énergétiques et pour chaque type de liant utilisé.



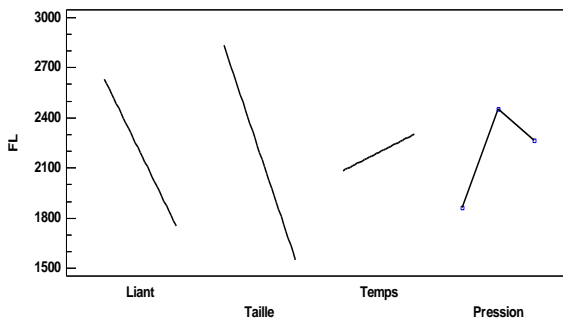
**Figure 19 :** Graphique de Pareto pour la masse volumique (amidon de manioc)



**Figure 20 :** Graphique de Pareto pour le Final Load (mélasse de canne à sucre)



**Figure 21 :** Graphique des effets directs pour le Final Load (amidon de manioc)



**Figure 22 :** Graphique des effets pour le Final Load (mélasse de canne à sucre)

Les graphes de Pareto (figures 19 et 20) montrent que les facteurs taille et liant ainsi que leur inter action ont une influence significative sur le Final Load au seuil de 5 % pour l'amidon, tandis que pour la mélasse, tous les facteurs ont une influence significative sur le Peak Load ainsi que leur inters actions en dehors de l'inter action taille – liant (AC) au seuil de 5 %. Toute fois les facteurs taille et liant sont les plus influents pour l'amidon comme pour la mélasse. Les graphes des effets (figures 21 et 22) montrent que les particules de petite taille (< 500µm) influencent grandement sur le Final Load tout comme la faible incorporation de liant (9,4 %). La pression maximale nécessaire est de 15 tonnes.

### 3.7. Optimisation

Pour chacune des réponses observées ci-dessus, le logiciel STATGRAPHICS XVI.1 donne les points optimaux, c'est-à-dire ceux pour lesquels les réponses observées sont à leur valeur maximale. Ainsi pour chaque type de liant les points optimaux sont présentés dans le tableau 15.

**Tableau 15.** Matrice des points optimaux

Type de liant	Point optimal	Liant (en %)	Taille (en µm)	Temps (en Min)	P° (en Mpa)	Réponses
Amidon	6	9,4	500	2	20	Masse volumique
	8	12,5	1000	2	15	IRI
	15	9,4	500	2	15	PL et FL
Mélasse	12	12,5	500	2	20	IRI
	6	9,4	500	2	20	Masse volumique, PL et FL

De ce tableau 15, il ressort que les optimums sont obtenus pour des tailles de particules majoritairement faible (<500µm), de même le taux d'incorporation du liant (autour de 9,4 %). Par contre la charge est majoritairement de 20 tonnes et le temps de compression est globalement de 2 minutes.

## 4. CONCLUSION

Au terme de ce travail, où il était question d'étudier l'influence du liant et de la taille des particules sur les propriétés thermomécaniques des briquettes énergétiques à base de coques de cacao, il ressort que la présence de liant contribue significativement à l'amélioration des propriétés thermiques et mécaniques des briquettes énergétiques à base des coques de cacao. Des essais préliminaires de briquetage ont montré qu'il existe un taux optimal d'incorporation de liant permettant d'assurer de bonnes propriétés mécaniques des briquettes à bases des coques de cacao. Le choix du liant a été porté en premier lieu sur la mélasse et en second, sur l'amidon de manioc. Les peaux de manioc ont présenté de bonnes propriétés texturales mais avec de faibles résistances à l'impact, ce qui limiterait leur utilisation car ne résisteront pas aux diverses conditions de manutention et de transport. Des trois liants étudiés, l'incorporation de la mélasse de canne à sucre ou de l'amidon de manioc, améliore les propriétés thermiques des briquettes énergétiques en ce sens qu'ils contribuent grandement à augmenter le pouvoir calorifique de ces briquettes énergétiques (19,80 ± 4,69 kJ/kg). La taille des particules influence significativement les propriétés mécaniques des briquettes énergétiques produites, car l'indice de résistance à l'impact augmente avec la diminution des tailles des particules.

## 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l'Enseignement Supérieur de la République du Cameroun pour son soutien financier à travers le Compte du Fonds Spécial pour la modernisation de la recherche dans les Universités d'Etat (Décret Présidentiel N\_2009/121 du 8 avril 2009).



## 6. CONFLITS D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt.

## 7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Clarke S. et Preto F., 2011. Densification de la biomasse pour la production d'énergie, Fiche Technique, N° 11-036 AGDEX 737/120, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales, Ontario, 8p.
- FAO., 2014a. Bioénergie et sécurité alimentaire évaluation rapide (BEFS RA). Combustion, 40p.
- FAO., 2014b. Bioénergie et sécurité alimentaire évaluation rapide (BEFS RA). Résidus de Cultures et d'élevage, 31p.
- García R., Gonzalez- vazquez M.P., Martin A.J., Pevida C. and Rubiera F., 2019. Pelletization of torrefied biomass with solid and liquid bio-additives.
- Kaliyan N. and Morey R.V., 2010. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresour. Technol.*, **101**(3), 1082-90.
- Lacour J., 2016. Guide opérationnel : Fabriquer des briquettes combustibles à partir de déchets ménagers. *Collection « Gérer les déchets ménagers dans les pays en développement »*, Les Éditions Re-Sources, Réseau pour une gestion durable des solides, 16p.
- Laval M. 2014. La Guilde Européenne du Raid. Agence des Micro-projet. Evaluation et capitalisation de microprojets.
- Lorenzo Riva, Nielsen Henrik, Skreiberg Øyvind, Skreiberg, Wang Liang, Bartocci Pietro, Barbanera Marco, Bidini Gianni and Fantozzi Francesco, 2019. Analysis of optimal temperature, pressure and binder quantity for the production of biocarbon pellet to be used as a substitute for coke. *Applied Energy*, **256**, 10.1016/j.apenergy.2019.113933
- Lorenzo Riva, Liang Wang, Giulia Ravenni, Pietro Bartocci, Therese Videm Buø, Øyvind Skreiberg, Francesco Fantozzi and Henrik Kofoed Nielsen, 2021. Considerations on factors affecting biochar densification behavior based on a multiparameter model. *Energy*, **221**, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119893>.
- Madhurjya, Saikia and Baruah Deben, 2013. Analysis of Physical Properties of Biomass Briquettes Prepared by Wet Briquetting Method. *International Journal of Engineering Research and Development*, **6**(5), 12–14.
- Mukherjee C., Denney J., Mbonimpa E.G., Slagley J. and Bhowmik R., 2020. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, **119**(C).
- Parikh J., Channiwala S.A. and Ghosal G.K., 2007. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, **86**(12-13), 1710–1719. doi:10.1016/j.fuel.2006.12.029
- PERACOD., 2011. Programme pour la promotion des énergies renouvelables, de l'électrification rurale et de l'approvisionnement durable en combustibles domestiques. Les énergies renouvelables : les bases, la technologie et le potentiel au Sénégal.
- Pitcholo Akla-Esso, 1990. Essai d'utilisation des péricarpes des cabosses de cacao (*Theobroma cacao* L) dans l'alimentation des poulets de chair au Togo. Thèse de doctorat. Ecole Inter-Etat des sciences et médecines vétérinaires, Dakar (Sénégal): Université Cheikh Anta Diop.
- Pratoto A. et Abhen A. J., 2021. Thermogravimetric Analysis of Densified Coco Peat Briquettes. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, **1062**, *International Colloquium on Computational & Experimental Mechanics (ICCEM 2020)* 25th -26th June 2020, Selangor, Malaysia.
- Rezvani Z., Chegini G., Arabhosseini A. and Kianmehr M.H., 2014. Natural Energy of Briquette, Definitions, Benefits and Technologies. *Journal of Automotive and Applied Mechanics*, **2**(1), SCIJOUR.
- Samomssa I., Jiokap Nono Y., Cârâc G., Gurău G., Dinică M.R. and Kamga R., 2021. Optimization of fuel briquette production from cassava peels, plantain peels and corn cobs. *J Mater Cycles Waste Manag.*, **23**, 1905–1917, <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01260-1>
- Tumuluru J.S, Wright C., Kenny K. and Hess J.R., 2010. A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application . INL/EXT-10-18420. Idaho National Laboratory, Biofuels and Renewable Energies Technologies Department, Energy Systems and Technologies Division, Idaho Falls, 85p.