



The 1st International Conference on Local Resource Exploitation

www.lorexp.org / info@lorexp.org

REF: LOREXP_2021_A1184 Pages: 868–878

LOREXP

LOCAL RESOURCE EXPLOITATION

Caractérisation des équipements de broyage des céréales de fabrication locale au Cameroun et évaluation de l'énergie consommée

Characterization of locally produced cereal grinding equipment in Cameroon and evaluation of the energy consumed

Kengne Benjamin^{1,*}, Nzie Wolfgang¹, Tcheukam-Toko Denis² et Ali Ahmed¹

¹ Université de Ngaoundéré, B.P 455, Ngaoundéré-Cameroon

² Université de Buea, B.P. 63, Buéa-Cameroon.

* Corresponding Author : benjaminkengne@gmail.com

RÉSUMÉ :

Notre travail consiste à identifier les équipements de broyage qui sont utilisés au Cameroun et d'évaluer la consommation en énergie spécifique du broyeur le plus utilisé. Dans un premier temps, nous avons fait des enquêtes auprès des fabricants locaux des équipements et des utilisateurs de broyeurs. Les résultats ont montré que le broyeur à marteaux est le plus utilisé ; sur 222 équipements de broyage recensés chez les utilisateurs, 187 sont des broyeurs à marteaux et 94,12 % de ceux-ci sont de fabrication locale. Et chez les fabricants, on a relevé que 70,4 % des broyeurs fabriqués sont des broyeurs à marteaux. Pour évaluer la consommation en énergie, nous avons fait varier la vitesse de rotation, la taille du tamis et l'épaisseur du marteau. Les résultats obtenus montrent que ces variables ont une influence significative sur l'énergie spécifique consommée au cours du broyage du maïs. La plus faible consommation d'énergie spécifique d'une valeur de 3,5 kWh/t est obtenue à 3000 tr/mn, avec l'épaisseur de marteau de 4 mm avec un tamis de taille 8 mm, alors la plus grande valeur est 8,5 kWh/t pour une vitesse de rotation de 1500 tr/mn, épaisseur du marteau 6 mm et une taille de tamis de 2 mm.

Mots clés : Broyage, Énergie spécifique, Broyeur à marteaux.

ABSTRACT:

This work consists to identify crushing equipments, that are been used in Cameroon and evaluate the specific energy consumption of the most used crushers. We firstly did investigations on the equipment local manufacturers and on the crusher users. The results have shown that hammer mill is the most used, out of 222 crushing equipments counted from the user, 187 are hammer mills and 94.12 % of these are issued from local manufacturing. We have taken note from the manufacturer that 70.4 % of manufactured crushers are hammer mills. To evaluate the energy consumption, we have varied the rotation speed, the screen size and the hammer thickness. The obtained results show that these variables have a significant influence on the consumed specific energy during maize milling or grinding. The lowest consumed specific energy of value 3.5 kWh/t is obtained at 3000 r/min using a hammer of 4 mm thick with a screen size of 8 mm. The highest value is 8.5 kWh/t for a rotation speed of 1500 r/min, hammer thickness of 6mm and a screen size of 2 mm.

Keywords: Crushing, Specific energy, Hammer mill.

1. INTRODUCTION

L'évolution technologique mondiale a entraîné chez les concepteurs africains et particulièrement ceux de l'Afrique de l'Ouest et Centrale, des innovations techniques dans la transformation des produits agricoles; bien que ces dernières satisfassent peu les utilisateurs, elles ont toutefois contribué à faire évoluer les démarches et les méthodes de conception des équipements (Fofiri Nzossie et al., 2015; Bricas, 2012; Marouzé et al., 2004). Face aux difficultés d'importations et aux coûts des équipements de production, il est important pour les utilisateurs ou entreprises de transformations d'avoir recours aux équipements de fabrication locale (Medah, 2011). Par conséquent, le marché des machines de transformation a une importance économique significative et offre de grandes opportunités pour les entreprises locales qui dès lors se spécialisent dans la fabrication de machines agro-alimentaires (Mugabi et al., 2017).

Dans la filière céréales, le processus de transformation se déroule en deux phases : La transformation primaire qui comprend les opérations de nettoyage, de décorticage et de mouture ou de broyage, et la transformation secondaire qui comprend comme la fermentation, le roulage, la cuisson à la vapeur, le séchage. La mouture est l'une des plus anciennes techniques culturelles de l'humanité. L'objectif principal de la mouture est d'améliorer la digestibilité du grain destiné à la consommation humaine ou animale.

Au Cameroun, les activités des meuneries et des fabricants locaux dans les zones rurales et urbaines jouent un rôle essentiel dans l'économie et de la production locale de farine à base de maïs. En effet, l'activité de transformation apporte de la valeur ajoutée à tout produit de base et permet de générer des revenus aux différents acteurs de la filière (équipementiers, transformateurs et commerçants).

Le paysage de l'agroalimentaire dans les pays en voie de développement, et particulièrement au Cameroun, est dominé par trois types d'entreprises de transformation (Cerdan et Devautour, 2002) : les industries agroalimentaires du secteur moderne, les petites et moyennes unités spécialisées et l'artisanat urbain et rural. Les deux dernières sont classées dans le secteur informel. Ils se distinguent par : leur taille et nombre d'employés, leurs équipements et opérations de production, la qualité des produits, les investissements consentis et le marché visé (Ogechukwu, 2011; Ogunkoya et Aderoba, 2010).

Les fabricants ne communiquent pas ou n'indiquent pas d'informations importantes sur les performances telles que la consommation d'énergie de leurs broyeurs (Folefack et Abou, 2016). Or, il est judicieux pour les fabricants et meuniers d'évaluer ou de mesurer l'énergie spécifique consommée par leurs équipements en particulier dans les situations de déficit énergétique que connaît le Cameroun. Refaay et El-Sayed, en 2016 notent que le broyage des grains se classe au second rang en terme de consommation d'énergie parmi les procédés de transformation post-récolte car ce procédé consomme environ 70 % de la puissance totale requise pendant la phase de production des aliments dans le secteur de l'industrie de transformation alimentaire. Selon Brennan et Grandison, en 2011; Mohsenin, en 1970, seulement 2,0 à 10 % de l'énergie mécanique fournie à l'équipement par le moteur est effectivement utilisée pour broyer ou fragmenter le produit initial. De plus, la performance des broyeurs dépendent de plusieurs facteurs (Bochat et al., 2015, Muntean et al., 2013) : les facteurs liés à l'équipement (technique utilisée, puissance du moteur et géométrie de l'équipement) ; donc définis par le fabricant qui réalise l'équipement, soit aux propriétés du grain à broyer, c'est à dire sa forme, le taux d'humidité (Sujit Kumar et al., 2013 ; Mani et al., 2004 ; Yu et al., 2003), ou soit aux conditions de fonctionnement (taille des tamis, débit d'alimentation) (Naik et Chaudhuri, 2015).

L'objectif de notre étude est d'identifier l'équipement le plus utilisé dans la production des farines à partir des grains de maïs et d'en évaluer l'énergie spécifique consommée. Pour y parvenir, nous allons identifier les types de broyeurs d'aliments utilisés au Cameroun pour en déduire le type le plus utilisé et d'en ressortir ses caractéristiques, et enfin d'évaluer l'énergie spécifique consommée au cours du broyage du maïs.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Enquêtes sur le terrain

L'étude est réalisée au Cameroun, principalement dans les villes de Douala, Yaoundé, Bafoussam et Ngaoundéré. Dans ces villes, les céréales constituent la base de l'alimentation des populations et entrent en grande partie dans la composition de l'aliment de volailles, ce qui justifie l'importance des unités de transformations dans ces villes à fort potentiel d'élevage. Les enquêtes ont été menées auprès des fabricants d'équipements ou équipementiers et auprès des utilisateurs (meuniers et producteurs de provende).

2.1.1. Collecte de données

Les données ont été collectées à l'aide d'un questionnaire d'enquête adressé aux utilisateurs et fabricants d'équipements. La figure 1 ci-dessous présente la démarche d'élaboration de notre questionnaire.

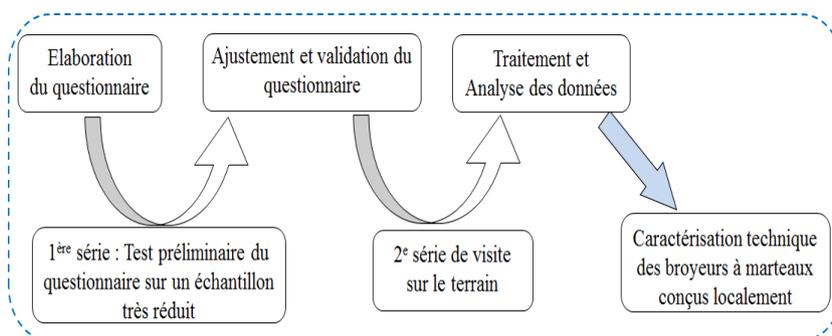


Figure 1 : Démarche méthodologique de l'enquête

Au total, deux cents questionnaires ont été envoyés aux répondants et cent cinquante-sept questionnaires (trente-huit des fabricants locaux et cent dix-neuf des meuniers et de minotiers) ont été retournés pour analyse. Les tableaux 1 et 2 présente la répartition géographique des enquêtés et le type d'entreprises de ceux – ci.

Tableau 1 : Nombre et répartition géographique des Fabricants enquêtés

Villes	Artisans	F - PMU	F - ISM	Total
Douala	9	8	3	20
Ngaoundéré	5	5	2	12
Yaoundé	3	1	2	6
Total	17	14	7	38

F-PMU : Petites et Moyennes Unités des fabricants, F-ISM : Industries du Secteur Moderne des fabricants

Tableau 2 : Nombre et répartition géographique des utilisateurs (proviendiers) enquêtés

Villes	Particuliers	U - PMU	U - ISM	Total
Bafoussam	16	7	2	25
Douala	28	12	3	43
Ngaoundéré	24	7	2	33
Yaoundé	12	4	2	18
Total	80	30	9	119

U-PMU : Petites et Moyennes Unités des utilisateurs, F-ISM : Industries du Secteur Moderne des utilisateurs

2.1.2. Méthode d'analyse des données

L'analyse des données a été effectuée à l'aide des statistiques descriptives. La corrélation entre la nature de l'utilisateur et l'origine de son équipement a été déterminée à un niveau de signification de 5 %.

2.2 Matériel pour l'expérimentation

2.2.1. Broyeur à marteaux

Un broyeur à marteaux testé est fabriqué dans un atelier de Ngaoundéré par un artisan. Il est muni d'un rotor portant 16 marteaux et un tamis. Le diamètre de la pointe du marteau est de 470 mm et la largeur du broyeur est de 70 mm. Les marteaux sont rectangulaires d'une largeur de 43 mm et d'une longueur de 150 mm.

Les spécifications du broyeur à marteaux utilisé pour l'expérimentation sont énumérées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques du broyeur à marteaux fabriqué localement

Fabrication		locale
Age		3 mois
Fréquence d'utilisation		Faible
Capacité		1000 kg/h
Marteaux	Nombre par ligne	4
	Ligne	4
	Forme	Plat
	Dimensions (mm)	ép x 50 x 120
Tamis	Masse (kg)	250 g
	Maille (mm)	2 – 4 – 6 – 8 mm
	Source	Électrique
Énergie	Puissance	7,5 kW
	Transmission	Système poulies courroie
	Rotation du moteur	3 000 tr/mn
Chambre de broyage	Forme	Circulaire
	Largeur (mm)	250 mm
	Diamètre intérieur	600 mm
Espacement entre marteaux et tamis		Entre 3 à 4 mm
Diamètre du rotor (mm)		390 (extrémité des marteaux)

2.2.2. Matériel végétal

le maïs blanc, variété composite « Shaba » (fig.2) a été sélectionnée avec une teneur en humidité de 13 ± 1 %. Les impuretés telles que les bandes de plastique, les pierres, la paille de maïs et le métal ont été éliminées du lot de maïs par tamisage à travers un treillis métallique de 6,3 mm avec une ventilation naturelle par flux d'air, et retirées manuellement.



Figure 2 : Maïs blanc de variété « Shaba »

2.2.3. Équipement de mesure :

Le maïs a été pesé en utilisant une balance numérique électronique à 0,01 g près. Un humidimètre a été utilisé pour vérifier le taux d'humidité des céréales avant le broyage. Le chronomètre numérique a été utilisé pour l'enregistrement du temps broyage.

2.3. Méthode expérimentale

La figure 4 présente la démarche adoptée pour réaliser les expériences permettant d'évaluer l'influence de certains paramètres de fonctionnement sur l'énergie spécifique consommée par un broyeur à marteaux de fabrication locale lors du broyage du maïs.

Les variables qui ont été contrôlées sont : vitesse de rotation du rotor (1500, 2000, 2500 et 3000 tr/min), épaisseur du marteau (4, 5 et 6 mm) et la maille ou ouverture de tamis (2, 4, 6 et 8 mm).

Le processus de broyage a été effectué pour des échantillons de grains de maïs d'une masse de 4 kg qui ont été introduits dans le broyeur à marteaux fabriqué localement, et ont été broyés pendant 4 min ; (Probst et al., 2013) ont déclaré que le temps de broyage de 4 min donnait des performances optimales avec un débit plus élevé. Les traitements expérimentaux ont été analysés en utilisant le plan randomisé complet (CRD), avec trois répétitions pour un total de 48 x 3 essais.

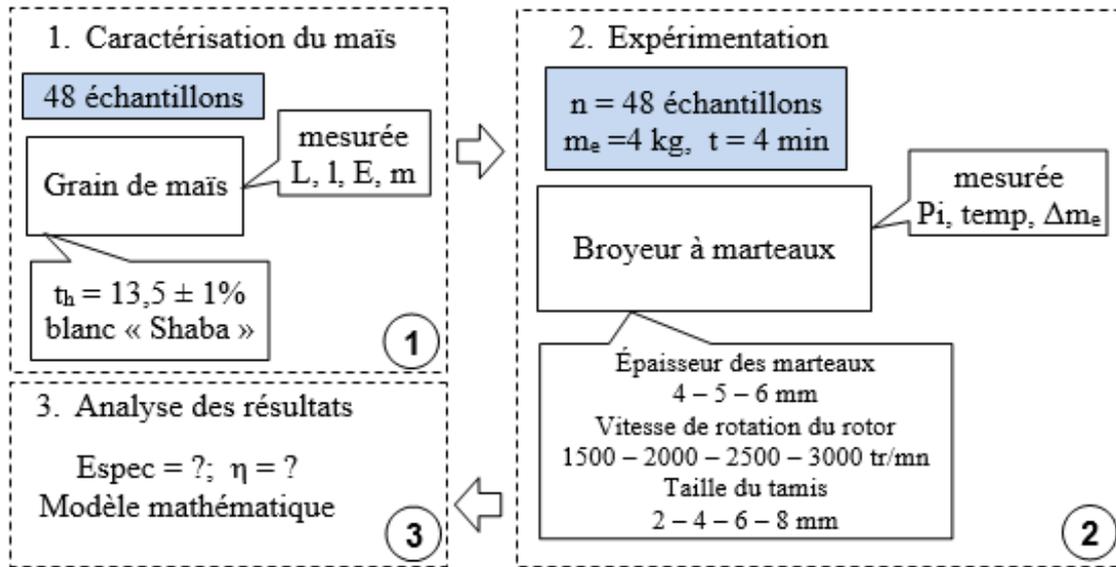


Figure 4 : Approche méthodologique adoptée

Énergie spécifique consommée (kWh/t) : La puissance du broyeur est mesurée pendant l'expérience en utilisant un wattmètre. L'énergie spécifique consommée exprimée en kWh/t, est calculée en utilisant l'équation 1.

$$E_{spec} = \frac{(P - P_0) \times t}{M} \quad (1)$$

où P : Puissance à charge du broyeur (kW), P₀ : Puissance mesurée à vide (kW), t : temps de broyage égal à 4 min et M : masse de maïs grain égale à 4 kg.

L'effet de trois variables indépendantes X₁ (EM - épaisseur du marteau), X₂ (TT - taille du tamis) et X₃ (VR - vitesse de rotation) à quatre et trois niveaux sur la consommation énergétique a été étudié ainsi que les interactions. Le modèle linéaire a été ajusté aux données pour obtenir l'équation de régression de l'énergie spécifique consommée, décrite à l'équation (6) ci – dessous (Mugabi et al., 2019 ; Ibrahim et al., 2019).

$$E_{spec} = b_0 + \sum_{n=1}^3 b_n X_n + \sum_{n \leq m}^3 b_{nm} X_n X_m \quad (2)$$

où E_{spec} est la réponse ou l'énergie spécifique consommée, b₀ est la valeur de la réponse à l'interception avec l'axe vertical ; X_n (n = 1, 2, 3) les variables ou facteurs ; b_n et b_{nm} sont les coefficients linéaires. Le niveau de signification utilisé était p < 0,05. Une signification statistique des termes dans les équations de régression a également été examinée.

Le programme EXCEL est utilisé pour réaliser les calculs et XLSTAT a été utilisé pour l'analyse statistique des données collectées.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats des enquêtes

Le tableau 4 présente les différents types de broyeurs rencontrés chez les fabricants. Trois types de broyeurs ont été identifiés : les broyeurs à marteaux, à disques et les broyeurs mélangeurs. Nous avons recensé 24 broyeurs chez les artisans (20 à marteaux et 4 à disques), 24 broyeurs chez F-PMU (16 à marteaux, 7 à disques et 1 broyeur – mélangeur) et 23 broyeurs chez F-ISM (14 à marteaux, 6 à disques et 3 broyeurs – mélangeurs).

Tableau 4 : Types d'équipements de broyage conçus par les fabricants

Broyeurs	Artisans	F - PMU	F - ISM	Total
à marteaux	20	16	14	50
à disques	4	7	6	17
mélangeurs	0	1	3	4
Total	24	24	23	71

Le tableau 5 présente les différents types de broyeurs rencontrés chez les utilisateurs en fonction de leur origine. Quatre types de broyeurs ont été identifiés : les broyeurs à marteaux, à disques, à cylindres et les broyeurs mélangeurs. Nous avons recensé 103 broyeurs chez les particuliers, avec 85 broyeurs à marteaux de fabrication locale ; 87 broyeurs chez U-PMU, avec 71 broyeurs à marteaux de fabrication locale et 40 broyeurs chez F-ISM avec 20 broyeurs à marteaux de fabrication locale.

Tableau 5 : Type de broyeurs rencontrés chez les utilisateurs en fonction de l'origine

Broyeurs	Origine	Particuliers	U - PMU	U - ISM	Total
à marteaux	Local	85	71	20	176
	Importé	0	4	7	11
à disques	Local	18	7	2	27
	Importé	/	/	/	0
à cylindres	Local	/	/	/	0
	Importé	/	/	8	8
mélangeurs	Local	/	5	3	8
	Importé	/	/	/	0
Total		103	87	40	230

Au cours des enquêtes, nous nous sommes intéressés à la destination des broyeurs recensés chez les fabricants ; ainsi, sur les 20 broyeurs à marteaux fabriqués par les artisans, 60 % sont à destination des particuliers, 30 % chez les U-PMU et 10 % chez les U-ISM. Cette catégorie de fabricants produit des équipements en destination des utilisateurs particuliers ou des petites et moyennes unités. Sur les 16 broyeurs à marteaux fabriqués par les F-PMU ; 25 % sont à destination des particuliers, 43,75 % chez les U-PMU et 31,25 % chez les U-ISM. Sur les 14 broyeurs à marteaux fabriqués par les F-ISM ; 0 % sont à destination des particuliers, 35,71 % chez les U-PMU et 64,29 % chez les U-ISM.

De même, on s'est intéressé à la catégorie des fabricants produisant des broyeurs à marteaux en destination des utilisateurs. Ainsi, Sur les 85 broyeurs à marteaux de fabrication locale rencontrés chez les particuliers, 54 sont fabriqués par des artisans, et le reste par les U - PMU. Sur les 71 broyeurs à marteaux de fabrication locale rencontrés chez les U - PMU, 24 sont fabriqués par des artisans, 30 sont fabriqués par les F-PMU et le reste, soit 17, par les F - ISM. Sur les 20 broyeurs à marteaux de fabrication locale rencontrés chez les U - ISM, 8 sont fabriqués par les F - PMU et le reste, soit 12 par les F - ISM. Et de manière générale, sur les 176 broyeurs à marteaux de fabrication locale rencontrés chez les particuliers, 139 sont fabriqués par des fabricants de la classe '*artisans*' ne disposant pas des moyens de production.

De ce qui précède, il en ressort que les moulins ou broyeurs à marteaux sont les plus utilisés pour le fractionnement des grains de maïs ; ces données sont conformes avec ceux de Basiouny et El – yamani en 2016, Bitra et al. en 2009, qui stipulent que les broyeurs à marteaux sont les plus utilisés dans le broyage des céréales en raison de leur capacité à broyer finement une plus grande variété de matériaux que tout autre moulin.

Caractérisation technique des broyeurs à marteaux de fabrication locale : Il ressort aussi de cette enquête que plusieurs formes de broyeurs à marteaux sont fabriquées. Nous les avons classés en trois groupes suivant des critères de classification présentée dans le tableau 6.

Tableau 6 : Classe des broyeurs à marteaux locaux.

Critères de classification	Moulins	Broyeurs moyens	Gros broyeurs
Capacité	< 100 kg/h	100 kg/h - 1000 kg/h	≥ 1000 kg/h
Marteaux			
Nombre par ligne	2	4	4
Lignes	1	1 - 2	≥ 3
Forme		Plat	
Maille des tamis (mm)	0,7 – 2	3 – 10	8 – 16
Énergie			
Source		Électrique - Diesel	
Puissance	≤ 3,5 kW	3 - 7 kW	≥ 7 kW
Transmission	Directe ou indirect par poulies - courroie		
Vitesse de rotation du moteur (tr/mn)	1500 - 2500	1750 - 3000	≥ 2500
Forme chambre de broyage		Circulaire	
Domaine d'utilisation	Alimentation humaine	Alimentation humaine - Provenderie	Alimentation humaine - Provenderie

La figure 5 présente en images ces différents types de broyeurs et moulins. La grande différence entre le broyeur moyen et le gros broyeur se trouve au niveau du nombre de marteaux et de la capacité des différentes machines.



Figure 5 : Modèles de broyeur à marteaux fabriqués localement (a) moulins, b) broyeurs moyens, c) gros broyeurs).

3.2 Énergie spécifique consommée

Les tableaux 7, 8 et 9 montrent les valeurs de l'énergie spécifique consommée par le broyeur pour broyer le maïs.

Tableau 7 : Énergie spécifique consommée d'épaisseur du marteau 4 mm

Maille du tamis (mm)	Vitesse de rotation (tr/mn)			
	1500	2000	2500	3000
2	7,760	7,160	6,550	6,193
	7,840	7,240	6,780	5,993
	7,570	6,970	6,740	6,118
Moyenne	7,713 ± 0,127	7,123 ± 0,139	6,690 ± 0,123	6,101 ± 0,101
4	6,400	6,060	5,588	5,110
	6,610	5,845	5,378	4,893
	6,690	6,030	5,505	5,018
Moyenne	6,567 ± 0,150	5,978 ± 0,116	5,490 ± 0,106	5,007 ± 0,109
6	5,159	4,770	4,232	3,978
	5,133	4,540	4,332	3,748
	4,954	4,640	4,067	3,583
	5,082 ± 0,112	4,650 ± 0,115	4,210 ± 0,134	3,709 ± 0,113
8	5,045	4,500	4,013	3,555
	4,845	4,590	3,963	3,571
	4,960	4,380	4,088	3,405
Moyenne	4,950 ± 0,10	4,490 ± 0,105	4,021 ± 0,063	3,511 ± 0,091

Tableau 8 : Énergie spécifique consommé d'épaisseur du marteau 5 mm

Maille du tamis (mm)	Vitesse de rotation (tr/mn)			
	1500	2000	2500	3000
2	7,786	7,263	6,765	6,287
	7,945	7,353	6,879	6,397
	7,691	7,103	6,985	6,457
Moyenne	7,807 ± 0,128	7,240 ± 0,127	6,876 ± 0,11	6,380 ± 0,086
4	6,709	6,069	5,774	5,343
	6,618	6,073	5,852	5,056
	6,833	6,349	5,657	5,198
Moyenne	6,720 ± 0,108	6,164 ± 0,161	5,761 ± 0,098	5,199 ± 0,144
6	5,555	5,193	4,690	3,981
	5,275	4,923	4,845	4,045
	5,432	5,065	4,920	4,176
	5,421 ± 0,140	5,060 ± 0,135	4,820 ± 0,118	4,066 ± 0,097
8	5,228	4,773	4,895	3,879
	5,238	4,898	4,845	4,094
	5,048	4,959	4,660	4,035
Moyenne	5,171 ± 0,107	4,876 ± 0,095	4,8 ± 0,124	4,003 ± 0,111

Tableau 9 : Énergie spécifique consommé d'épaisseur du marteau 6 mm

Maille du tamis (mm)	Vitesse de rotation (tr/mn)			
	1500	2000	2500	3000
2	8,650	7,950	7,760	7,296
	8,420	7,850	7,830	7,126
	8,530	8,080	7,620	7,356
Moyenne	8,533 ± 0,115	7,960 ± 0,115	7,737 ± 0,107	7,259 ± 0,119
4	7,105	6,495	5,788	5,487
	6,845	6,280	5,942	5,308
	6,985	6,450	6,030	5,506
Moyenne	6,978 ± 0,13	6,408 ± 0,113	5,920 ± 0,123	5,434 ± 0,109
6	5,725	5,181	4,920	4,273
	5,647	5,001	4,690	4,013
	5,460	5,180	4,850	4,163
	5,611 ± 0,136	5,121 ± 0,104	4,853 ± 0,118	4,150 ± 0,131
8	5,487	5,148	4,854	3,971
	5,595	4,933	4,899	4,146
	5,330	5,105	4,684	4,106
Moyenne	5,471 ± 0,133	5,062 ± 0,114	4,813 ± 0,113	4,075 ± 0,092

Le broyage avec la plus petite taille de tamis (2 mm) installé dans le broyeur à marteaux a consommé les plus fortes énergies spécifiques, peu importe l'épaisseur du marteau et la vitesse de rotation. Le marteau avec la plus grande épaisseur (6 mm) et la vitesse de rotation de 1500 tr/min a donc conduit à une forte consommation d'énergie spécifique de moyenne $8,533 \pm 0,115$ kWh/t.

Il a également été noté qu'avec la plus grande taille du tamis (8 mm), la plus grande épaisseur de marteau (6 mm) et la plus grande vitesse de rotation (3000 tr/min) étaient responsables de la consommation d'énergie spécifique la plus élevée. Le diamètre du trou de tamis de 2 mm n'a pas montré de différence significative de consommation d'énergie aux trois niveaux de vitesse de pointe utilisés.

L'augmentation de la vitesse entraîne une diminution de l'énergie spécifique quel que soit le traitement fait avec les autres facteurs (TT et EM). Le maximum de l'énergie spécifique consommée (8,533 kWh/t) est obtenu pour les conditions suivantes : 1500 tr/mn de vitesse de rotation, 2 mm de taille du tamis et 6,0 mm comme épaisseur du marteau.

En analysant les données des tableaux 7, 8 et 9, nous pouvons voir que lors du broyage avec des marteaux de petite épaisseur (4 mm), la consommation d'énergie de broyage est plus moins importante que pour le broyage du maïs avec des marteaux d'épaisseur plus important.

La taille du tamis (TT), l'épaisseur du marteau (EM), et la vitesse de rotation (VR) ont un effet significatif sur l'énergie spécifique consommée. L'interaction de $EM \times TT$ a des effets significatifs acceptables sur la consommation d'énergie.

Tableau 10 : Analyse de la variance de l'énergie spécifique consommée

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t
Constante	8,442	0,947	8,914	<0,0001
VR	-0,001	0,000	-3,231	0,002
EM	0,360	0,179	2,018	0,046
TT	-0,383	0,102	-3,735	0,000
EM x TT	-0,024	0,017	-1,403	0,163

Le modèle mathématique de l'énergie spécifique est présenté à l'équation (7) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,92$, ce qui suggère que le modèle mathématique explique à 92,20 % les valeurs déterminées expérimentalement.

$$E_{Spec} = 8,442 - 0,0012 \times VR + 0,3605 \times EM - 0,3825 \times TT - 0,0238 \times EM \times TT \quad (7)$$

Mugabi et al., 2019 en Ouganda et Ibrahim et al., 2019 en Égypte ont montré que l'énergie spécifique consommée par un broyeur à marteaux diminue avec l'augmentation de la taille des tamis et la vitesse circonférentielle des marteaux. Ces résultats montrent que le broyeur à marteaux fabriqué au Cameroun par les artisans locaux est au même niveau de consommation énergétique que les broyeurs à marteaux fabriqués dans les pays d'Afrique

4. CONCLUSION

Notre étude s'est articulée autour de deux éléments : le premier élément était l'identification des broyeurs utilisés pour la transformation des céréales en farine et une enquête a été réalisée afin de palier à l'absence des données sur les équipements de broyage utilisés. Le deuxième élément était l'évaluation de l'énergie spécifique consommée lors du broyage des grains de maïs par un broyeur à 16 marteaux de fabrication locale ; les effets des variables, vitesse de rotation, épaisseur des marteaux et taille du tamis, ont été testés sur l'énergie spécifique à partir d'un plan d'expérience de type factoriel complet.

Les résultats des enquêtes auprès des fabricants et des utilisateurs de ces équipements montrent que 88,26 % des équipements recensés chez les utilisateurs sont de fabrication locale. Et ces machines sont à 50,74 % fabriquées par les petits artisans contre 10,84 % par les grandes industries. Ces enquêtes ont révélé que 86,70 % de ces équipements de fabrication locale sont des broyeurs à marteaux. Ces broyeurs à marteaux sont classés en trois familles : les moulins constitués de deux marteaux, des broyeurs moyens disposant de 4 à 16 marteaux et des gros broyeurs possédant au moins 20 marteaux.

Il ressort aussi que l'énergie spécifique consommée par un broyeur à marteaux de fabrication locale disposant d'un rotor muni de 16 marteaux est fonction de la taille du tamis (TT), l'épaisseur du marteau (EM), et la vitesse de rotation (VR) ; ces dernières ont un effet significatif sur l'énergie spécifique consommée. Mais ces effets sont inverses : pendant que la vitesse de rotation et la taille des tamis diminuent l'énergie spécifique consommée, l'épaisseur des marteaux quant à lui augmente cette énergie.

5. DÉCLARATION DE NON CONFLITS D'INTÉRÊTS

Les auteurs certifient qu'il n'y a pas de conflits d'intérêt en relation avec le présent travail.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Basiouny M.A. and A.E. El-Yamani, 2016. Performance evaluation of two different hammer mills for grinding corn cobs. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, **7** (1) 77–87.
- Bitra V.S.P., Womac A.R., Chevanan N., Mui P.I., Igathinathane C., Sokhansanj S., Smith, 2009. D.R. Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions. *Powder Tech.*, **193**, 32–45.
- Bochat A., Wesolowski L., Zastempowski M., 2015. A comparative study of new and traditional designs of a hammer mill. *Transactions of the ASABE*, **58**, 585–596.
- Brennan J.G., Grandison A.S. Mixing 2011. Emulsification, and Size Reduction. Food Processing Handbook. Wiley-VCH, Weinheim, 363–406.
- Bricas N., 2012. Forces et faiblesses des filières agro-alimentaires en Afrique. *Marchés Tropicaux et Méditerranéens*, **32**, 27–28.
- Cerdan C., Devautour H., 2012. Entreprises agroalimentaires urbaines et valorisation des produits vivriers au Nord-Cameroun, Eléments d'une stratégie de développement rural pour le Grand Nord du Cameroun : II - Notes thématiques. Ministère de l'agriculture du Cameroun, Yaoundé.
- Sujit Kumar Dey, Shobhana Dey, Avimanyu Das, 2013. Comminution features in an impact hammer mill. *Powder Technology*, **235**, 914–920.
- Fofiri Nzossié E.J., Temple L., Ndjouenkeu R., 2015. La contribution de la recherche universitaire à la formation d'un système sectoriel d'innovation agro-alimentaire au Cameroun. *Innovations* **47**, 55–77.
- Folefack D.P., Abou S., 2016. Contribution à l'économie locale des micro-entreprises de transformation des céréales dans la ville de Maroua, Cameroun. *Tropicultura* **34**, 186–192.
- Ibrahim M. M., Omran M. S., Abd Elrhman E. N., 2019. Design and evaluation of crushing hammer mill. *Misr. J. Ag. Eng.* **36**(1) 1 – 24.
- Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S., 2004. Mechanical properties of corn stover grind. *Trans. ASAE* **47**, 1983–1990.
- Marouzé C., Diagne A., Giroux F., 2004. Contribution to the building of an equipment design method in developing countries using an analysis of traditional practices, in Book: *Methods and Tools for Co-Operative and Integrated Design*. (Eds.) Serge Tichkiewitch, Daniel Brissaud. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-1889-4, 57–70.

- Medah I., 2011. Quand l'échange de savoirs se heurte à la reconnaissance. Le cas des concepteurs d'agroéquipements au Burkina Faso. *Revue d'anthropologie des connaissances*, **5**, 599 – 622.
- Mohsenin, N., 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. *Gordon and Breach Science Publishers*.
- Mugabi R., Byaruhanga Y.B., Eskridge K.M., Weller C.L., 2019. Performance evaluation of a hammer mill during grinding of maize grains. *Agric Eng Int*, **21**, 170–179.
- Mugabi R., Eskridge K.M., Weller C.L., 2017. Comparison of experimental designs used to study variables during hammer milling of corn bran. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **60**, 537–544.
- Muntean M.V., Marian O., Ranta O., Drocas I., Catunescu G.M., 2013. The influence of hammer type used in grinding mills on grist fineness. *Bulletin UASVM Food Science and Technology*, **70**, 53–57.
- Naik S., Chaudhuri B., 2015. Quantifying Dry Milling in Pharmaceutical Processing: A Review on Experimental and Modeling Approaches. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, **104**, 2401–2413.
- Ogechukwu A.D., 2011. The Role of Small-Scale Industry in National Development in Nigeria. *Universal Journal of Management and Social Sciences*, **1**, 3–41.
- Ogunkoya A.K., Aderoba A.A., 2010. A Model for Process Optimization of Small-Scale Industry for Competitive Production. *The Pacific Journal of Science and Technology*, **11**, 366–375.
- Probst K.V., Kingsly A.R.P., Pinto R.L., Bali R., Krishnakumar P., Ileleji K.E, 2013. The Effect of Moisture Content on the Grinding Performance of Corn and Corncobs by Hammermilling. *Trans. of the ASABE*, **56**, 1025–1033.
- Refaay M.M., El-Sayed A.S., 2016. Developing a hammer mill for grinding seashells. *J. Soil Sci. and Agric. Eng.*, **7**, 801–808.
- Yu M., Womac A.R., Pordesimo L.O., 2003. Review of Biomass Size Reduction Technology. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.