

Étude d'un concasseur : caractéristiques physiques et mécaniques des amandes de karité du Burkina

Siédouba Georges YE¹, Gouyahali SON¹,
Frédéric LEBEAU², Marie-France DESTAIN²

Résumé

Le concassage des amandes, la fragilisation des broyats et/ou leur mouture sont les opérations de l'extraction du beurre de karité. Le concassage manuel est pénible. Sa mécanisation optimale nécessite la connaissance des caractéristiques mécaniques (force de rupture, raideur, l'élasticité etc.). Considérant la classe, la densité et la vitesse, la vitesse de 100 mm/min offre une force de rupture minimale. A cette vitesse, les amandes de haute densité (HD), ont une force moyenne de rupture de 387 ± 34 N contre 189 ± 133 N pour les amandes de basse densité (BD). Les amandes HD demandent plus d'effort à la rupture. L'énergie moyenne de rupture des amandes HD est de 1520 mJ \pm 1944 mJ contre 205 ± 273 mJ pour les amandes BD. Les raideurs sont respectivement de 376 ± 82 N/mm pour les amandes HD et 230 ± 61 N/mm pour les amandes BD. Le module d'élasticité moyen pour les mêmes sous-classes à 100 mm/min est de $1,83 \pm 1,26$ MPa.

Mots-clés : karité, concasseur, force de rupture, raideur, élasticité

Study of a crusher : physical and mechanical characteristics of shea nuts from Burkina

Abstract

For any method used in shea butter extracting, dried shea nut are broken, cooked and milled. Breaking nut by nut is the more difficult operation as it is done often handily. Breaking strength, stiffness, elasticity, are the mechanic parameters needed for optimal mechanization the breaking operation. Looking on classes, density and breaking speed, the speed of 100 mm/min yielded the lower breaking strength. At that speed, the breaking strength for high density (HD) nut yielded 387 ± 34 N and 189 ± 133 N for Low Density nut (BD). HD nut need important breaking strength. Average breaking energy for HD nut is 1520 mJ \pm 1944 mJ and 205 ± 273 mJ for BD nut. Stiffness yielded respectively 376 ± 82 N/mm for the HD nut and 230 ± 61 N/mm for the BD nut. Average Elasticity modulus at 100 mm/min is $1,83 \pm 1,26$ MPa

Keywords: shea, crusher, breaking force, stiffness, elasticity

¹ Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique, Département Mécanisation, 03 BP 7047 Ouagadougou 03, Burkina Faso, Tel: 226 50 36 37 86 fax: (226) 50 35 70 29 E-mail : siedgeor@yahoo.fr

² Gembloux Agro Biotech, Unité de Mécanique et Construction. Passage des Déportés 2, B-5030 Gembloux, Belgium. Tel: 32(0)81.62.21.60 fax: 32. (0)81.62.21.67

Intrduction

Le karité (*Vitellaria paradoxa*) est un arbre de la famille des sapotacées d'Afrique (BONKOUNGOU, 1987). Le beurre, extrait des amandes de ses fruits, est utilisé dans les domaines alimentaires, cosmétiques, pharmaceutiques (ANONYME, 2000 ; UNIFEM, 1997 ; YAMÉOGO, 1997). Les fruits collectés de l'arbre subissent des traitements pour obtenir des noix. Les amandes, obtenues par décorticage des noix, subissent un concassage, puis une fragilisation du broyat pour l'extraction du beurre par pressage. Dans le cas du procédé par baratage, le broyat fragilisé subit une mouture pour obtenir une pâte de laquelle est extrait le beurre. Le concassage ou le broyage des amandes, qui est une opération préalable dans les procédés d'extraction du beurre, se révèle être une opération pénible, car elle est restée essentiellement manuelle (OLANIYAN ET OJE, 2002). Elle est réalisée, amande par amande, à l'aide d'un petit pilon et une pierre, dans certaines localités. La pénibilité et la faible productivité nécessitent la mécanisation de cette opération. Des concasseurs et broyeurs existent, mais ils présentent des insuffisances si bien que le concassage manuel est encore très utilisé. Les insuffisances liées aux équipements relèvent, très souvent, de la faible prise en compte des propriétés physiques des produits traités (résistance et demande énergétique à la rupture, etc.) et/ou de l'opérateur (DE LA CIERAVA, 2002 ; GUNASEKARAN ET PAULSEN, 1985; LESAGE, 1993).

Cette étude est une contribution à la détermination de paramètres mécaniques de rupture des amandes en vue du développement d'équipements de broyage ou de concassage plus adaptés.

Matériel et méthodes

En se référant à l'étude sur le concassage des noix de palme (PASSELEGUE, 1927), les principaux paramètres mesurés portent sur la force de rupture, en fonction de la vitesse de compression, de la taille et de la densité de l'amande. Les paramètres comme l'énergie de rupture, l'élasticité, la constante de raideur de l'amande sont déterminés par calcul.

Matériel utilisé

Le matériel d'essai est constitué d'un lot d'amandes séchées de karité, récoltées en 2005. Ces amandes ont été collectées dans le village de Sounougoudjan au nord-est de Bobo-Dioulasso à l'Ouest du Burkina Faso. Favorable à la production du karité, cette région du pays bénéficie d'une pluviométrie annuelle variable entre 800 à 1200 mm.

Echantillonnage des amandes

L'échantillon destiné aux travaux a été obtenu en subdivisant, dans un premier temps, un sac de 80 kg d'amandes en trois zones de prélèvement sur la hauteur. La première zone est à la moitié de la hauteur et les deux autres zones sont situées à 30 cm de part et d'autre du milieu de cette hauteur. Les prélèvements sont effectués à chaque niveau en trois points équidistants sur la circonférence du sac. Dans un deuxième temps, les amandes prélevées sont alors mélangées et étalées dans un carré de 40 cm de côté sur 10 cm de haut. L'échantillon final de travail est réalisé au centre du carré et sur les diagonales à 10 cm du bord.

Caractérisation physique des amandes

Etant donné que les amandes, à l'observation, présentent une grande variabilité, il est paru nécessaire de caractériser notre échantillon. Au regard de la forme ovoïde des amandes (figure1), le poids, le volume et la densité ont permis la caractérisation physique des amandes utilisées.

La mesure des poids, à l'aide de la balance électronique (Sartori us basic) de résolution 0,01 g, a permis de dégager quatre classes d'amandes, avec un pas 0,5 g :

- Très Grosse (TG) : Poids (P) > 3 g ;
- Grosse (G) : $3\text{g} < \text{Poids (P)} \leq 2,5\text{ g}$;
- Petite (P) : $2,5\text{ g} < \text{Poids (P)} \leq 2\text{ g}$;
- Très Petite (TP) : Poids (P) $\leq 1,99\text{ g}$

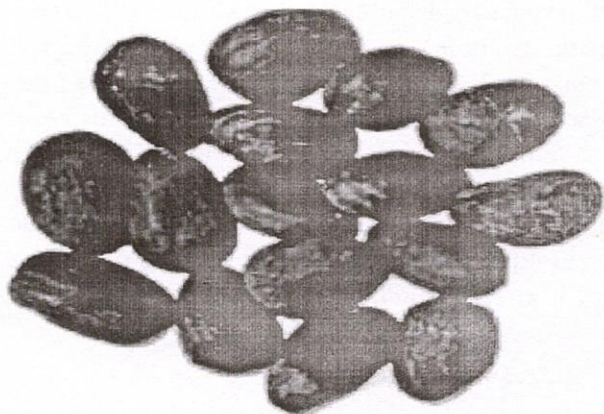


Figure 1. formes des amandes de karité

Dans chacune des classes, le volume des amandes a été déterminé, par plongée de chaque amande dans un berlin rempli d'eau et posé sur une balance de précision 0,01g, tarée à zéro. Le poids de l'eau déplacée permet de déterminer le volume de l'amande. L'amande plongée est aussitôt retirée pour éviter qu'elle soit trop imbibée d'eau. Elle est séchée pour être utilisée dans les essais de compression.

Le calcul de la densité a permis de définir deux sous classes, dans chaque classe. La densité de l'eau étant 1, toute amande dont la densité est supérieure à 1,1 est appelée amande de Haute Densité (HD) et toute amande de densité inférieure à 1 est appelée amande de Basse Densité (BD).

Les amandes de basse densité (BD) seraient les amandes dont le développement a subi des perturbations (insuffisance pluviométrique, mauvaise qualité des sols, etc.) et/ou le cycle n'est pas allé à terme. Selon les régions et d'une année à l'autre, les proportions de ce type d'amandes peuvent évoluer de façon importante. Il importe de connaître le comportement mécanique de ces amandes de basse densité par rapport à celles dites de bonne qualité, c'est dire de haute densité.

Une partie de l'échantillon a été prélevée pour la détermination du taux d'humidité qui s'est fixé à 6 % par rapport à la matière sèche.

Ce taux d'humidité des amandes est déterminé par séchage à l'étuve des broyats à 103°C pendant 4 heures. Après refroidissement et pesage, les broyats d'amandes sont remis dans l'étuve pendant 30 min, ensuite refroidis et pesés. Cet exercice est répété jusqu'à un poids constant des broyats d'amandes. Les pesées ont été faites avec la balance électronique de résolution 0,01 g. Le taux d'humidité est ensuite obtenu par la formule 1 :

$$H\% = \frac{Masse_{humide} - Masse_{sèche}}{Masse_{sèche}} \times 100 \quad (1)$$

Etude de paramètres mécaniques des amandes

Pour la détermination de la force de rupture, l'amande est disposée dans sa position d'équilibre la plus stable sur l'équipement de compression uni-axiale de type Instron 5544, de capacité 2 kN. Cette machine permet d'appliquer une force déterminée sur l'échantillon, via une tête de pression dont le déplacement est contrôlé par un servomoteur, à une vitesse donnée. Des capteurs associés mesurent la force et le déplacement et transmettent les signaux vers un PC (figure 2). Ce dispositif de compression a permis de déterminer la force de rupture maximale (Er_{maxi}) qui est la force maximale atteinte avant la rupture caractérisée par une chute d'au moins 5 % de la force. Les essais de rupture à la compression ont été réalisés avec une amande de chaque classe aux trois vitesses de compressions (10, 100 et 1000 mm/min), suivant la méthode ASAE (OLANIYAN et OJE, 2002).

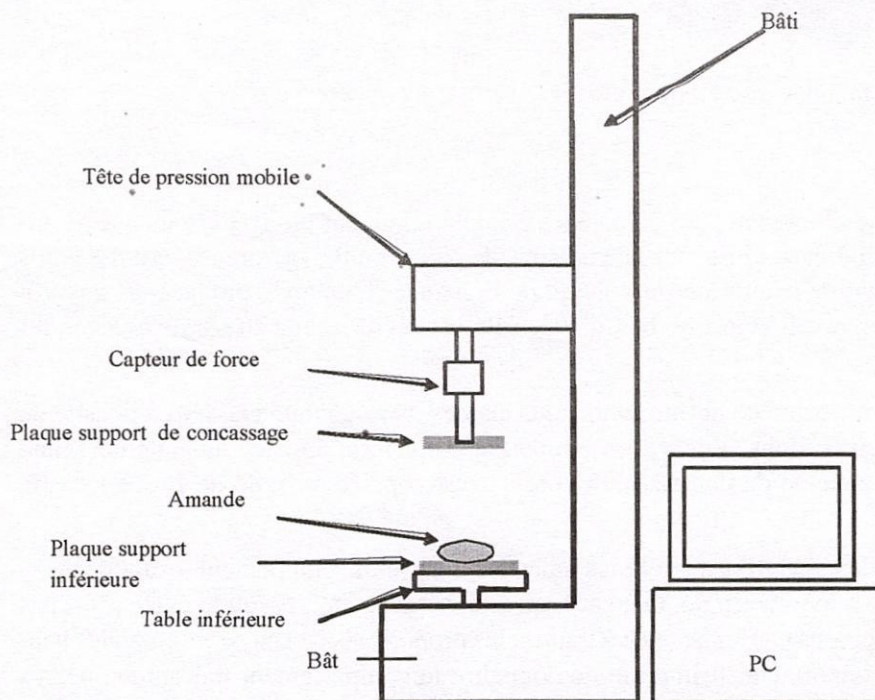


Figure 2. Dispositif de concassage

Le travail de rupture ou énergie de rupture $E_{r_{maxi}}$ au point de rupture est déterminé par calcul, selon la formule 2 :

$$E : \int F dl \quad (2)$$

Où F est la force en N et dl est le déplacement ou déformation en mm .

Le module d'élasticité, E , au point d'inflexion est calculé selon la méthode ASAE (2001).

La raideur k est la dérivée de la force sur le déplacement au point d'inflexion, selon la formule suivante (3) :

$$k = \frac{dF_i}{dl} \quad (3)$$

avec : F_i la force au point d'inflexion et dl un incrément de distance.

Résultats et discussions

Profil des courbes de la force en fonction du déplacement

La figure 3 présente l'ensemble des courbes de la force de compression en fonction du déplacement, aux trois vitesses pour une amande de chacune des sous-classes. Ces courbes montrent que les amandes présentent une grande diversité de comportement à l'écrasement, quelle que soit la vitesse, même si l'allure du profil reste similaire.

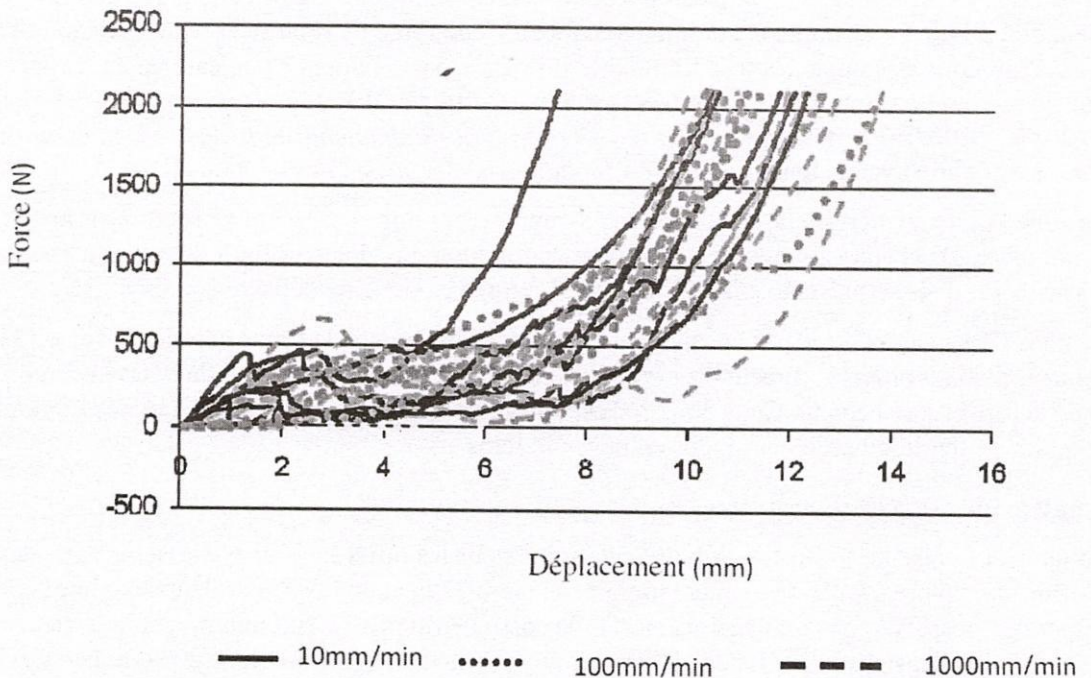


Figure 3. Profil des courbes de concassage

En effet, le profil de la figure 4 présente trois zones distinctes dans leur comportement mécanique : une zone dite élastico-plastique (I), une zone de rupture (II) et une zone d'écrouissage (III).

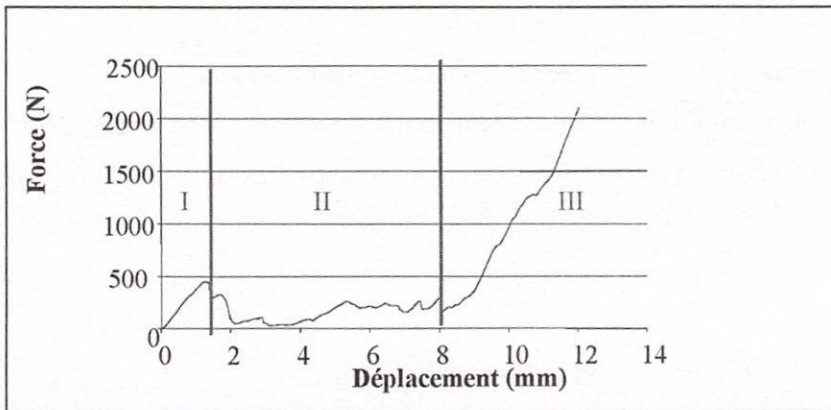


Figure 4. Caractéristique du profil de résistance d'une amande en compression

Ainsi, la zone I est caractérisée par une augmentation de la force en fonction du déplacement selon une relation quasi linéaire. La plage de changement de l'allure de la courbe indique l'amorce de rupture. Cette amorce est effective lorsqu'il se produit une chute de plus de 5 % de la force par rapport aux valeurs antérieures. Cette force est appelée force de rupture maximale (Fr_{maxi}). Cette zone est dite élastico-plastique parce que dans l'évolution de la pression, l'amande traverse sa phase élastique et plastique pour amorcer la rupture. Dans cette plage de changement de l'allure de la courbe est définie la raideur. Cette force de rupture est caractéristique du taux d'humidité des amandes, car l'humidité influence positivement ou négativement les propriétés mécaniques du produit traité (AVIARA *et al.*, 2005 ; OLUWOLE *et al.*, 2007 ; BURUBAI *et al.*, 2008). En faisant varier la teneur en eau du *Ricinodendron heudelotii*, le débit du concasseur varie avec la teneur en eau du produit (TCHIEGANG *et al.*, 2003 et 2005).

La zone II est caractérisée, après la première rupture, par une succession de ruptures issues de la première. Dans cette zone, la relation force en fonction du déplacement n'obéit pas à une loi particulière, mais se présente en dents de scie. La force exercée ne dépasse jamais Fr_{maxi} .

La zone III est caractérisée par une augmentation quasi linéaire de la force en fonction du déplacement. Selon l'amande, on peut observer la présence de traces d'extraction du beurre à la limite de la capacité du capteur. Cette zone correspond au pressage des particules issues des ruptures successives qui libèrent le beurre des cellules oléifères.

Analyse des forces de rupture

Le tableau I présente l'effort de rupture déterminé pour les différentes sous-classes d'amandes. L'effort de rupture a varié de manière importante entre 37 N et 664 N. Ces valeurs extrêmes correspondent respectivement à une amande TP de basse densité BD à 100 mm/min et à une amande G de haute densité à la vitesse de 1000 mm/min. Les travaux de BURUBAI (2008) donnent une force de rupture maximale de 629,6 N pour l'amande Nutmeg africain (*Monodara myristica*) à 8 % d'humidité.

Tableau I. Force de rupture par classe d'amandes et vitesse

<i>Force de rupture, F_{rmax} (N)</i>				
Classe d'amandes		Vitesse mm/min		
Poids	Densité	10	100	1000
TG	HD	434	361	480
G	HD	451	400	664
P	HD	477	430	492
TP	HD	464	359	325
TG	BD	469	350	547
G	BD	168	141	174
P	BD	133	229	419
TP	BD	212	37	169

Cette force de rupture maximale est inférieure à 664N, ce qui veut dire que les amandes de karité nécessitent un effort plus important que celles du Nutmeg africain; ce qui voudra dire que le concasseur d'amandes de karité pourrait servir à concasser aussi les amandes de *monodara myristica*. La force de rupture moyenne des amandes est de $349 \text{ N} \pm 152 \text{ N}$. L'écart-type de 152 N est très élevé et indique la forte variabilité entre les amandes ($CV=43 \%$), indépendamment des vitesses et des sous-classes. Indépendamment des vitesses, les amandes HD ont donné en moyenne $425 \pm 60 \text{ N}$ pour les amandes TG ; $505 \pm 140 \text{ N}$ pour les amandes G ; $466 \pm 32 \text{ N}$ pour les amandes P et $383 \pm 72 \text{ N}$ pour les amandes TP ; avec une moyenne générale pour les amandes HD de $445 \pm 87 \text{ N}$. Les amandes de BD ont présenté respectivement $455 \pm 99 \text{ N}$ pour les amandes TG ; $161 \pm 17 \text{ N}$ pour les amandes G ; $260 \pm 146 \text{ N}$ pour les amandes P et $139 \pm 91 \text{ N}$ pour les amandes TP donnant une moyenne de $254 \pm 156 \text{ N}$. La variabilité étant importante entre les différentes sous-classes d'amandes, il faut examiner l'effet de la vitesse sur la force de rupture pour mieux circonscrire le champ d'étude.

Effet de la vitesse sur la force de rupture

La figure 5 présente l'effet de la vitesse de descente de la tête de compression sur la valeur moyenne de la force de rupture. On observe que la vitesse n'a qu'un effet négligeable au regard des écart-types très larges mais faible d'une amande à une autres par rapport aux valeurs moyennes. Toutefois, à la vitesse de 100mm/min, les forces de rupture sont plus faibles quelle que soit la sous- classe d'amandes. A cette vitesse, l'effort moyen de rupture, pour toutes les sous-classes, est de $288 \pm 139 \text{ N}$. Par contre cette force moyenne de rupture est de $387 \pm 34 \text{ N}$ pour les amandes HD et de $189 \pm 133 \text{ N}$ pour les amandes BD. A cette vitesse, l'effort moyen de rupture, pour toutes les sous- classes, est de $288 \pm 139 \text{ N}$. Par contre cette force moyenne de rupture est de $387 \pm 34 \text{ N}$ pour les amandes HD et de $189 \pm 133 \text{ N}$ pour les amandes BD. Il apparaît que les amandes HD qui présentent la meilleure qualité pour l'extraction du beurre, demandent plus d'effort à la rupture. Les forces moyennes de rupture des amandes G et des amandes P de HD sont respectivement $381 \pm 28 \text{ N}$ et $394 \pm 50 \text{ N}$.

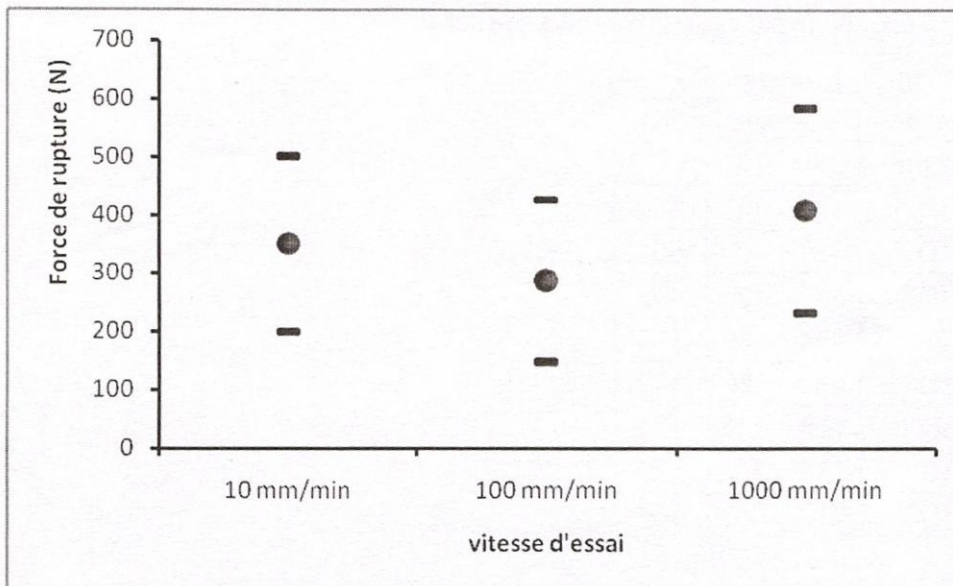


Figure 5. Effet de la vitesse sur la force de rupture

Etant donné que sur le terrain, les amandes G et P sont en des proportions variables avec une dominance des amandes G selon la zone écologique et la pluviométrie, la référence de la force moyenne de rupture pour le dimensionnement serait celle des amandes G de haute densité, correspondant aux amandes de bonne qualité et ayant une force de rupture plus faible. Dans cette hypothèse la demande énergétique est réduite. Toutefois, les amandes P auront un temps de séjour plus élevé dans le concasseur, les amandes des autres sous classes devant être brisées plus rapidement.

Analyse de l'énergie de rupture

Le tableau II qui présente l'énergie de rupture déterminée pour les différentes amandes, montre que l'on retrouve les mêmes tendances que pour la force de rupture mais amplifiées. L'énergie de rupture a varié de plus de deux ordres de grandeur entre 13 mJ et 1077 mJ. Ces valeurs extrêmes correspondent, comme pour la force de rupture, respectivement à une amande TP de basse densité et à une amande TP de haute densité. L'ensemble des amandes a nécessité en moyenne 651 mJ pour être brisées. L'écart-type général de 798 mJ indique la présence d'une très forte variabilité de la demande énergétique de rupture (CV = 134 %). Pour la vitesse de 100 mm/min, les amandes HD montrent une moyenne de 1520 ± 1944 mJ contre 205 ± 273 mJ pour les amandes BD. Cette dernière valeur étant inférieure à la moyenne pour les amandes de haute densité, la valeur moyenne d'énergie de rupture de 1520 mJ sera notre valeur de dimensionnement. Les amandes G de HD choisie pour le dimensionnement présentent une énergie de rupture de 610 ± 299 mJ qui reste inférieure à celle des HD. Les amandes ayant une plus grande demande énergétique séjourneront plus longtemps dans la chambre de broyage. Les valeurs moyennes d'énergie de rupture pour les amandes de haute densité sont décroissantes de l'amande TG à l'amande TP et présentent 1903 ± 2199 mJ pour les TG ; 610 ± 299 mJ pour les G ; 674 ± 186 pour les P et 73 ± 28 mJ pour les amandes TP indépendamment des vitesses.

Tableau II. Energie de rupture par classe d'amandes et par vitesse

<i>Force de rupture, F_{rmax} (N)</i>				
Classe d'amandes		Vitesse mm/min		
Poids	Densité	10	100	1000
TG	HD	434	361	480
G	HD	451	400	664
P	HD	477	430	492
TP	HD	464	359	325
TG	BD	469	350	547
G	BD	168	141	174
P	BD	133	229	419
TP	BD	212	37	169

L'amande projetée par les extrémités des marteaux sur la paroi interne de la cage la fait exploser en morceaux. La détermination de l'énergie de rupture dans le dimensionnement est fonction de la distance entre les marteaux et les parois internes de la cage de concassage, de l'énergie cinétique de l'amande projetée sur la paroi et de son taux d'humidité. La détermination du jeu entre l'extrémité du marteau et la paroi de la cage fait intervenir la formule de l'énergie cinétique et celle de l'énergie de rupture connue (1520mJ).

Détermination de la raideur des amandes de karité de l'échantillon

La raideur k est fonction de l'effort au point d'inflexion de la courbe de la zone I qui est considéré comme le point où l'élasticité est à son maximum.

Elle est déterminée pour une valeur de force inférieure à celle de la rupture, dans la limite entre la partie élastique et plastique. Le tableau III présente les valeurs de la raideur pour les différentes amandes. La raideur a varié entre 129 N/mm et 485 N/mm pour l'échantillon soumis au test. Ces valeurs extrêmes correspondent respectivement à une très petite amande de haute densité et à une grosse amande de haute densité. Les amandes présentent dans l'ensemble, une raideur moyenne de 293 ± 108 N/mm montrant la présence d'une variabilité de ce paramètre (CV = 33%). La raideur est liée au taux d'humidité de l'amande : plus l'humidité est faible plus la raideur est faible et meilleures sont les conditions de concassage (TCHIEGANG, 2003).

Tableau III. Raideur par classe d'amandes et vitesse

<i>Raideur, k (N/mm)</i>				
Classe d'amandes		Vitesse mm/min		
Poids	Densité	10	100	1000
TG	HD	430	356	396
G	HD	451	376	465
P	HD	253	485	217
TP	HD	381	287	129
TG	BD	242	276	254
G	BD	246	288	212
P	BD	196	186	326
TP	BD	245	170	168

La vitesse de 100mm/min choisie ne montre pas une raideur inférieure à celle des vitesses de 10 et 1000mm/min (figure 6).

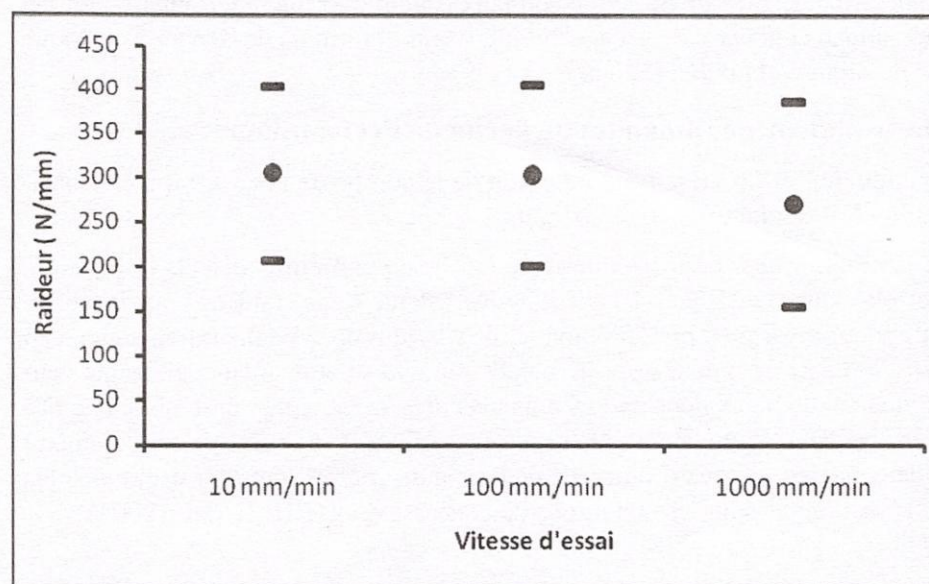


Figure 6. Effet de la vitesse sur la raideur

Par contre, l'effet de la densité sur la raideur présenté à la figure 7 laisse observer que les amandes de haute densité sont en moyenne plus raides que les basses densités et présentent une plus grande variabilité de la raideur. Il serait utile de faire varier le taux d'humidité pour observer son impact sur l'énergie de concassage et sur la raideur.

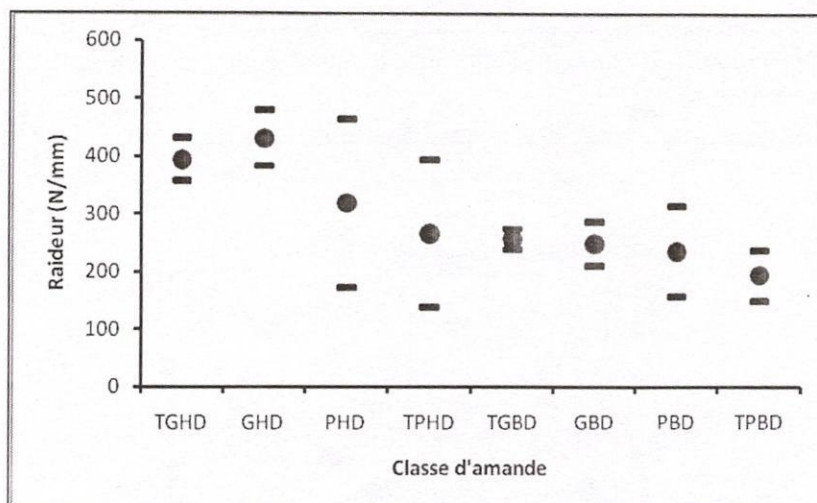


Figure 7. Effet de la classe d'amande sur la raideur

Module d'élasticité

Pour le concasseur, ce paramètre exprime la rigidité de l'amande au concassage autrement dit la facilité avec laquelle elle sera cassée. Il tient compte des forces et déformations au point d'inflexion ainsi que de la forme de l'amande. Le module d'élasticité est théoriquement une constante caractéristique des propriétés mécaniques pour un matériau homogène. Le tableau IV présente les valeurs de modules d'élasticité déterminées pour les différentes sous-classes d'amandes. Les valeurs de ce module ont varié de manière importante entre 0,47 MPa et 8,37 MPa. Ces valeurs extrêmes correspondent respectivement à une amande TG de haute densité à 100mm/min et à une amande G de haute densité à 10mm/min.

Tableau IV. Module d'élasticité par classe d'amandes et vitesse

<i>Module d'élasticité, E (MPa)</i>				
Classe d'amandes		Vitesse mm/min		
Poids	Densité	10	100	1000
TG	HD	6,30	0,47	2,07
G	HD	8,37	2,38	5,39
P	HD	3,53	2,59	1,06
TP	HD	6,85	3,63	2,16
TG	BD	4,03	3,22	3,60
G	BD	3,95	0,81	2,05
P	BD	2,90	0,94	2,10
TP	BD	2,73	0,62	0,89

La moyenne générale du module d'élasticité est de $3,03 \pm 1,87$ MPa. A la vitesse de 100 mm/min, les valeurs des modules d'élasticité sont inférieures à celles des vitesses de 10 mm/min et 1000 mm/min (figure 8).

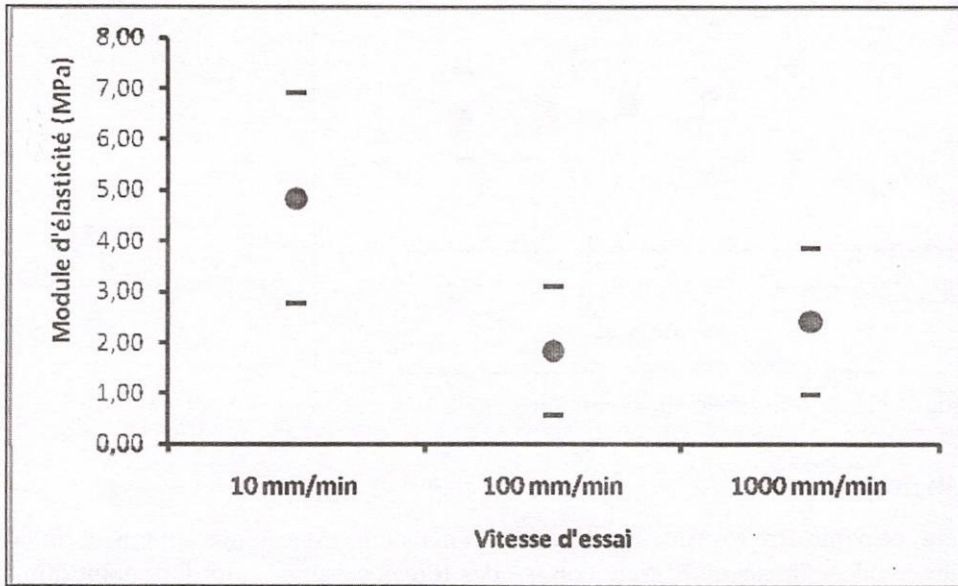


Figure 8. Effet de la vitesse sur le module d'élasticité

La vitesse de 100mm/min se révèle mieux adaptée. A cette vitesse, le module d'élasticité (2,38 MPa) de l'amande G de HD, demandant plus d'énergie de rupture, reste inférieur à la moyenne générale ($3,03 \pm 1,87$ MPa) mais supérieur à la moyenne des amandes de basse densité ($1,40 \pm 1,22$ MPa). La conséquence est que les autres amandes auront un temps de séjour plus long dans la cage de broyage ; et certaines amandes comme celles du *Monodara myristica* à 8 % d'humidité avec un module d'élasticité élevée 161,27 MPa seront difficiles à concasser par un tel équipement (BURUBAI *et al.*, 2008).

Conclusion

Les amandes utilisées lors de ces essais sont très hétérogènes de par leurs dimensions, leurs masses, leurs densités et leurs propriétés mécaniques (Force de rupture, raideur et module d'élasticité). La variabilité des propriétés mécaniques fait que les amandes présentent une grande diversité de comportement à l'écrasement. Le coefficient de variation de la force moyenne de rupture des amandes de 43 % montre une forte variabilité entre les amandes. Cette variabilité reste importante entre les différentes sous-classes d'amandes.

Quelles que soient la classe et la densité, la vitesse de 100 mm/min met en évidence une force de rupture inférieure à celles des vitesses de 10 et 1000 mm/min. Les amandes de haute densité, ont une force moyenne de rupture de 387 ± 34 N contre 189 ± 133 N pour celles de basse densité à 100 mm/min. Il apparaît que les amandes de haute densité demandent plus d'effort à la rupture, indépendamment de la vitesse et de la taille. Cette catégorie d'amandes présente la meilleure qualité pour l'extraction du beurre. L'énergie moyenne de rupture de ces amandes est de $1\,520 \pm 1\,944$ mJ contre 205 ± 273 mJ pour les amandes de basse densité. Les valeurs de la raideur sont respectivement de 376 ± 82 N/mm pour les hautes densités et 230 ± 61 N/mm pour les basses densités. Le module d'élasticité moyen pour les mêmes sous-classes à 100 mm/min est de $1,83 \pm 1,26$ MPa. Les amandes de haute densité ont présenté en moyenne $3,73 \pm 2,46$ MPa et $2,32 \pm 1,27$ MPa pour les amandes de basse densité.

Pour concasser facilement une amande de karité, le concasseur devra lui appliquer une pression supérieure à 2,27 MPa qui correspond au module d'élasticité moyenne des amandes de haute densité à 100 mm/min

Bien que cette étude ait une contribution certaine dans la caractérisation des amandes de karité, elle n'a portée que sur un lot d'amandes d'une année, d'une seule origine géographique et sur une seule teneur en eau. Il serait opportun d'étendre une telle étude sur plusieurs taux d'humidité dans la plage de conservation des amandes, tout en intégrant la couverture géographique.

Remerciements

Cette étude a été rendue possible avec l'appui financier du Commissariat Général aux Relations Internationales de la Communauté Française Wallonie – Bruxelles (CGRI).

Références bibliographiques

- ANONYME, 2000.** Plan d'actions du Conseil Oléagineux du Burkina (COB). Document de Travail. Centre Canadien d'Etude et Coopération Internationale Ouagadougou, 29 p.
- ANONYME, 2001.** Compression Test of Food Materials of Convex Shape. ASAE S368.4 DEC00.
- AVIARA N.A., HAQUE M.A., IZGE I.A., 2000.** Physical and frictional properties of sheanut. *Agrosc.* Vol. 2, n°1, pp19-34.
- AVIARA N.A., HAQUE M.A., IZGE I.A., 2005.** Effect of Moisture content on some Physical properties of sheanut (*Butyrospermum Pradoxum*). *Agrosc.*, vol.19, pp193-198.
- OLUWOLE F.A., AVIARA N.A., HAQUE M.A., 2007.** Effect of Moisture Content and Impact Energy on the Crackability of Sheanut. *Agricultural Engineering International*. In The CIGR Ejournal. Manuscript FP 07002 Vol. IX October.
- BONKOUNGOU E.G., 1987.** Monographie du karité, *Burtyrospermum paradoxum* (Gaertn f.) Hepper, espèce agroforestière à usages multiples. IRBERT/CNRST de Ouagadougou, 69p.
- BURUBAI W., AKOR A.J, IGONI A.H, PUYATE Y.T., 2008.** Fracture Resistance of African Nutmeg (*Monodora myristica*) to Compressive Loading. *American-Eurasian Journal of Scientific Research* vol.3, n°1, pp18-15.
- DE LA CIERAVA S., 2002.** Comportement mécanique des pompes Jonagold lors de tests de compression. Travail de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux. 60 p.
- GUNASEKARAN S., PAULSEN M.R., 1985.** Breakage Resistance of Corn as a Function of Drying Rates. ASAE. vol.28, n°6, pp 2071-2076.
- LESAGE P., 1993.** Mise au point d'un dispositif de mesure non destructif de la fermeté des fruits et des légumes. Essai sur la tomate. Travail de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux. 106 p.
- MAMMAN E., BOBBOI UMAR, AVIARA N.A., 2005.** Effect of Moisture Content and Loading Orientation on the Mechanical Properties of Banites Aegyptiaca Nuts. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal*. Manuscript FP 04015 Vol.VII of December.
- OLANIYAN A. M., OJE K., 2002.** Some Aspects of the Mechanical Properties of Shea Nut Biosystems Engineering vol. 81, n°4, pp 413-420.
- PASSELEGUE G., 1927.** Les concasseurs à noix de palme. Bibliothèque de l'Institut National d'Agronomie Coloniale de Paris Vè. Librairie Émile Larose, 162 p.
- TCHIEGANG C., DANDJOUA A.A.K., KAPSEU C., PARMENTIER M., 2003.** Études des conditions d'extraction de l'huile par pressage des amandes de *Ricinodendron heudelotii* (Bail) Pierre ex Pax. *J. Food Eng.* Vol.58, pp 363-371.
- TCHIEGANG C., DANDJOUA A.A.K., KAPSEU C., PARMENTIER M., 2005.** Optimisation de l'extraction de l'huile par pressage des amandes de *Ricinodendron heudelotii* Pierre ex Pax. *J. Food Eng.* vol.68, pp 79-87
- UNIFEM, 1997.** Le karité l'or blanc des africaines. Bureau Régional UNIFEM de Dakar, 41p.
- YAMÉOGO R., 1997.** Valorisation des huiles végétales non alimentaires : étude technique et socio-économique d'une unité artisanale d'extraction et de transformation des huiles. Rapport final de recherche. Ouagadougou : Projet CRDI n° 91-1029, 82p.