

REPUBLICQUE DU BENIN

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

N° d'ordre :

Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi
EPAC



Faculté des Sciences et Techniques
FAST

Formation Doctorale

SCIENCES POUR L'INGENIEUR

Thèse de Doctorat Unique
Présentée pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi
Option: Génie Mécanique

THÈME : CONTRIBUTION À LA MISE AU POINT ET À
L'OPTIMISATION DES ÉQUIPEMENTS
AGROALIMENTAIRES AU BÉNIN : CAS DE LA
DÉCORTIQUEUSE DE NÉRÉ ET DE LA PRESSE D'AFITIN



Présenté par
Roger Houèchéhénè AHOUANSOU



Jury

Soutenue publiquement le, 21 Décembre 2012, devant le jury composé de :

Président : Prof. Kossi NAPO, Université de Lomé (Togo)

Directeur de Thèse : Prof. Dr Ir. Antoine VIANOU, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Co-Directeur de Thèse : Prof. Dr Ir. Emile A. SANYA, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Rapporteur : Prof. Dorothé AZILINON, Université Cheikh Anta DIOP-Dakar (Sénégal)

Examineur : Prof. Erick Amos FOUJNET, Université de Dschang (Cameroun)

Examineur : Prof. Dr Ir. Joseph D. HOUNHOUGAN, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Année académique : 2012 - 2013

DEDICACES

Nous dédions ce travail à :

- Mon regretté père Jean Kouchika AHOUANSON et à ma feuè mère Pélagie Mahussi VIVO LALY, c'est aussi à vous que revient le mérite de mon éducation. Que vos âmes reposent en paix ;
- Mon épouse Augustine Finagnon HAZOUME pour toutes les privations et sacrifices consentis.

REMERCIEMENTS

La réalisation du présent mémoire n'a été possible que grâce au concours des personnes à qui nous témoignons toute notre sincère reconnaissance. Ainsi, nos sincères remerciements vont à l'endroit de :

- Professeur Antoine VIANOU, Professeur Titulaire des Universités, qui a cru en mes capacités. Son engagement personnel, pour l'organisation de la formation doctorale, nous a offert cette opportunité de mener nos études doctorales sous sa direction. Sincères remerciements ;
- Professeur Emile A. SANYA, Enseignant-chercheur à l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) qui a assuré l'encadrement du travail. Nous le remercions une fois encore pour n'avoir ménagé aucun effort pour nous apporter son soutien matériel et moral. Hommage respectueux et profonde reconnaissance ;
- Docteur Gontrand C. BAGAN, Enseignant-Chercheur à l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Lokossa qui a assuré le co-encadrement de ce travail, ce document a vu le jour grâce à votre participation déterminante. Votre parfaite disponibilité et vos conseils ne nous ont nullement fait défaut. Hommage respectueux et profonde reconnaissance ;
- Professeur Joseph HOUNHOUGAN, Professeur titulaire des Universités, en poste à la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'UAC, Coordonnateur du Projet Néré 2ADE. Votre engagement personnel a facilité la réussite de ce travail. Recevez ma sincère reconnaissance.

Ma reconnaissance et mes remerciements vont aussi à l'endroit de :

- Professeurs Norbert AWANOU et Brice SINSIN, respectivement, ancien et nouveau Recteurs, pour le soutien financier de l'UAC à cette étude à travers le Projet Néré 2ADE ;
- Professeur Erick Amos FOUJNET, pour avoir conduit mes premiers pas dans ce travail de recherche ;
- Tous les Enseignants-Chercheurs de la formation doctorale Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC). Vous avez su me donner les bases de la connaissance nécessaire pour l'heureux aboutissement de ce travail ;
- Tous les Enseignants-Chercheurs du Département Génie Mécanique et Energétique de l'EPAC, pour l'appui moral et technique ;
- Eminents membres du jury pour le temps consacré à l'appréciation de ce document ;
- Feu Docteur Pascal FANDOHAN, Ex Chef du Programme Technologies Agricoles Alimentaires (P.T.A.A) de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), pour avoir guidé mes pas et m'avoir donné le goût de la recherche ; Paix à ton âme.

- Docteur Patrice ADEGBOLA, Chef du Programme Analyse de la Politique Agricole (PAPA) de l'INRAB, pour le constant intérêt porté par vous sur l'aboutissement de cette étude ;
- Mr Jean MONHOUANOU, Ex Chef du Programme Technologies Agricoles Alimentaires (P.T.A.A) de l'INRAB, pour avoir initié mes pas dans la recherche ;
- Professeur Paulin AZOKPOTA, Enseignant-Chercheur à la FSA pour la complicité permanente dans la conduite de cette étude ;
- Mon frère Laurent AHOUANSOU, pour l'intérêt particulier accordé à ma réussite malgré ton éloignement ;
- Mes sœurs Pauline, Feue Colette, Léa et Pascaline AHOUANSOU pour votre constante sollicitude.
- Ma belle-mère Rita HOUNTONDI HAZOUME pour l'affection permanente,
- Père Nicolas HAZOUME, Abbé Gildas HAZOUME, Joséphine, Paul, Jérôme et Brice HAZOUME, pour toute la bénédiction dont vous m'avez comblé ;
- Mes enfants Sergino, Mariano, Steven, Sylvain, Ariane, Cédric, Stéphanie, pour leur sagesse ;
- Tous les enseignants-chercheurs et doctorants impliqués dans le Projet Néré 2ADE pour l'appui dans le cadre de la mise en œuvre de ce projet ;
- Autorités de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), pour l'appui moral à cette formation ;
- Professeur Guy A. MENSAH, Directeur du Centre de Recherche Agricole d'Agonkanmey de l'INRAB, pour l'intérêt constant porté à cette étude et pour avoir affuté mon profil scientifique ;
- Madame Pélagie AGBOBATINKPO Pélagie, Chercheur à l'INRAB, pour la collaboration permanente dans le cadre de cette étude ;
- Monsieur AHOUNOU Jean-Louis, Chercheur à l'INRAB, pour le soutien technique inconditionnel ;
- Monsieur Isaac SENOU, Assistant Technique de Recherche au PTAA pour l'appui technique et la disponibilité permanente ;
- Dr Paul HOUSSOU, chef du Programme Technologie Agricole Alimentaire de l'Institut National des Recherche Agricoles du Bénin (PTAA/INRAB), tous les collègues chercheurs, techniciens et personnel administratif et de soutien de l'INRAB en général et ceux du PTAA/INRAB en particulier, pour tous vos appuis et conseils ;

- Tous les chercheurs, techniciens et personnel administratif du Programme Analyse de la Politique Agricole (PAPA/INRAB), pour la collaboration et les conseils ;
- Monsieur Gilbert KOUAZOUDE, Responsable Communal pour la Promotion Agricole (RCPA) de Kétou, pour la compréhension et le soutien permanent ;
- Madame Marcelline DEDEDJI MONTCHO, Chercheur à l’INRAB, pour le constant attachement à cette étude ;
- Monsieur Ben-Oni ZINSOU et Astride CAPO Chichi, Etudiants-Stagiaires au PTAA, pour l’assistance et la disponibilité ;
- Messieurs Steeve AÏHOU, Giresse ABATI, Jean AKOLE, Guy ADJAGBA, Pacôme GBEDAN, Hermine DJIVOH et Richard HOUNKPEVI, Etudiants-Stagiaires de l’UAC au PTAA, pour les précieux apports dans la recherche sur la transformation du néré ;
- Mesdames Juliette PADONOU et Blandine ADANDONON, en poste au secrétariat de la Direction du Centre de Recherche Agricole d’Agonkanmey pour le soutien moral sans faille ;
- Transformatrices du néré en afitin de Porto-Novo, Adjara, Saclo et Détohou (Abomey), pour votre contribution, votre assistance et permanente disponibilité au travail ;
- Gouvernement du Bénin, pour l’appui financier et technique, à travers le projet Néré ;
- Membres des familles AHOUANSOU et VIVO LALY pour leur attachement fraternel ;
- Membres des familles HAZOUME et HOUNTONDJI pour l’appui moral permanent ;
- Membres de la collectivité SOUWIN-AKPONI pour le soutien ;
- Membres de l’ONG “LA CONCORDE” pour la solidarité et l’attachement ;
- Descendants de la dynastie royale Dè-Mèssè pour toute la grâce et la bénédiction ;
- Mes neveux et nièces Denis, Antoine, Evelyne, Jules, Luc, Mireille, Bernice, Aline, Sylvain Josiane, Adjossi, Ghislain, Théopisca, et les autres pour leur disponibilité permanente ;
- Tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire et enfin
- Dieu, le créateur de l’univers, source et aboutissement de toutes choses pour m’avoir protégé, inspiré, et pour avoir mis sur mon chemin toutes ces merveilleuses personnes ci-dessus citées.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Table des matières	v
Synthèse	vii
Liste des tableaux	x
Liste des figures.....	xii
Liste des photos	xvi
Liste des sigles et abreviations	xvii
Liste des symboles.....	xx
Introduction générale	1
Chapitre 1: Revue bibliographique : néré et produits de transformation de ses graines - mecanismes du decortilage...7	7
1.1. Généralités sur le néré	8
1.1.1. Caractéristiques de l'arbre de néré	8
1.1.2. Caractéristiques de la gousse de néré	9
1.1.3. Caractéristiques de la graine de néré	10
1.1.4. Diversité génétique de la graine de néré.....	11
1.2. Technologies de transformation de la graine de néré	12
1.2.1. Technologie traditionnelle de production de l'afitin	12
1.2.2. Technologie améliorée de production d'afitin	17
1.3. Mécanisation du décortilage des graines de néré	19
1.3.1. Décortiqueuse CIRAD.....	20
1.3.2. Décortiqueuse UAC-INRAB	22
1.3.3. Expérience du Nigeria.....	24
1.4. Facteurs influençant le décortilage mécanique	25
1.4.1. Propriétés physiques des graines.....	25
1.4.2. Bilan des travaux de caractérisation physique de produits agricoles	28
1.4.3. Propriétés mécaniques des graines.....	29
1.4.4. Energie de déformation E	36
Chapitre 2 : Effets de différents types de pré-traitements sur les caractéristiques physiques et mécaniques des graines de néré (<i>parkia biglobosa</i>).....	39
2.1. Introduction	40
2.2. Matériel et méthodes.....	42
2.2.1. Matériel	42
2.2.2. Méthodes	43
2.2.3. Analyses statistiques des données et paramètres	47
2.3. Résultats et discussion	48
2.3.1. Cuisson des graines	48
2.3.2. Séchage des graines.....	67
2.3.3. Trempage des graines.....	87
2.4. Conclusion.....	103
Chapitre 3 : Effets des différents pretraitements sur l'efficacite du decortilage mecanique	105
3.1. Introduction	106
3.2. Matériel et méthodes.....	107
3.2.1. Matériel	107
3.2.2. Méthodes	110
3.3. Résultats et discussion	113
3.3.1. Effets des traitements simples sur l'efficacité des équipements.....	113
3.3.2. Effets des traitements mixtes sur l'efficacité de la décortiqueuse à grilles	123
3.4. Conclusion.....	124
Chapitre 4 : Optimisation des performances techniques de la decortiqueuse	126
4.1. Introduction	127
4.2. Matériel et Méthodes	128
4.2.1. Matériel	128

4.2.2. Méthodes	133
4.3. Analyses statistiques	138
4.4. Résultats et discussion	139
4.4.1. Influences du diamètre inférieur sur le diamètre utile, l'aire de décortilage et le débit.....	139
4.4.2. Valeurs limites et celles de référence des paramètres de performance de la machine	141
4.4.3. Résultats d'analyse du jeu entre les grilles et les valeurs théoriques du Taux de	143
décortilage et du Taux de brisure	143
4.4.4. Analyse et optimisation de l'Indice d'efficacité.....	144
4.4.5. Analyse et optimisation du Taux de décortilage.....	146
4.4.6. Analyse et optimisation du Taux de brisure des cotylédons	148
4.4.7. Analyse et optimisation du Rendement au décortilage	150
4.4.8. Analyse et optimisation de la Capacité horaire	152
4.4.9. Analyse et optimisation du facteur d'efficacité de la décortiqueuse.....	153
4.4.10. Analyse d'optimisation multiple critères	155
4.4.11. Analyse expérimentale des valeurs optimales des paramètres de performance.....	156
4.4.12. Effets du jeu inter grilles sur les indicateurs de performance de la décortiqueuse.....	157
4.5. Conclusion.....	159
Chapitre 5 : Evaluation des performances technique et économique de la décortiqueuse à graines de néré.....	160
5.1. Introduction	161
5.2. Matériel et Méthodes	162
5.2.1. Matériel	162
5.2.2. Méthodes	164
5.3. Résultats et discussion	169
5.3.1. Performances techniques des technologies en milieu réel	169
5.3.2. Résultats économiques	173
5.3.2. Marge brute, marge nette et seuil de rentabilité	179
5.4. Appréciations des transformatrices.....	181
5.4.1. Appréciations sur les performances techniques de la décortiqueuse	181
5.6. Conclusion et recommandations.....	184
Chapitre 6 : Mise au point et évaluation technique de la presse à cubes d'afitin	185
6.1. Introduction	186
6-2. Matériel et méthodes	187
6-2-1. Matériel.....	187
6-2-2. Méthodes.....	187
6.3. Résultats et discussions	193
6.3.1. Caractérisation physique de 'cubes du marché'	193
6.3.2. Caractéristiques physiques de la poudre d'afitin.....	195
6.3.3. Effets de la teneur en eau et de la pression sur les caractéristiques physiques de la	196
poudre d'afitin.....	196
6.3.4. Description de la presse.....	199
6.3.5. Performances techniques de la presse.....	203
6.4. Conclusion.....	205
Conclusion générale et perspectives	207
Références bibliographiques et webographiques	211
Références bibliographiques	212
Références webographiques	223
Annexe.....	224
Annexe 1. Production scientifique	243
Annexe 2. Eléments du dossier technique de fabrication de la décortiqueuse de graines de néré	243
Annexe 3. Eléments de calcul des pièces de la presse à cubes d'afitin	244
Annexe 4. Représentation synoptique de la presse hydraulique automatisée	251
Annexe 5. Eléments de la trieuse de graines de néré.....	252
Annexe 6. Fiche de collecte des données sur les graines de néré et les cotylédons	253
Annexe 7. Fiche des données sur le test comparatif des technologies de production d'afitin	254

SYNTHESE

Le néré (*Parkia biglobosa*) est un arbre répandu en Afrique de l'Ouest qui s'adapte aux sols pauvres tels que les croutes ferrugineux, ainsi qu'aux zones climatiques à faible pluviométrie, de type soudanien. La graine de néré fait l'objet d'importantes transactions dans les pays Ouest Africains et son aire de consommation dépasse les régions productrices. La graine de néré (*Parkia biglobosa*) est très riche en protéines et en lipides. Elle est utilisée en pharmacopée traditionnelle et surtout en alimentation humaine. Sa transformation par fermentation conduit à une amélioration notoire de la valeur nutritionnelle des produits finis en comparaison avec celle de la matière première de départ. Le condiment obtenu, appelé, soubala au Mali et en Guinée, afitin, iru ou sonru au Bénin possède un arôme très prononcé et constitue un ingrédient majeur utilisé pour la préparation des mets. La technologie traditionnelle de transformation du néré en afitin comporte plusieurs opérations dont la plus fastidieuse et la moins hygiénique est le décorticage des graines.

Au Bénin, la forte périssabilité des condiments à base de néré constitue une contrainte majeure à la conservation et la commercialisation des produits à base du néré. En effet, l'*afitin*, l'*iru* et le *sonru* traditionnels sont des produits humides et riches en éléments nutritifs. Ils constituent donc une source privilégiée de nutriments pour la croissance des microorganismes de putréfaction, ce qui rend difficile leur conservation. La conservation de l'*afitin*, de l'*iru* ou du *sonru* sous une forme physiquement et chimiquement stabilisée de type «afitin-cube», pourrait être une alternative technologique pour lever cette contrainte.

L'objectif général de cette étude est de contribuer au développement de la filière néré au Bénin et dans la sous-région à travers la réduction des contraintes liées à la pénibilité du décorticage et à la conservation de l'*afitin*.

De façon spécifique, la présente étude vise à : (i) Réaliser la caractérisation physique et mécanique de la graine de néré en fonction des différentes variétés existantes ; (ii) Réduire la pénibilité de l'opération du décorticage par la mise au point d'un système (équipements et type de traitement) efficace de décorticage des graines de néré ; (iii) Améliorer les conditions de conservation de l'*afitin*, de l'*iru* et du *sonru* par la mise au point d'une presse à cube de néré.

La première partie de l'étude est consacrée à l'étude des influences des prétraitements de cuisson en eau chaude des graines de néré, du trempage à l'eau et du séchage sur leurs caractéristiques physiques des graines et des cotylédons. La précuisson, effectuée à durées allant respectivement de 1, 2, 3, 4, 5 à 6 h, est appliquée à sept (07) lots de graines de néré tout venant acquises au marché Dantokpa. Quatre lots d'échantillons de cent (100) graines sont séchés à l'étuve à la température de 105°C pendant des durées respectives de 1 h, 2 h, 2 h30 mn et 3 h. Trois (3) lots d'échantillons de cent (100) graines sont trempés

dans l'eau à la température ambiante ($30\pm 1^\circ\text{C}$) pendant des durées respectives de 24 h, 48 h et 72 h. Les mesures réalisées sur les graines et cotylédons cuits, séchés et trempés, concernent les dimensions, les masses et volumes des 1000-graines et cotylédons, les paramètres de forme, la force de brisure, l'angle de repos et le coefficient de friction. Les résultats montrent que la précuisson et le trempage induisent des modifications variables, en fonction de sa durée d'application, sur les caractéristiques physiques des graines. La teneur en eau, la masse et le volume de 1000-graines et de cotylédons, la porosité, des graines précuites, augmentent de manière significative. Les dimensions caractéristiques moyennes subissent des accroissements faibles certes, mais les allongements relatifs correspondants sont beaucoup plus remarquables. Par contre, les masses volumiques réelle et spécifique enregistrent des réductions notables. La cuisson et le trempage des graines de néré provoquent l'accroissement du coefficient de frottement statique des graines et cotylédons sur les tôles noire, inoxydable et sur grille inoxydable. L'angle statique au repos et l'angle dynamique croissent tandis que la résistance minimale à la brisure décroît lorsque la graine et le cotylédon sont soumis aux traitements de cuisson et de trempage. Par contre, le traitement de séchage impose à la graine et aux cotylédons, une diminution de ces paramètres. Seules les masses volumiques et la porosité subissent un accroissement notable durant le séchage.

Les effets des différents prétraitements appliqués aux graines de néré sur l'efficacité du décorticage mécanisé sont étudiés. Les graines de néré sont, soit cuites à ébullition pendant 1 à 6 h, soit trempées à $30\pm 1^\circ\text{C}$ pendant 24 h, 48 h ou 72 h, ou enfin séchées à 105°C pendant 1 h, 2 h ou 3 h. Les paramètres de performance évalués sont: l'indice de décorticage (I_D), le rendement (R_D) et le taux de décorticage (T_D), et le taux de brisure des cotylédons (T_B). Les résultats montrent que la machine fournit ses meilleures performances avec les graines cuites à ébullition pendant 4 à 6 h. Les indices de décorticage obtenus se stabilisent autour de 0,94-0,95 ; les taux de décorticage sont de l'ordre de 98-99,4 % ; les taux de brisure des cotylédons restent inférieurs à 5 % et les rendements au décorticage entre 48 et 52,0 %. Les valeurs de ces paramètres, pour le procédé traditionnel, sont respectivement de : 0,93 ; 97 % ; 0 % et 48,41%.

Les valeurs optimales des variables que sont la vitesse de la grille et le diamètre de la trémie, de même que celles de paramètres des performances techniques de la décortiqueuse sont déterminées. L'optimisation est réalisée avec des graines cuites pendant quatre heures. Lorsque l'équipement est câblé sur une vitesse de rotation de la grille égale à 666 tr/mn et un diamètre de la trémie égal à 116 mm, les valeurs optimales des paramètres indiquent 0,91 % pour l'Indice de décorticage, 96,27 % pour le Taux de décorticage, 1,47 % pour le Taux de brisure, 50,35 % pour le Rendement au décorticage, 773 kg/h pour la Capacité horaire et 702,16 kg/h pour le facteur d'efficacité. Le test expérimental a confirmé les valeurs optimales théoriques. Les performances technique et économique de la technologie mécanisée de production de l'afitin sont aussi évaluées. L'étude est réalisée en milieu réel sous la gestion des transformatrices. L'analyse des performances économiques des deux technologies (équipement

mécanique, méthode du foulage aux pieds) a porté sur les indicateurs tels que les temps des travaux, les marges brutes et nettes, et le seuil de rentabilité. Ainsi, les coûts variables, le revenu et les coûts fixes liés à chaque technologie sont estimés. Les résultats ont confirmé les bonnes performances obtenues précédemment en tation sous gestion chercheur. La technologie mécanisée, utilisant la décortiqueuse proposée, augmente la capacité horaire au décorticage et le rendement en afitin. Elle diminue le temps des travaux, par la réduction de la main-d'œuvre. Le gain financier de l'utilisation de l'équipement par rapport à la méthode traditionnelle est estimé à 4919,5 FCFA pour 100 kg de graines transformées. Les marges nettes mensuelles obtenues avec l'utilisation de la technologie mécanisée est estimée à 18076,8 FCFA, 60256 FCFA et 120512 FCA respectivement pour les petites, moyennes et grandes classes. Avec la technologie traditionnelle, cette marge nette mensuelle est évaluée à 9576 FCFA, 31920 FCFA et 63360 pour les différents groupes de transformatrices. Les performances techniques de la décortiqueuse sont bien approuvées par les transformatrices.

L'évaluation des caractéristiques physiques et mécaniques de la poudre d'afitin et à la mise au point d'une presse pour la fabrication des cubes à base de cette poudre est réalisée. Les caractéristiques physiques et mécaniques du cube d'afitin sont déterminées en fonction de la teneur en eau et de la pression de compactage. Les propriétés du cube d'afitin obtenu sont comparées à celles des cubes vendus sur le marché et ont permis la mise au point de la presse dont les performances sont évaluées. La teneur en eau de la poudre d'afitin permettant d'obtenir un bon produit doit être comprise entre 9 % et 15 %, les pressions correspondantes se situant entre 9,5 bars et 11,89 bars. La compressibilité de la poudre augmente avec l'accroissement de sa teneur en eau et décroît avec l'augmentation de la pression. Lorsque la teneur en eau de la poudre d'afitin augmente de 7 % à 18 % (b h), le coefficient de compressibilité croît de 0,37 à 0,48. Sa valeur est égale à 0,4 lorsque la teneur en eau est de 10 % et 0,45 lorsqu'elle est égale à 13%. Cette presse présente une capacité horaire de 2000 cubes par heure. Ces cubes à afitin ont une charge moyenne à la rupture égale à 30,66 N, une dureté égale à 80,66 % et une masse égale à 7,5 g.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	1-1	: Composition chimique de la graine.....	10
Tableau	1-2	: Performances de la décortiqueuse CIRAD.....	20
Tableau	1-3	: Performances techniques de la décortiqueuse.....	23
Tableau	2-1	: Dimensions axiales des cotylédons de néré à différentes durées de cuisson.....	50
Tableau	2-2	: Effet de la cuisson sur les paramètres de forme des graines et cotylédons de néré.....	52
Tableau	2-3	: Effet de la cuisson sur les paramètres de forme des graines et cotylédons de néré.....	54
Tableau	2-4	: Aires massiques des graines et cotylédons du néré durant la cuisson.....	59
Tableau	2-5	: Valeurs des coefficients de frottement statique de la graine de néré durant l'opération de la cuisson : résultats d'essais sur différents matériaux.....	64
Tableau	2-6	: Dimensions axiales des graines de néré à différentes durées de séchage.....	69
Tableau	2-7	: Dimensions axiales des cotylédons de néré en fonction de la durée de séchage.....	71
Tableau	2-8	: Effets du séchage sur les paramètres de forme des graines et cotylédons de néré.....	73
Tableau	2-9	: Aires massiques des graines et des cotylédons du néré durant le séchage.....	78
Tableau	2-10	: Coefficients de frottement des graines testées cotylédons sur différents matériaux.....	83
Tableau	2-11	: Dimensions axiales des graines de néré à différentes durées de trempage.....	88
Tableau	2-12	: Dimensions axiales des cotylédons de néré à différentes durées de trempage.....	90
Tableau	2-13	: Effets du trempage sur les paramètres de forme des graines et des cotylédons de néré.....	92
Tableau	2-14	: Valeurs des aires massiques des graines et des cotylédons du néré durant le trempage en fonction du temps.....	96
Tableau	2-15	: Effet du trempage sur le coefficient de frottement statique au repos.....	101
Tableau	3-1	: Valeurs des paramètres de performance des décortiqueuses en fonction des prétraitements appliqués aux graines et celles du foulage traditionnel aux pieds.....	114
Tableau	3-2	: Valeurs des performances techniques de la décortiqueuse à grilles et de la méthode traditionnelle au décortilage avec les graines ayant subi un traitement mixte.....	123
Tableau	4-1	: Valeurs limites et valeurs de références des paramètres de performance techniques de la décortiqueuse.....	142
Tableau	4-2	: Valeurs optimisées des paramètres.....	155
Tableau	4-3	: Valeurs expérimentales des paramètres de performance et comparaison avec les valeurs optimales.....	156
Tableau	5-1	: Performances techniques comparées des deux méthodes de décortilage.....	169
Tableau	5-2	: Temps des travaux (HH) pour transformer 100 kg de graines.....	171
Tableau	5-3	: Rendement d'extraction des différentes technologies.....	172
Tableau	5-4	: Consommation en carburant du moteur.....	173

Tableau	5-5	: Consommations intermédiaires et intrants.....	174
Tableau	5-6	: Coûts variables pour 100 kg de graines transformées.....	176
Tableau	5-7	: Coûts annuels des différents équipements (FCFA).....	177
Tableau	5-8	: Coûts fixes pour 100 kg de graines (FCFA).....	178
Tableau	5-9	: Coût de production pour 100 kg de graines de néré transformés (FCFA).....	178
Tableau	5-10	: Calcul de la marge brute sur la base de 100 kg de graines	180
Tableau	5-11	: Détermination du seuil de rentabilité de la technologie proposée – comparaison avec celui de la méthode traditionnelle.....	181
Tableau	5-12	: Appréciations des productrices sur les performances techniques de la décortiqueuse.....	182
Tableau	6-1	: Caractéristiques physiques et mécaniques des ‘cubes’ de différentes marques.....	194
Tableau	6-2	: Etat des ‘cubes’ d’afitin en fonction de la teneur en eau et de la pression.....	195
Tableau	6-3	: Récapitulatif des paramètres de performances techniques de la presse à cubes d’afitin.....	204

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1	: Diagramme technologique de fabrication du afitin (méthode fon)	13
Figure 1-2	: Flux comparatif des différentes opérations de fabrication du soubala de néré selon les procédés traditionnels et améliorés (décortiqueuse CIRAD).....	19
Figure 1-3	: Diagramme Contrainte-Déformation de différents produits alimentaires...	30
Figure 1-4	: Diagramme contrainte-déformation en compression de l'orge.....	31
Figure 2-1	: Effets de la cuisson sur la teneur en eau des graines et cotylédons de néré.	49
Figure 2-2	: Allongements relatifs des dimensions des graines suivant la durée de la cuisson.....	51
Figure 2-3	: Allongement des dimensions des cotylédons en fonction de la durée de cuisson.....	53
Figure 2-4	: Évolution des diamètres équivalents de la graine et du cotylédon en fonction de la durée de la cuisson.....	55
Figure 2-5	: Variation des aires de la surface de la graine et du cotylédon en fonction de la durée de la cuisson.....	56
Figure 2-6	: Effets de la cuisson sur les masses des 1000-graines et des 1000-cotylédons en fonction de sa durée.....	57
Figure 2-7	: Effets de la cuisson sur le ratio (masse du cotylédon / masse de la graine) en fonction de sa durée.....	58
Figure 2-8	: Evolution des volumes réels des graines et des cotylédons durant la cuisson.....	60
Figure 2-9	: Effets de la cuisson sur la masse volumique réelle des graines et des cotylédons en fonction de sa durée.....	61
Figure 2-10	: Évolutions des masses volumiques spécifiques des graines de néré et des cotylédons durant la cuisson	62
Figure 2-11	: Variation de la porosité des graines et des cotylédons durant la cuisson...	63
Figure 2-12	: Effet de la cuisson sur l'angle statique au repos de la graine de néré.....	65
Figure 2-13	: Effet de la cuisson sur l'angle dynamique au repos de la graine.....	66
Figure 2-14	: Evolution de la force minimale à la rupture en fonction de la durée de la cuisson.....	67
Figure 2-15	: Effets du séchage sur la teneur en eau des graines et cotylédons de néré...	68
Figure 2-16	: Rétrécissements relatifs des dimensions des graines fonction de la durée de séchage.....	70
Figure 2-17	: Rétrécissements des dimensions des cotylédons en fonction de la durée du séchage.....	72
Figure 2-18	: Évolution des diamètres équivalents de la graine et des cotylédons en fonction de la durée de séchage.....	74

Figure 2-19 :	Modification subie par les aires de surface de la graine et du cotylédon en fonction de la durée de séchage.....	75
Figure 2-20 :	Evolution de la masse des graines et des cotylédons durant le séchage.....	76
Figure 2-21 :	Évolution du rapport entre la masse du cotylédon et celle de la graine en fonction de la durée de séchage.....	77
Figure 2-22 :	Evolution du volume réel des 1000-graines et des 1000-cotylédons durant le séchage en fonction du temps d'application.....	79
Figure 2-23 :	Variation de la masse volumique réelle des graines et cotylédons durant le séchage.....	80
Figure 2-24 :	Variation des masses volumiques apparentes des graines et cotylédons durant le séchage.....	81
Figure 2-25 :	Effets du séchage sur la porosité des graines et des cotylédons en fonction de la durée d'application.....	82
Figure 2-26 :	Effet du séchage sur l'angle statique au repos de la graine de néré.....	84
Figure 2-27 :	Effet de la durée de séchage sur l'angle dynamique au repos.....	85
Figure 2-28 :	Effets du séchage sur la force de rupture des graines en fonction de la durée.....	86
Figure 2-29 :	Effet du trempage sur la teneur en eau des graines et des cotylédons de néré.....	87
Figure 2-30 :	Allongements relatifs des dimensions des graines suivant la durée du trempage.....	89
Figure 2-31 :	Effets du trempage sur l'allongement relatif des dimensions des cotylédons en fonction de la durée.....	91
Figure 2-32 :	Effets du trempage sur les diamètres équivalents de la graine et des cotylédons en fonction du temps d'application.....	92
Figure 2-33 :	Évolution des aires de surface de la graine et des cotylédons en fonction de la durée du trempage.....	93
Figure 2-34 :	Effets du trempage sur la masse des graines et des cotylédons en fonction du temps d'application.....	94
Figure 2-35 :	Effets du trempage sur le rapport entre la masse des cotylédons et celle de la graine en fonction du temps.....	95
Figure 2-36 :	Résultats des effets du trempage sur le volume réel des graines et des cotylédons en fonction du temps.....	97
Figure 2-37 :	Évolution de la masse volumique réelle des graines et des cotylédons durant le trempage.....	98
Figure 2-38 :	Effets du trempage sur les masses volumiques apparentes des graines et des cotylédons en fonction du temps.....	99
Figure 2-39 :	Effets du trempage sur la porosité des graines et des cotylédons en fonction du temps.....	100
Figure 2-40 :	Variation de l'angle statique au repos en fonction du temps de trempage..	101

Figure 2-41 :	Effet du trempage sur l'angle dynamique au repos de la graine.....	102
Figure 2-42 :	Évolution de la force minimale à la rupture en fonction de la durée du trempage.....	103
Figure 4-1 :	Plan d'ensemble de la décortiqueuse à grilles.....	131
Figure 4-2 :	Chaîne cinématique de la décortiqueuse à grilles.....	132
Figure 4-3 :	Trémie de la décortiqueuse proposée en forme d'entonnoir.....	134
Figure 4-4 :	Grille fixe de la décortiqueuse.....	136
Figure 4-5 :	Diamètre de la grille fixe en fonction diamètre intérieur.....	139
Figure 4-6 :	Aire de la grille fixe en fonction diamètre de la trémie.....	140
Figure 4-7 :	Effet du diamètre de la trémie sur le débit d'écoulement.....	141
Figure 4-8 :	Effet du jeu entre les grilles sur les valeurs théoriques du Taux de décorticage et du Taux de brisure.....	143
Figure 4-9 :	Surface de réponses des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur l'Indice de décorticage.....	144
Figure 4-10 :	Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées sur l'indice de décorticage.....	145
Figure 4-11 :	Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur le Taux de décorticage.....	146
Figure 4-12 :	Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées sur le Taux de décorticage.....	147
Figure 4-13 :	Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur le Taux de brisure des cotylédons.....	148
Figure 4-14 :	Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées sur le Taux de brisure des cotylédons.....	149
Figure 4-15 :	Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur le Rendement au décorticage.....	150
Figure 4-16 :	Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées (Vitesse et Débit) et leurs interactions sur le Rendement au décorticage.....	151
Figure 4-17 :	Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur la Capacité Horaire.....	152
Figure 4-18 :	Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées (Vitesse et Débit) et leurs interactions sur la Capacité horaire.....	153
Figure 4-19 :	Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur le Facteur d'efficacité.....	154
Figure 4-20 :	Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées (Vitesse et Débit) et leurs interactions sur le Facteur d'efficacité.....	154
Figure 4-21 :	Variation du Taux de décorticage et Taux de décorticage en fonction du jeu de réglage.....	157
Figure 4-22 :	Variations de l'Indice d'efficacité en fonction jeu de réglage	158

Figure 4-23 :	Variation du Rendement au décorticage en fonction du jeu de réglage.....	159
Figure 5-1 :	Structure des coûts variables de la méthode mécanisée.....	176
Figure 5-2 :	Structure des coûts variables de la méthode traditionnelle.	176
Figure 6-1 :	Effets de la teneur en eau et de la pression sur le tassement de la poudre d'afitin.....	197
Figure 6-2 :	Effet de la teneur en eau et de la pression sur la compressibilité de la poudre d'afitin.....	198
Figure 6-3 :	Effet de la teneur en eau sur le coefficient de compressibilité de la poudre d'afitin.....	199
Figure 6-4 :	Maquette numérique de la presse à cubes d'afitin.....	200
Figure 6-5 :	Matrice de la presse.....	200
Figure 6-6 :	Plaque de base des moules.....	201
Figure 6-7 :	Bloc piston.....	201
Figure 6-8 :	Schéma de principe du fonctionnement de la presse.....	202

LISTE DES PHOTOS

Photo 1-1 :	Arbre de néré.....	8
Photo 1-2 :	Grappe de gousses fruits de néré.....	9
Photo 1-3 :	Décorticage par foulage aux pieds des graines de néré.....	14
Photo 1-4 :	Décortiqueuse de néré UAC/INRAB.....	22
Photo 1-5 :	Décortiqueuse de graines étuvées (Nigeria).....	24
Photo 2-1 :	Graines de néré brutes et sèches.....	42
Photo 3-1 :	Décortiqueuse verticale à palettes.....	108
Photo 3-2 :	Décortiqueuse à grilles en acier inoxydable.....	109
Photo 3-3 :	Décortiqueuse à meules.....	110
Photo 3-4 :	Décorticage traditionnel par foulage aux pieds.....	112
Photo 5-1 :	Cuisson graines à la marmite en aluminium.....	163
Photo 5-2 :	Décorticage des graines par foulage aux pieds avec bassines en plastic et en aluminium.....	163
Photo 5-3 :	Triage des graines à l'eau additionnée de boue de sable	163
Photo 5-4 :	Rinçage des cotylédons.....	163
Photo 5-5 :	Mise en fermentation des cotylédons bien nettoyés.....	163
Photo 5-6 :	Séance de collecte des appréciations des transformatrices.....	183
Photo 5-7 :	Test en milieu réel de la décortiqueuse.....	183
Photo 6-1 :	Poudre d'afitin obtenue par broyage sur une meule.....	188

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ABVT	: Azote Basique Volatile Total
AHI	: Abrasive Hardenex Index
AOAC	: Association of Analytical Communities
BHI	: Brabendes Hardness Index
CIRAD	: Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement
EPAC	: Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi
FAO	: Food and Agricultural Organization
FCFA	: Francs de la Communauté Financière Africaine
FCFA/kg	: FCFA par kilogramme
FSA	: Faculté des Sciences Agronomiques
INRAB	: Institut National des Recherches Agricoles du Bénin
LEMA	: Laboratoire d'Energétiques et de Mécaniques Appliquées
ONAB	: Office National du Bois
ONU	: Organisation des Nations Unies
PTAA	: Programme Technologies Agricoles Alimentaires
PME	: Petites et Moyennes Entreprises
PMI	: Petites et Moyennes Industries
PIB	: Produit Intérieur Brut
PSI	: Particule Size Index
SHT	: Stenvert Hardness Times

UAC	: Université d'Abomey-Calavi
US	: United State
bs	: Base sèche
bh	: Base humide
°C	: Degré celsius
cm	: Centimètre.
CV	: Cheval-Vapeur.
mg	: milligramme.
g	: gramme.
h	: Heure
J	: Joule
J/kg	: Joule par kilogramme
kg	: Kilogramme.
kg/h	: Kilogramme par heure.
l	: Litre
m	: Mètre
m/°C	: Mètres par degré Celsius
nm	: Nanomètre
mm	: Millimètre.
mn	: Minutes
m ³	: Mètre cube.
m ² / kg	: Mètre carré par kilogramme.

m³/kg : Mètre cube par kilogramme.

MPa : Méga pascal

N/m : Newton par mètre

% : Pourcent

Wh : Wattheure.

Tr/mn : Tour par minute.

Pa : Pascal

rd : Radian

s : Seconde

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Désignation	Unité
A	: Degré d'aplatissement	—
A _L	: Allongement longueur	mm
A _l	: Allongement largeur	mm
A _e	: Allongement épaisseur	mm
A _s	: Aire de la surface des graines	mm ²
A _c	: Aire de la surface des cotylédons	mm ²
α	: Coefficient de température	m/°C
C	: Cohésion du produit	—
C _H	: Capacité horaire	Kg/h
C _L	: Contraction suivant la longueur	mm
C _l	: Contraction suivant la largeur	mm
C _e	: Contraction suivant l'épaisseur	mm
D	: Diamètre du cône	m
d _a	: Diamètre basé sur la moyenne arithmétique	mm
d _g	: Diamètre basé sur la moyenne géométrique	mm
D _g	: Diamètre équivalent graine	mm
D _c	: Diamètre équivalent cotylédons	mm
D _u	: Diamètre utile	mm
D _k	: Dureté cube	%
d ₁	: Dimension initiale de la graine	mm
d ₂	: Dimension finale de la graine	mm
d	: Débit	Kg/s
e _p	: Indice de plasticité	---
E	: Elongation	—
E _f	: Friabilité	%
E _m	: Energie nécessaire par unité de masse	J
E _p	: Module de plasticité	MPa
E _g	: Energie nécessaire pour la réduction de la taille des grains	J
E _g	: Energie nécessaire pour la réduction de la taille des grains	J
e	: Epaisseur	mm
F _c	: Force minimale à la rupture	N
F _E	: Facteur d'efficacité	kg/h
H _g	: Teneur en eau des graines	%
H _c	: Teneur en eau des cotylédons	%
H	: Hauteur du cône	m
I _d	: Indice de décorticage	—
K _k	: Constance de Kick's	—
K _R	: Constante de Rittinger	—
K	: Capacité technique	T/h
k	: Coefficient de déformation	m/N
L	: Longueur	mm
l	: Largeur	mm
Δl	: Allongement	mm
l _{min}	: Largeur minimale des graines	mm
M	: Masse de la graine	g

M_{1000-g}	:	Masse 1000 graines	g
M_{1000-c}	:	Masse 1000 cotylédons	g
M_{v-g}	:	Masse volumique graine	kg / m^3
M_{v-c}	:	Masse volumique cotylédons	kg / m^3
M_{a-g}	:	Masse volumique apparente graine	kg / m^3
M_{a-c}	:	Masse volumique apparent cotylédons	kg / m^3
N	:	Fréquence de rotation	Tr/mn
n	:	Indice du cisaillement	---
P	:	Pression	bar
P_g	:	Porosité graine	%
P_c	:	Porosité cotylédons	%
P_{pazp}	:	Force de rupture	N
Q_e	:	Quantité d'eau à ajouter à la farine	litre
R^2	:	Coefficient de corrélation	---
R_d	:	Rendement au décortilage	%
r	:	Distance entre la graine et l'axe de rotation	mm
r_p	:	Diamètre des perforations	mm
ρ	:	Masse volumique de la graine	kg / m^3
S_m	:	Aire massique	m^2 / kg
S_r	:	Contrainte à la rupture	MPa
s	:	Aire volumique	m^3 / kg
S_c	:	Contrainte	MPa
S	:	Sphéricité	----
S_n	:	Pression normale	Pa
S_u	:	Surface utile	m^2
SR_{CA}	:	Seuil de rentabilité en chiffre d'affaires	FCFA/an
T_{dt}	:	Valeur théorique Taux de décortilage	%
T_{br}	:	Valeur théorique Taux de brisure	%
t	:	Temps	s
t_f	:	Force tangentielle	N
Δt	:	Variation de la température	$^{\circ}C$
T	:	Durée cuisson	s
T_f	:	Tension de rupture du matériau à cisaillement nul	Pa
T_b	:	Taux de brisure	%
T_d	:	Taux de décortilage	%

T_h	:	Taux de grains non décortiqués	%
u	:	Taux de réduction graine	%
μ_s	:	Coefficient de frottement statique	----
V_m	:	Volume massique	m^3/kg
Ψ	:	Déformation relative en compression	—
σ_s	:	Limite d'élasticité	MPa
θ_s	:	Angle statique au repos	degré
θ_d	:	Angle dynamique au repos	degré
$R_{c/g}$:	Rapport masse cotylédons sur masse graine	%
V_z	:	Volume de la graine	m^3
V_{1000-g}	:	Volume 1000 graines	m^3
V_{1000-c}	:	Volume 1000 cotylédons	m^3
ω	:	Vitesse de rotation du disque	rd/s
W	:	Index de Bond	—
χ	:	Compressibilité	—

INTRODUCTION GENERALE

Les différentes crises économiques successives connues dans le monde ces dernières années, ont eu pour conséquence la paupérisation d'une bonne partie des habitants de la planète. En effet, l'extrême pauvreté est la réalité quotidienne d'un milliard d'êtres humains qui vivent avec moins de 1 dollar par jour (ONU, 2011). L'Afrique Sud Saharienne vient en tête de cette statistique avec 47 % de personnes vivant en dessous du seuil de pauvreté. C'est à juste titre que les Nations Unies ont fixé la réduction de l'extrême pauvreté et de la faim comme le principal objectif du millénaire pour le développement. Il s'agira de réduire de moitié, entre 1990 et 2015, la proportion de la population dont le revenu est inférieur à un dollar par jour. Cet objectif peut être atteint, comme le témoigne l'exemple de l'Asie où la pauvreté a reculé de façon spectaculaire : le nombre de personnes qui vivent avec moins de 1 dollar par jour a baissé de près d'un quart de milliard entre 1990 et 2001, grâce à la croissance économique. Dans plus de trente (30) pays, la faim a été réduite d'au moins 25 % en 10 ans. Quatorze (14) de ces pays se trouvent en Afrique subsaharienne, région la plus durement touchée par la faim et la malnutrition (ONU, 2011). L'agriculture a joué un rôle central dans la réalisation de ce résultat. En effet, dans de nombreux pays du Sud, c'est l'agriculture qui a joué un rôle principal dans le décollage économique et la réduction de la faim et de la pauvreté. Stagnation économique, faim et pauvreté marquent les pays qui n'ont pu faire leur révolution agricole (Hazell, 2006). Malheureusement, beaucoup de pays africains vivent cette situation macabre. Le continent africain, avec moins de 2 % du commerce international, est confronté à de sérieuses difficultés économiques, avec pour effet une forte tendance de ses fils à émigrer vers les pays occidentaux. L'Afrique ne pourra faire face à ce défi qu'à travers le développement des activités génératrices de revenus, le renforcement du tissu économique et par l'émergence de nouvelles Petites et Moyennes industries (PMI) et Petites et Moyennes Entreprises (PME) utilisant les technologies endogènes modernes de transformation des matières premières aux fins d'en accroître la valeur ajoutée.

La réduction de la pauvreté et de la faim constitue le principal objectif du millénaire pour le développement au Bénin. A travers cet objectif, le Bénin se propose de réduire de 50 %, la proportion de la population vivant en dessous du seuil de pauvreté, en faisant passer l'indice de pauvreté à 15 % en 2015. Cet objectif ne peut être atteint qu'à travers le développement agricole qui est un levier très important. En effet, avec un PIB/habitant évalué en 2005 à US\$380 (World Bank, 2005), soit 278 000 FCFA, le Bénin est un pays pauvre dont l'économie est essentiellement basée sur l'agriculture. Le secteur agricole a contribué en moyenne pour 35,7 % au PIB (taux moyen de 2000 à 2009), pour 90 % aux recettes d'exportation d'origine intérieure, et occupe plus de 65 % de la population active (MPDEPP, 2008 ; Anonyme, 2006).

Avec un indice de développement estimé en 2011 à 0,427, le Bénin occupe la 167^{ème} place, dans la catégorie des pays à faible développement humain (PNUD, 2011). Le Bénin ne peut améliorer sa position économique sur l'échiquier international qu'en agissant sur l'un des leviers de développement de son économie : l'agriculture.

Depuis plus d'une décennie, l'Etat béninois a opté pour une politique de diversification des produits d'exportation et de la création de valeur ajoutée contribuant à une croissance élevée et à la réduction de la pauvreté. Les Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole au Bénin, adopté en 2009, met l'accent sur les défis majeurs pour l'agriculture béninoise à l'horizon 2015. Ces défis sont de trois ordres : (i) La couverture des besoins alimentaire et nutritionnel de la population ; (ii) l'amélioration de la productivité et de la compétitivité du secteur agricole et rural et (iii) et l'amélioration de l'attractivité de l'activité agricole et du milieu rural (MAEP, 2009).

Le Bénin, dans sa politique de développement, met l'accent sur le secteur agricole en général et la gestion des parcs agro forestiers en particulier. En effet, les espèces forestières alimentaires sont abondantes dans les écosystèmes forestiers africains en général et béninois en particulier. Elles contribuent à l'économie des ménages, au renforcement de la sécurité alimentaire et à la conservation de la diversité biologique des ressources forestières (Vantomme, 1999). Elles regroupent majoritairement les plantes forestières non ligneuses (fruit, feuilles, légumes, tubercules et racines etc.). Ces produits interviennent aussi dans l'alimentation de la population rurale du Bénin et font l'objet d'échanges commerciaux de grande envergure sur les marchés locaux parfois avec les pays limitrophes, toute l'année et de façon rotative. Au Bénin, dix (10) espèces ligneuses alimentaires sont classées prioritaires à cause de leur importance économique, de la menace d'extinction qui pèse sur elles et de l'existence ou non de programme de recherche ou de gestion au profit de ces espèces. Il s'agit du baobab (*Adansonia digitata*), anacarde (*Anacardium occidentale*), arbre à pain (*Artocarpus altilis*), pomme étoilée (*Chrysophyllum albidum*), tamarinier blanc (*Dialium guineense*), mangue africaine (*Irvingia gabonensis*), néré (*Parkia biglobosa*), arbre à beurre (*Pentadesma butyracea*), tamarinier (*Tamarindus indica*) et karité (*Vitellaria paradoxa*) (Dah-Dovonon, 2000). Ces espèces sont très utiles pour les populations rurales et urbaines sur plusieurs plans : alimentaire, médicinal, climatique et environnemental. Le néré (*Parkia biglobosa*), fruitier semi-domestiqué des savanes semi-arides et subhumides d'Afrique subsaharienne, qui constitue l'une de ces dix espèces, fait l'objet de notre étude.

Le néré (*Parkia biglobosa*) est un arbre répandu en Afrique de l'Ouest qui s'adapte aux sols pauvres tels que ceux faits de croûtes ferrugineuses, ainsi qu'aux zones climatiques à faible pluviométrie, de type soudanien. La graine de néré fait l'objet d'importantes transactions dans les pays Ouest Africains et son aire de consommation dépasse les régions productrices. La consommation annuelle de graine de néré au Sénégal, au Mali, en Guinée, au Bénin et au Nigeria est évaluée à plusieurs centaines de tonnes (Guttierez et al., 2000). Dans la seule région de Nigeria, près de 200 000 tonnes de graines sont collectées chaque année pour être transformées (Guttierez et al., 2000). La graine de néré est très riche en protéines et en lipides. Elle est utilisée en pharmacopée traditionnelle (Guttierez et al., 2000 ; Ouédraogo, 1995) et surtout en alimentation humaine (Ouédraogo, 1995 ; Nago et Hounhouigan, 1997). Ses condiments sont utilisés comme exhausteurs de goût et d'arôme dans la plupart des sauces qui accompagnent les pâtes de céréales ou de racines et tubercules. Du fait de leur haute valeur nutritionnelle, les condiments à base de néré contribuent grandement à l'apport nutritionnel des plats qui en contiennent. Au Bénin et dans la sous région, les populations estiment que les condiments à base de néré sont de vrais régulateurs de la tension artérielle ; ce qui suscite de plus en plus d'engouement pour leur consommation (Guttierez et al., 2000).

Les graines de néré sont transformées par fermentation en condiment connu sous différentes appellations à travers l'Afrique de l'Ouest et plus particulièrement au Bénin. Le produit est appelé dawadawa ou iru au Nigeria, soubala au Mali et en Guinée, nététou au Sénégal, afitin, iru ou sonru au Bénin. Le processus traditionnel de transformation de la graine de néré en condiment "afitin" comprend la cuisson des graines, le décorticage par foulage ou par pilage pour séparer le tégument des cotylédons, le rinçage des graines, le triage, une deuxième cuisson des cotylédons et enfin la fermentation alcaline. De toutes ces opérations, le décorticage est le plus fastidieux (il faut 3 à 6 h de foulage pour 30 kg de néré), la moins hygiénique (du sable, de la cendre ou de la sciure de bois est ajouté à la graine cuite sur un sol plus ou moins dur). Il faut environ 240 litres d'eau pour trier laver et rincer les cotylédons issus des 30 kg de néré après décorticage.

Pour moderniser l'activité et standardiser la technologie de production du "afitin," des travaux de recherche sont menés dans plusieurs pays de la sous région. Le Centre International pour la Recherche Agronomique et le Développement (CIRAD) a mis au point et testé au Sénégal et au Mali une décortiqueuse à graines sèches de néré. Le taux de décorticage qui est de 70 % est jugé relativement faible et un triage après l'opération est nécessaire (Marouzé, 2004 ; Traoré et al., 2004). car beaucoup de graines non décortiquées sont encore présentes dans les cotylédons. Le taux d'adoption de la technologie reste faible et la majorité des femmes continuent le décorticage par

fouillage aux pieds. Un taux de décortilage plus élevé est obtenu au prix d'un taux de brisure des cotylédons élevé. Une décortiqueuse à graines étuvées a été mise au point au Nigéria. Elle fournit un indice d'efficacité de 70,3 % avec une capacité horaire de 30,6 kg/h. Ces performances sont obtenues lorsque la graine est étuvée et possède une teneur en eau de 110 % (base sèche) (Adewumi and Igbeka, 1993 ; Audu et al., 2004). Comme dans le cas de la décortiqueuse du CIRAD, l'indice d'efficacité est aussi de 70,3 % et un triage suivi d'un second décortilage est nécessaire, ce qui limiterait son adoption par les transformatrices.

Au Bénin, pour lever la contrainte liée à la pénibilité du décortilage, une décortiqueuse a été mise au point par les chercheurs de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) et de l'Institut National des Recherches Agronomiques du Bénin (INRAB) en 2004. Les essais en station ont montré que la décortiqueuse a un débit de 66,67 kg à l'heure, un rendement au décortilage de 48,6 % et un taux de brisure des amandes de 10 à 11 % (Hounhouigan et al., 2004). Mais, les imperfections liées au taux de décortilage et au taux de brisure des cotylédons, limitent son efficacité et son adoption par les transformatrices. Ces imperfections sont dues essentiellement à l'hétérogénéité des graines (mélange possible de plusieurs variétés); ce qui a rendu impossible le réglage efficace du dispositif de la décortiqueuse. Cela pourrait aussi être dû au fait que les graines n'aient subi de traitement préalable (cuisson, trempage, séchage). Les études d'optimisation de cette décortiqueuse ont montré qu'elle présente ses meilleures performances techniques lorsque la vitesse de rotation de la grille est 542 tr/mn, avec un débit 300 kg/h (Ahouansou, 2005).

Une étude de caractérisation physique et mécanique de la graine de néré, en liaison avec ses différentes variétés, s'avère indispensable pour permettre la mise au point des technologies performantes, capables de mieux répondre aux attentes des transformatrices de néré, notamment en matière de développement d'équipements adaptés, dans les zones de production aussi bien au Bénin qu'en Afrique.

Au Bénin, la forte périssabilité des condiments à base de néré constitue une contrainte majeure à la conservation et la commercialisation des produits à base du néré. En effet, l'*afitin*, l'*iru* et le *sonru* traditionnels sont des produits humides et riches en éléments nutritifs. Ils constituent donc une source privilégiée de nutriments pour la croissance des microorganismes de putréfaction, ce qui rend difficile leur conservation. La conservation de l'*afitin*, de l'*iru* ou du *sonru* sous une forme physiquement et chimiquement stabilisée, de type «afitin - cube», pourrait être une alternative technologique pour lever cette contrainte. Une presse hydraulique à cubes de soumbala a été réalisée au Burkina – Faso (Bationo et al., 2004). Cette presse a une capacité de 1200 cubes à l'heure. Les meilleures

performances de la presse sont réalisées avec une pression au vérin de 100 bars, un taux d'humidité de la poudre de soubala de 10 %. Les imperfections du moule, les problèmes d'ergonomie liées à la trémie, le cout élevé de l'équipement et la non disponibilité du vérin hydraulique automatisé et adapté à l'équipement, sont les principales contraintes liées à cette presse (Bationo et al., 2004).

L'objectif général de cette étude est de contribuer au développement de la filière nééré au Bénin, à travers la réduction des contraintes liées à la pénibilité du décortilage, d'une part, et à la conservation du afitin, de l'autre.

De façon spécifique, il s'agira de :

- réaliser la caractérisation physique et mécanique de la graine de nééré
- réduire la pénibilité de l'opération du décortilage, par la mise au point d'un système (équipements et type de traitement) efficace de décortilage des graines de nééré,
- améliorer les conditions de conservation de l'*afitin*, de l'*iru* et du *sonru* par la mise au point d'une presse à cube de nééré.

Deux hypothèses sont émises dans le cadre de cette étude :

- La mise au point d'un système performant de décortilage de graines de nééré permettrait de réduire la consommation du bois de feu et d'eau nécessaires à la transformation des graines et, par conséquent, de porter moins atteinte à la dégradation de l'environnement.
- La réduction de l'activité de l'eau et le formatage en cubes (réduction du potentiel d'oxydo-réduction) de l'*afitin*, de l'*iru* et du *sonru*, permettraient de lever la contrainte de périssabilité de ces produits et d'envisager leur production à grande échelle pour le marché national, régional et international.

Le présent mémoire s'articule autour de six (06) chapitres. Le premier aborde la revue bibliographique sur la graine de nééré, sa transformation et les mécanismes physiques régissant le décortilage. Le deuxième est consacré à la caractérisation physique et mécanique des graines du nééré *Parkia biglobosa* brutes mais également celle acquise suite aux différents types de prétraitements qui leur sont assurés. Le troisième a étudié les effets des différents prétraitements appliqués aux graines de nééré sur l'efficacité du décortilage mécanique. Le quatrième chapitre est dédié à l'optimisation des performances techniques de la décortiqueuse des graines de nééré et le cinquième est consacré à l'évaluation des performances techniques et économiques de la décortiqueuse à graines de nééré réalisée. Le sixième est réservé à la mise au point de la presse à cubes de nééré et à l'évaluation de ses performances techniques.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE:

NERE ET PRODUITS DE TRANSFORMATION DE SES GRAINES - MECANISMES DU DECORTICAGE

1.1. Généralités sur le néré

1.1.1. Caractéristiques de l'arbre de néré

Le néré (*Parkia biglobosa*) est un arbre sahélien que l'on retrouve sur les continents africain, asiatique et sud-américain (Guttierez et al., 2000). Sa zone géographique est comprise entre les vingtièmes parallèles nord et sud de part et d'autre de l'équateur. Il s'adapte aux zones caractérisées par une faible pluviométrie ainsi qu'aux sols pauvres (croûtes ferrugineuses) que l'on rencontre en Afrique de l'Ouest. On le retrouve en Afrique, principalement dans les zones climatiques de type soudanien.

Au Bénin, l'arbre est plus répandu dans les départements du Zou, Collines, Borgou, Alibori, Donga et Atacora. On le retrouve, de manière clairsemée, dans les champs et terrains en jachère souvent associée au karité. Cet arbre, de la famille des légumineuses, entre en production alors qu'il n'est qu'un arbuste à l'âge de 8 à 10 ans. Il n'atteint sa taille définitive de 10 à 20 m qu'entre 30 et 50 ans (Guttierez et al., 2000 ; Abgahoungba et Depommier, 1989).



Photo 1-1 : Arbre de néré

L'arbre de néré possède de nombreuses vertus reconnues. On emploie les écorces et les racines, associées à d'autres végétaux, pour guérir la stérilité, les bronchites, les tranchets, les pneumonies, la lèpre, les maladies vénériennes (Guttierez et al., 2000). Les écorces sont utilisées pour guérir les ostéopathies, les oreillons. Une thèse en pharmacologie réalisée en Côte d'Ivoire a prouvé l'existence d'un champignon vivant en symbiose sur le tronc du néré dont les vertus sont anti-hémorroïdaires.

Depuis quelques années, on assiste au vieillissement des nérés au Sénégal, Burkina Faso, Bénin, Côte d'Ivoire. Ceci a pour conséquence la chute des quantités de graines disponibles sur le marché béninois et l'augmentation des prix. Cette situation a amené les autorités béninoises à inscrire cet arbre sur la liste des espèces à protéger. Tout abattage sans l'autorisation des services compétents est interdit. Toute comme cela se fait à Djougou pour le karité, des actions de création de vergers de néré doivent être entreprises afin d'assurer un renouvellement du parc à néré à moyen et long terme.

1.1.2. Caractéristiques de la gousse de néré

La graine du néré est obtenue à partir des gousses agencées par grappes qui pendent à l'extrémité d'un long pédoncule. Les gousses ont une longueur comprise entre 12 et 30 cm (Odunfa, 1985). Chaque gousse peut contenir jusqu'à 23 graines (Hokpins, 1983). A l'intérieur de chaque gousse, sont logées des graines marron claire, entourées d'une pulpe jaune. Ces graines parviennent à maturité au mois d'Avril ou Mai, selon les latitudes (Guttierez et al., 2000).



Photo 1-2 : Grappe de gousses fruits de néré

La composition de la gousse est représentée de la façon suivante (Rateau, 1995 ; Rateau, 1993).

- la cosse représente 43 % de la masse du fruit ;

- la pulpe représente 39 % de la masse du fruit ; elle est consommable ;
- les graines représentent 18 % du fruit ; la partie comestible des graines se situe à l'intérieur d'une enveloppe bien plus épaisse et plus dure que celles rencontrées d'ordinaire chez les légumineuses.

Un arbre produit en moyenne entre 25 à 100 kg de gousses par an. Ce rendement est variable d'un arbre à l'autre et d'une année à l'autre. La pulpe de la gousse a des propriétés laxatives. Elle est souvent consommée dans les mois qui suivent la récolte. Très riche en saccharose, elle constitue un excellent aliment énergétique. Elle se consomme à même la gousse ou bien délayée dans de l'eau. Le plus souvent, la pulpe est consommée par les propriétaires de néré et son commerce est bien plus localisé que celui des graines. Cette pulpe est exportée vers le Niger où elle est utilisée pour faire une sorte bouillie consommable.

1.1.3. Caractéristiques de la graine de néré

1.1.3.1. Utilité de la graine de néré

La graine de néré est composée de coque et de cotylédons. Elle agit comme un régulateur de tension (Guttierez et al., 2000). C'est cette réputation qui induit en partie une hausse de la consommation du 'afitin', un produit fermenté à base des graines, au cours de ces 10 dernières années (Guttierez et al., 2000). La graine est la principale ressource tirée du néré. Son aire de consommation dépasse largement les régions productrices et son usage alimentaire concerne aussi bien les populations rurales qu'urbaines.

Tableau 1-1 : Composition chimique de la graine (Odunfa, 1985)

	Grammes pour 100 grammes de graines	
	Crue	Fermenté
Eau	7,33	14,8
Protides	34,6	35
Lipides	21	29
Glucides totaux	32	16,4
Matière minérale	4,3	4,8

La graine est riche en protéines et en lipides. Le produit fini, le plus répandu, est le condiment obtenu par fermentation de la graine et destiné pour assaisonner les sauces. Il est appelé afitin, iru ou sonru au Bénin. Elle a non seulement de fortes vertus organoleptiques, mais aussi nutritives. Dans certaines régions, et pendant les périodes de soudure, ce condiment remplace la viande ou le poisson, du fait de sa teneur en protéines. Amère et tonique, la graine est aussi utilisée à la place du café. On extrait de la graine une huile jaunâtre.

1.1.3.1. Critères de choix de la graine de néré

Les graines les plus appréciées au Bénin pour la fabrication de l'afitin sont celles en provenance de Djougou et Parakou. Elles sont relativement faciles à décortiquer et ne posent pas de problème de nettoyage préalable à la première cuisson. Les critères de choix des graines par les transformatrices au marché sont (Guttierez et al., 2000) :

- la teneur en eau : (les transformatrices préfèrent l'ancienne graine, bien sèche, à la nouvelle qui est pleine d'eau) ;
- la densité de la graine: « Si la graine n'est pas de bonne qualité, il y a du vide dans la graine et, au lieu de prendre de volume à la cuisson, elle en perd; c'est que la graine n'est pas bien mûre » ;
- la dureté de la graine : c'est un autre critère pour connaître son état de déshydratation. Les transformatrices cassent la graine entre les dents pour reconnaître si elle est mûre et bien séchée. Si la graine fait mal aux dents, alors elle est bonne.
- les restes de pulpe jaune autour des graines : ils constituent aussi un critère important « les graines qui forment des amas ne sont pas des graines de qualité. Si la gousse est mal dépulpée, elle moisit. Ceci est source de diverses contaminations ».

1.1.4. Diversité génétique de la graine de néré

L'étude de la diversité génétique du *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth au Burkina Faso a révélé une certaine richesse allélique (nombre moyen d'allèle par locus = 5) (Sibidou et al., 2004), un polymorphisme important (entre 62 et 100 %) et une forte diversité génétique ($H=0,34$) comparable à celle de *Faidherbia albida*. L'étude a par ailleurs, mis en évidence une différenciation entre les populations et suggérant ainsi un échantillonnage d'un grand nombre de populations réparties sur

l'aire de distribution, dans le cadre de l'élaboration d'une stratégie de conservation des ressources génétiques de *Parkia biglobosa*.

1.2. Technologies de transformation de la graine de néré

1.2.1. Technologie traditionnelle de production de l'afitin

Les modes de transformation de la graine varient d'une région à l'autre. Présent sur de nombreux marchés africains, le condiment obtenu de la transformation de la graine se rencontre sous différents appellations: afitin, iru et sourou au Bénin et au Togo, nététo au Sénégal, soumbala au Mali, au Burkina Faso et en Guinée, et encore iru ou dawadawa au Nigéria.

1.2.1.1. Technologie traditionnelle de production du afitin fon

La technologie de production du afitin fon est illustrée sur la figure 1-1 ci-dessous. Elle comprend les opérations suivantes :

- nettoyage/lavage et première cuisson des graines
- décorticage par foulage ;
- premier rinçage des graines foulées ;
- premier triage et deuxième triage ;
- deuxième rinçage et égouttage ;
- fermentation en anaérobiose , salage et broyage.

Le nettoyage et le lavage sont réalisés pour débarrasser les graines de la pulpe et des impuretés. Les graines sont trempées dans l'eau pendant 1 heure environ. Après le lavage, les graines sont soumises à la première cuisson. Celle-ci consiste à tempérer les graines lavées, en les réchauffant en présence d'une quantité abondante d'eau, afin de ramollir la coque, pour qu'elle soit facile à enlever et ne garder que les cotylédons. D'une durée de 10 heures environ, cette opération prépare les graines au décorticage et à la fermentation (Azokpota et al., 2006_a). Le décorticage permet de séparer les téguments des cotylédons de la graine. Les graines cuites, égoutées et encore tièdes sont étalées sur un sol balayé et assez dur pour qu'elles ne s'enfoncent pas. Pour faciliter le décorticage, l'opératrice saupoudre sur les graines, soit de la sciure, soit du sable selon la disponibilité. Le décorticage est réalisé parfois dans les mortiers. Le décorticage est l'une des deux opérations, après le broyage, les plus pénibles dans le processus traditionnel de fabrication de l'afitin. Il demande une bonne endurance (Guttierez et al., 2000). On compare l'opération de décorticage de 30 kg de graines néré à une « marche à pieds rapide et déhanchée d'environ 2 heures sous un soleil brûlant (Guttierez et al., 2000). Cette opération est effectuée soit par la transformatrice elle-même, soit par la main d'œuvre locale.

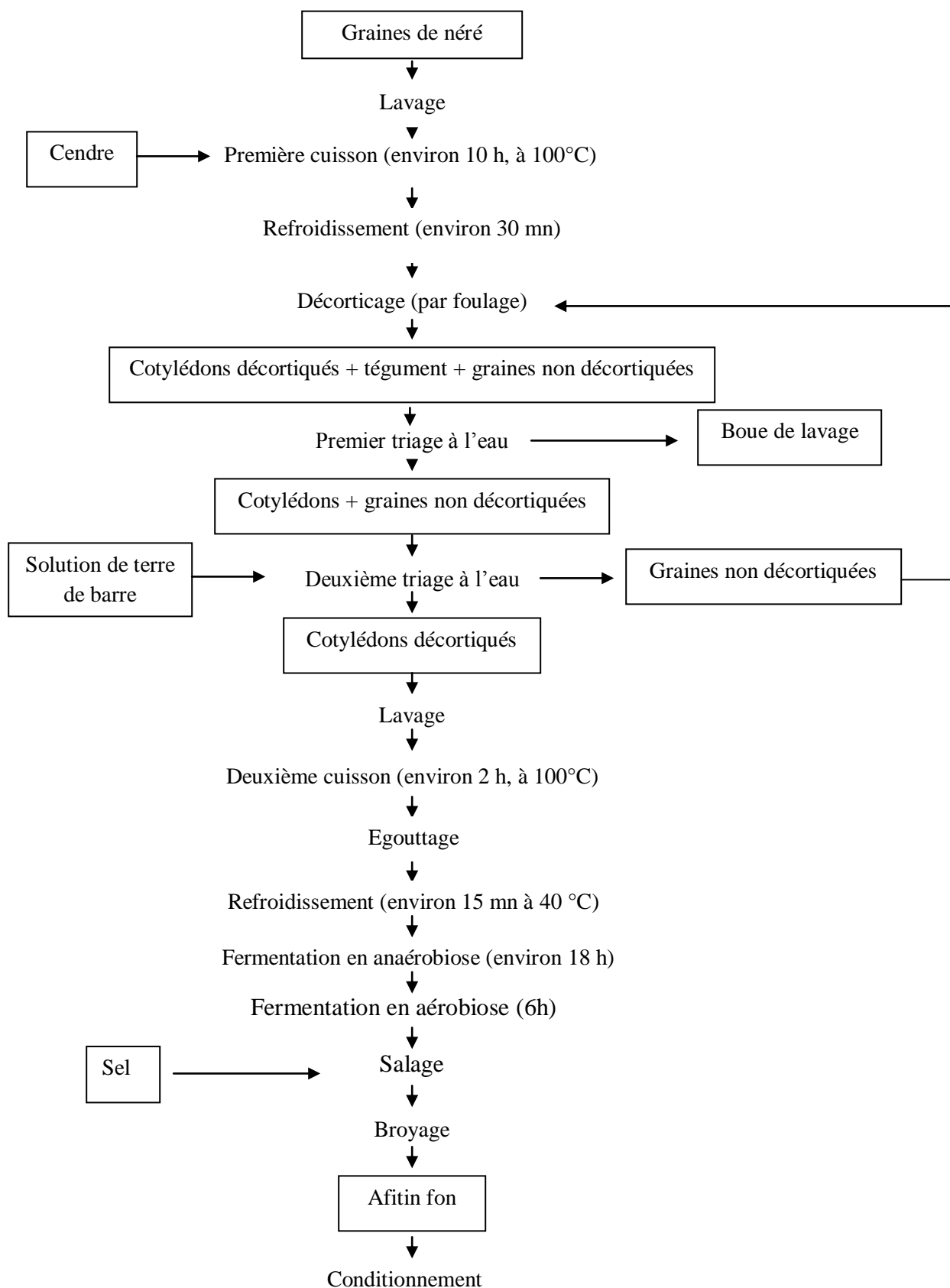


Figure 1-1 : Diagramme technologique de fabrication du afitin (méthode fon)
(Source Hounhouigan et al., 2001)

Le décortiquage est suivi du premier rinçage des graines foulées. Il permet de débarrasser les cotylédons de leur enveloppe déjà ramolie. Ceci nécessite entre 1 h à 1 h 30 mn et environ 50 à 80 litres d'eau, pour rincer 30 kg de graines. Après le rinçage, les graines mal débarrassées de leur tégument, plongées dans une solution boueuse, ne remontent pas à la surface lors de la phase du triage qui suit celle de rinçage. L'opération de triage consiste à séparer les cotylédons cuits, les coques, les graines non-cuites et les graines encore mal décortiquées. Elle s'effectue par trempage des graines dans l'eau mêlée à la terre de barre. Les graines non cuites, piégées dans la boue, sont récupérées et soumises une fois de plus, à une cuisson, lors d'un nouveau cycle de production ou alors séparément. Ensuite, on effectue le deuxième rinçage réalisé sur les cotylédons triés, afin d'enlever la terre de barre et les impuretés restantes .

Les cotylédons propres ainsi obtenus subissent une deuxième cuisson qui permet de les débarrasser de la substance toxique, "divè" (Guttierez et al., 2000) d'une part, et à la fermentation de se dérouler correctement, d'autre part. Les cotylédons sont ensuite égouttés à l'aide d'une passoire. Ils sont répartis en couches fines où ils se refroidissent et se débarrassent de l'excès d'eau qu'ils contiennent. Selon les transformatrices : « les graines ne doivent plus être avec l'eau après avoir effectué la deuxième cuisson, il faut bien enlever l'eau avant de les mettre à fermenter, sinon elles se gâteront et le produit sentira mauvais (Guttierez et al., 2000).



Photo 1-3 : Décortiquage par foulage aux pieds des graines de néré

La fermentation est réalisée à l'aide des toiles. Les cotylédons enveloppés dans les toiles sont mis dans des paniers superposés. Ces paniers sont surélevés à l'aide des petites boîtes. L'amas de paniers de toiles est entouré de sacs de riz (en polyéthylène) propres, puis de toiles de jute. Dans la technologie fon, l'opération se déroule en général suivant deux phases: une phase anaérobie qui

de 18 h et une phase aérobie qui dure 6 à 18 h. La fermentation du produit entraîne des changements physico-chimiques importants qui se traduisent par l'élévation de la température, l'augmentation du pH et de la matière sèche, la diminution du taux de protéines et de la teneur en azote basique volatil total (ABVT) (Hounhouigan et al., 2001_a; Hounhouigan et al., 2001_b). Les bacillus constituent l'essentiel de la flore totale de fermentation (Hounhouigan et al., 2001_b; Diawara, 1993). En plus des bacillus, on dénombre également des entérobactéries, des levures et moisissures faiblement représentées et considérées comme des agents contaminants.

Après la fermentation, le produit subit le salage. Le sel améliore la qualité du produit, puisqu'il permet une meilleure conservation de l'afitin et évite à l'odeur nauséabonde de se développer après fermentation. Le salage est suivi du broyage partiel qui confère au produit sa texture finale; il est réalisé à l'aide de meule dormante. Il faut environ 2 h30 mn à 3 h pour broyer du afitin obtenu à partir de 30 kg de graines de néré. Une fois broyé, l'afitin en pâte est déposé dans un panier profond tapissé d'une toile de sac de riz en polyéthylène. L'afitin est vendue sous forme de boules de diamètres variables (4 à 10 cm) selon le prix.

1.2.1.2. Spécificité du "afitin" yoruba

Le diagramme technologique de production du "afitin" yoruba est presque semblable à celui du "afitin" fon. Néanmoins, on remarque quelques spécificités. L'afitin yoruba utilise une seule fermentation en anaérobie avec ajout de divers ingrédients (piment, sel, etc) après la seconde cuisson. Ceci lui confère des propriétés organoleptiques et physico-chimiques spécifiques. Le produit afitin yoruba a une odeur piquante, un goût légèrement amer et une couleur noirâtre. Il a une charge microbienne plus importante (Azokpota et al., 2001).

1.2.1.3. Technologie de production du "sombala"

Le sombala est fabriqué au Sénégal à partir d'une dizaine d'opérations dont les plus pénibles sont celles de la cuisson prolongée et du décorticage par pillage au début du processus. Les opérations de production du sombala diffèrent, de celles du afitin, essentiellement par le fait que le produit subit le séchage après la fermentation. Ensuite, il subit un traitement à la vapeur puis un deuxième séchage. Le produit sec obtenu est moulu et conditionné sous forme de poudre (Devenet, 2001).

1.2.1.4. Contraintes liées à la production artisanale du ‘‘afitin’’

La matière première utilisée pour la fabrication du ‘‘afitin’’ est la graine de néré. Les graines sont obtenues à partir des populations naturelles du néré (*Parkia biglobosa*), arbre n’ayant jusqu’à présent pas fait l’objet d’une sylviculture ciblée à large échelle au Bénin et dans la sous-région.

La majorité des arbres sont vieillissants. Par conséquent, le constat est celui d’une irrégularité dans la disponibilité des graines de néré, d’une année à l’autre, selon les résultats de fructuation des arbres dans leur milieu naturel.

Pour obtenir la graine de néré, il faut débarrasser la gousse de la cosse et la graine de la pulpe. L’écoassage et le dépulpage sont réalisés par les femmes par pillage ou par battage. Ces deux opérations, très pénibles et contraignantes pour les femmes transformatrices, n’ont pas jusque là retenu l’attention de la recherche.

De toutes les opérations de transformation des graines en condiment, le décortilage est la plus fastidieuse. Il faut 3 à 6 h de foulage pour 30 kg de graines néré. C’est aussi la moins hygiénique, car du sable, de la cendre ou de la sciure de bois sont ajoutés aux graines précuites, sur un sol plus ou moins dur, avant d’être foulées, avec les pieds (Guttierez et al., 2000). De plus, le décortilage, tel qu’effectué dans les procédures décrites jusque-là, nécessite assez d’eau pour la précuisson des graines de néré (60 litres d’eau environ pour 30 kg de graines de néré) et pendant 12 à 72 h (suivant les types de graines) au feu de bois. Par ailleurs, à cause de l’utilisation du sable, de la cendre ou de la sciure de bois, il faut environ 240 l d’eau pour laver, rincer et trier les 30 kg de néré après décortilage. L’utilisation du sable pour faciliter le décortilage peut introduire dans du ‘‘afitin’’ des impuretés et des micro-organismes ‘‘indésirables’’ (Diawara et Diasso, 2004 ; Azokpota, 2005).

La technologie traditionnelle est consommatrice de temps. En effet, un cycle de production dure trois jours, à cause de la longue période consacrée à la seule phase de fermentation. Les procédés traditionnels de fabrication du ‘‘afitin’’ sont, non seulement consommatrices d’efforts physiques, de temps et d’eau, mais aussi de bois. Les deux cuissons durent au total en moyenne 12 h, à raison de 4 h à feu vif et 6 h à feu doux, pour la première cuisson et 1 h à feu vif pour la deuxième cuisson.

Les difficultés périodiques d’approvisionnement en graines de néré conduisent parfois les femmes transformatrices à la recherche d’autres graines alternatives pour remplacer celles de néré dans la fabrication du afitin (Kone, 2001). Ainsi, d’une zone à une autre, les graines suivantes servent comme substitut à celles de néré dans la fabrication du sumbala ou du ‘‘afitin’’. Il s’agit des:

- graines de baobab (*Adansonia digitata*) ;

- graines d'arachides (*Arachis hypogaeae*) ;
- graines de soja (*Glycine max.*).

Cette situation pose le problème de la qualité et de l'authenticité du produit "afitin".

Le broyage du afitin à l'aide des meules constitue aussi une opération fastidieuse et pénible. Le mode de conditionnement du "afitin" au Bénin ne permet pas de conserver le produit pour une longue période. La non standardisation des opérations constitue le problème majeur qui se pose à la technologie traditionnelle de production du "afitin". En effet, la durée du décorticage n'est pas maîtrisée, aussi la durée de la fermentation peut varier de deux à trois jours. Les différences dans le temps de fermentation induisent probablement des différences de goût. De même, les durées de la première et deuxième cuisson varient du simple au double et parfois plus.

1.2.2. Technologie améliorée de production d'afitin

Dans le but de lever les contraintes liées à la production artisanale de l'afitin, un certain nombre d'innovations ont été introduites dans le processus de transformation. Dans ce cadre, on peut noter :

- la mise au point d'une décortiqueuse, réalisée au Sénégal par une équipe de chercheurs sénégalais, en collaboration avec le CIRAD dans les années 90, pour réduire la pénibilité du décorticage des graines de néré. Cette décortiqueuse a été testée au Burkina Faso. Les résultats des tests ont montré que le décorticage mécanique permet d'obtenir un double avantage qui modifie la chaîne de production traditionnelle. Le premier réside notamment dans la suppression de la première cuisson (très consommatrice de bois) et du lavage après pilage (très consommatrice d'eau et source de pollution, figure 1-2). Le second avantage se situe au plan économique où l'étude a montré une supériorité des charges de production du soubala traditionnel par rapport au procédé mécanisé. L'économie réalisée à ce titre est estimée à 363 FCFA/kg de soubala avec l'introduction de la décortiqueuse (Diawara and Jakobsen, 2004). Cette économie est essentiellement liée à une diminution de la consommation d'eau, de bois ainsi qu'à une réduction du personnel. Le produit présente une meilleure coloration et se trouve mieux apprécié par les consommateurs selon les sondages et les tests de dégustation effectués ;
- dans le souci de renforcer la qualité et l'utilisation pratique du soubala, il a été mis au point, au Burkina Faso, des presses à soubala pour la fabrication artisanale et semi industrielle des cubes de soubala (Bationo et al., 2004).

Cette presse est constituée de trois parties principales :

- ✓ un système de pressage et de démoulage constituée d'un couple matrice mâle et femelle, de la table de pressage, du vérin et d'une pédale de démoulage ;
 - ✓ un système d'alimentation en poudre constitué d'une trémie ;
 - ✓ un système d'évacuation des cubes constitué d'une bande entraînée par 2 rouleaux ;
- l'introduction du hachoir manuel a permis de mécaniser le broyage qui est aussi l'une des contraintes liées à la pénibilité de la production du "afitin" ;
 - l'introduction d'un four à sciure de bois qui a permis la valorisation de la sciure et la réduction de la consommation du bois de chauffe. L'utilisation de ce type de four est assez répandue dans la région de Saclo au Bénin où l'Office National du Bois (ONAB) produit d'importante quantité de sciure;
 - la tentative de conditionnement du "afitin" en poudre pratiquée par certaines femmes du village de Saclo dans la région de Bohicon favorise une meilleure conservation de ce produit. Les graines sont grillées après fermentation, broyées sur la meule et tamisées. La poudre d'afitin est mise ensuite dans de petits sachets. Ceci augmente la durée de conservation et valorise mieux le produit ;
 - la mise au point d'un bac de fermentation en bois, de forme parallélépipédique par l'équipe du Professeur Hounhouigan de la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) au Bénin (Hongbete and Hounhouigan, 2003). Ce bac permet de mieux contrôler la fermentation favorisant ainsi la standardisation du processus de fermentation et l'amélioration des règles d'hygiène pendant la fabrication du afitin.

En outre, les changements physico-chimiques et microbiologiques intervenant au cours de la fermentation naturelle de la graine de néré ont été étudiés. Les résultats ont montré que les *bacillus* constituent l'essentiel de la flore totale. Ceci permettra à moyen terme de mieux contrôler et standardiser la fermentation.

Les différentes innovations ci-dessus citées sont introduites de façon isolée et sporadique dans le processus de transformation. Il est important et indispensable que, de façon cohérente et soutenue, ces innovations soient intégrées durablement dans le processus technologique afin d'impulser une modernisation de la filière néré.

1.3. Mécanisation du décortiquage des graines de néré

La figure 1-2 présente le flux comparatif des opérations de préparation du soubala entre le procédé traditionnel et celui partiellement mécanisé.

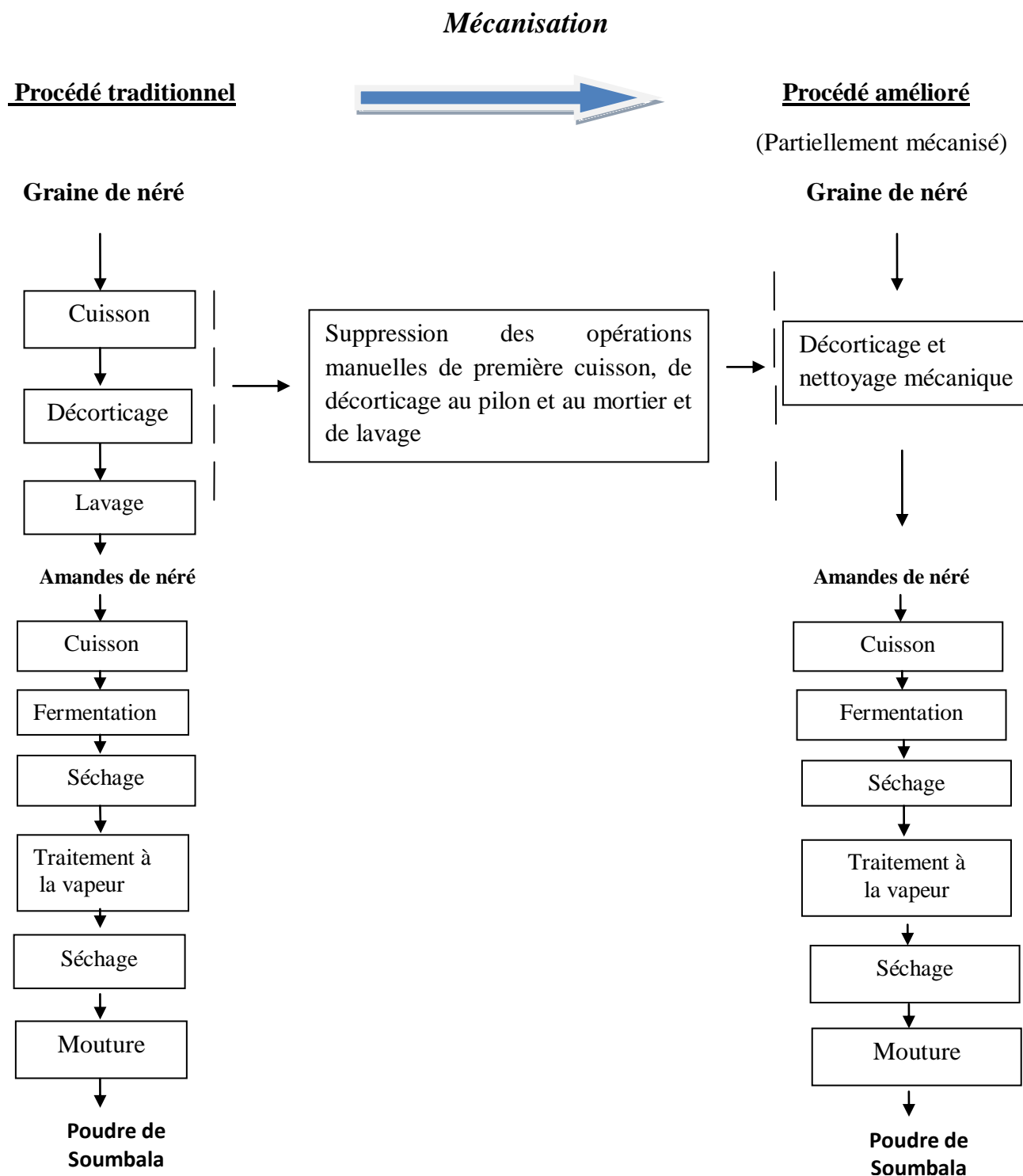


Figure1-2 : Flux comparatif des différentes opérations de fabrication du soubala de néré (Infogate, 2011) selon les procédés traditionnels et améliorés (décortiqueuse CIRAD).

Les différentes tentatives de décortilage du néré se classent en deux catégories : la première est celle du décortilage à sec de la graine et la seconde est relative au décortilage après un traitement dit d'étuvage.

La première tentative de mécanisation du décortilage à sec de la graine de néré a été réalisée par la société Brimex en 1980. Elle a mis au point une décortiqueuse dans le cadre du projet de développement du néré à Ploufragan (Côte-d'Ivoire) (Michel, 1999). Très peu d'informations sont disponibles sur les performances de cet équipement. Les tentatives sérieuses de mécanisation du procédé ont été réalisées par le CIRAD en collaboration avec les chercheurs du Sénégal et du Burkina-Faso. En 1990, une décortiqueuse à graines de néré a été mise au point et réalisée au Sénégal où elle a fait l'objet des tests. Cette décortiqueuse motorisée a été introduite en entreprise de production du soubala (TECAL-NANDJI) en août 1997 au Burkina Faso (Traoré et al., 2004). En 2004, les chercheurs de la FSA et de l'INRAB au Bénin ont également mis au point une décortiqueuse de néré (Hounhouigan et al., 2004). Elle a été testée en station mais ses performances restaient à optimiser. La technologie de décortilage des graines prétraitées a été expérimentée au Nigeria dès 1998. Les graines subissent un traitement d'étuvage à la vapeur avant le décortilage.

1.3.1. Décortiqueuse CIRAD

1.3.1.1. Description et principe de fonctionnement

L'équipement est constitué de deux parties essentielles : un module de décortilage et un module de séparation, le tout monté sur un châssis mécano soudé constitué essentiellement de tubes rectangulaires. L'ensemble du système est muni de deux moteurs électriques destinés à produire de l'énergie mécanique (l'un pour le module de décortilage et l'autre pour le module de séparation) (Marouzé, 2004).

Tableau 1-2 : Performances de la décortiqueuse CIRAD (Diawara and Jakobsen, 2004)

Paramètre	Unité	Valeur
Débit de décortilage moyen	kg/h	76
Consommation énergétique	Wh	18,1
Rendement sortie amande	%	56,25
Rendement en amandes propres	%	44,4
Efficacité de la décortiqueuse	%	70

Le décortiquage est effectué par cisaillement des graines entre les deux tôles perforées en acier de haute résistance. Les graines sont prises dans les trous oblongs du stator et frottées après cisaillement entre les tôles du rotor. Le ventilateur aspire les coques et les fines brisures tandis que les amandes et les graines non décortiquées, plus lourdes, continuent leur chute dans le bac de récupération. Les coques aspirées, sous l'effet du ventilateur, sont projetées sur une toile avant d'échoir leur course dans le bac de récupération des déchets.

1.3.1.2. Possibilités d'amélioration de la décortiqueuse

Le taux de décortiquage qui est de 70 % est relativement faible et doit être amélioré. Beaucoup de graines non décortiquées sont encore présentes dans les cotylédons. De plus, un effort de maîtrise de la fabrication locale de la machine doit être fait. L'équipement ne peut être entièrement fabriqué au Burkina Faso. Certaines pièces de l'équipement (les plus complexes) sont réalisées au CIRAD en France. Les grilles de décortiquage, pièces centrales de la décortiqueuse sont fabriquées dans une entreprise française. Ce qui pose un problème de coût et de disponibilité. L'utilisation de moteur électrique pourrait limiter l'accessibilité de l'équipement dans les zones rurales où l'énergie électrique n'est pas disponible. L'adaptation d'un système favorisant l'utilisation d'un seul moteur, au lieu de deux, pourra favoriser la réduction du coût de l'équipement et améliorer son ergonomie.

1.3.1.3. Adaptation de la décortiqueuse CIRAD au Burkina Faso

Le Département de Mécanique de l'Institut de Recherche des Sciences Appliquées et de Technologie (IRSAT) du Burkina Faso a depuis 2000, mené des travaux d'amélioration des performances de la décortiqueuse du CIRAD. Ces travaux ont permis de modifier le cyclone pour une meilleure efficacité, ce qui permet de réduire l'expansion des poussières dans la salle de décortiquage, d'adapter un seul moteur thermique au lieu de deux pour animer le décortiquage et le nettoyage. Cet équipement présente une capacité horaire de 102,16 kg/h, un rendement moyen de 55,17 % et un taux d'efficacité de 83 %. Ces résultats sont atteints au prix des opérations supplémentaires de nettoyage et criblage des graines, un trempage des graines pendant 5 h suivi d'un séchage au soleil pendant 4 h.

Le taux d'efficacité de 83 % impose un triage des graines non décortiquées et des coques à raison de 0,61 kg/h. C'est dire qu'il faut mettre entre 3 à 4 heures pour réaliser le triage après le décortiquage de 30 kg de graines. Aussi, la nécessité de sécher les graines au soleil pendant 5 h pose des problèmes d'adaptation aux conditions climatiques humides du Bénin surtout pendant la saison des pluies (IRSAT, 2008 ; Ahouansou et al. , 2006_a). Les fiches techniques soumbala ne mentionnent pas le taux de brisure des cotylédons qui pourraient être élevés avec l'équipement alors que les cotylédons

décortiqués traditionnellement ont un faible taux de brisure (IRSAT, 2009). Les études d'acceptabilité révèlent que 65 % des ménages apprécient le soubala traditionnel par rapport à celui obtenu par le décortiquage mécanique (Lingani-Sawadogo et al., 2003). C'est dire que des améliorations sont nécessaires sur l'équipement pour faire accepter le soubala obtenu mécaniquement.

1.3.2. Décortiqueuse UAC-INRAB

1.3.2.1. Description et principe de fonctionnement

La décortiqueuse UAC-INRAB a été mise au point en 2004, par des chercheurs béninois, dans le but de réduire la pénibilité de décortiquage des graines de néré et de promouvoir ce produit tant apprécié par les béninois et menacé par les cubes maggi importés. La mise au point de cet équipement vient compléter les travaux réalisés par les chercheurs du CIRAD, du Sénégal et du Burkina-Faso.

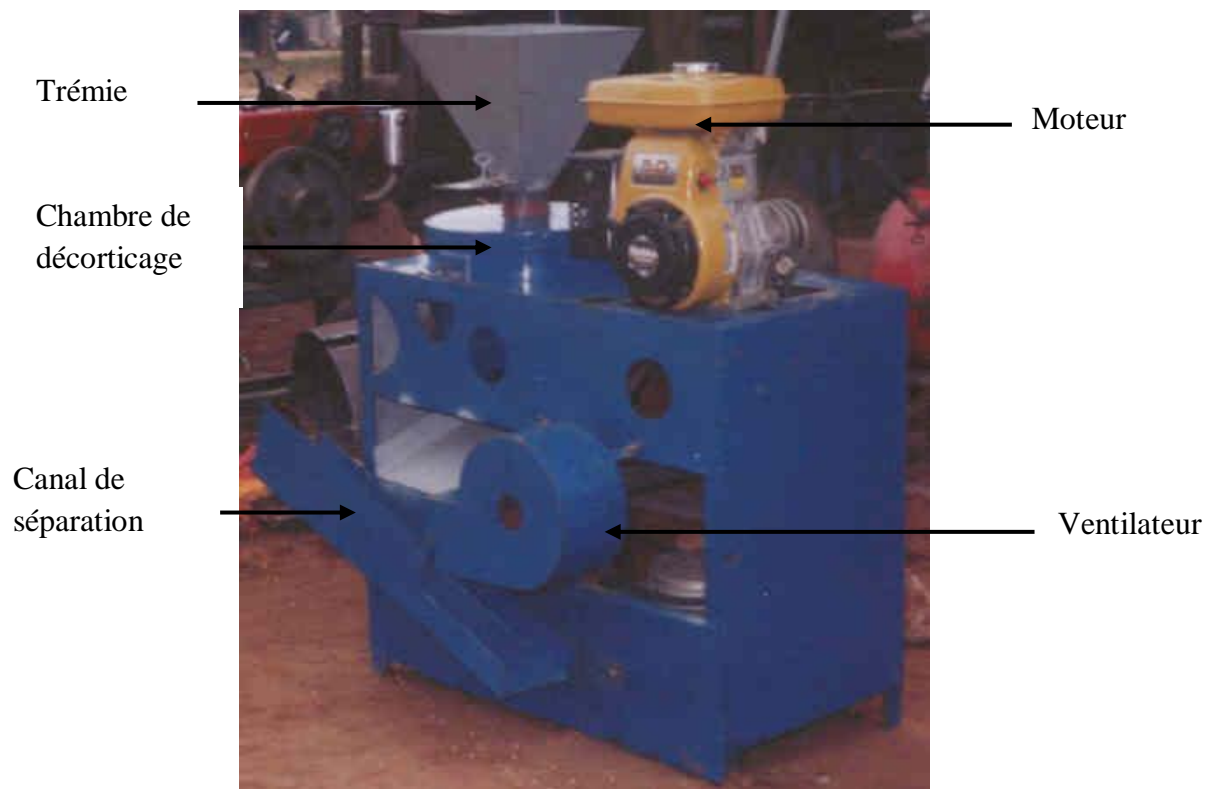


Photo 1- 4 : Décortiqueuse de néré UAC/INRAB

La décortiqueuse est composée des parties suivantes :

- le bâti mécano soudé ;
- le moteur thermique de 5 cv ;
- la cage de décortiquage ;

- le système de réglage du jeu ;
- la trémie ;
- le système de vannage ;
- la transmission.

Le bâti mécano soudé supporte l'ensemble du dispositif (Photo 1-4). Il est réalisé en fer cornier de 40 mm. La trémie de forme conique est réalisée en tôle inox d'épaisseur 1,5 mm. Le moteur thermique est un moteur à essence de type ROBIN EY 20 de puissance 5 cv. La vitesse nominale de l'axe du moteur est 4000 tours/mn. Il actionne le système de décortiquage et celui de vannage. Le système de décortiquage est la pièce principale de la décortiqueuse. Il est composé de deux plateaux ; l'un fixe et l'autre mobile. Sur ces plateaux sont fixées des grilles faites de tôle perforée. La tôle acier de haute résistance. Le plateau mobile est fixé sur un axe vertical supporté par deux roulements à palier. Cet axe est solidaire du système de réglage du jeu entre les deux plateaux. Le système de vannage est composé d'un ventilateur entraîné par le moteur par le biais d'une courroie.

Le moteur, mis en marche, entraîne par le biais de la transmission, le plateau mobile et le ventilateur. Les graines versées dans la trémie sont entraînées dans l'espace entre les 2 grilles où elles sont décortiquées par cisaillement. Le mélange coques, cotylédons et graines non décortiquées, dès la sortie de la cage de décortiquage, est dirigé par un canal vers le flux d'air entretenu par le ventilateur. Les coques et particules fines sont alors séparées des cotylédons et graines non décortiquées sous l'effet combiné de la pesanteur et de la force de l'air.

1.3.2.2. Performances de la décortiqueuse FSA-INRAB

Les performances techniques de la décortiqueuse FSA-INRAB mise au point au Bénin sont présentées dans me tableau 1-3.

Tableau 1-3 : Performances techniques de la décortiqueuse (Hounhouigan et al., 2004)

Capacité horaire (kg/h)	Teneur en eau (%)	Rendement en amande propre (%)	Rendement en amande propre de référence (%)	Taux de brisures des cotylédons (%)	Efficacité décortiqueuse (%)
66,67	5,71	50	44	11,97	77,32

Les résultats du tableau 1-3 montrent que le rendement de la décortiqueuse est plus élevé que celui obtenu sur celle conçue par le CIRAD et testé au Burkina Faso: 44 % (Traoré et al., 2004 ; Diawara and Jakobsen, 2004). Avec une efficacité moyenne de 77,32 %, elle paraît même plus intéressante que celle du Burkina Faso (efficacité de 70 %). Mais, il faut remarquer que l'équipement du Burkina Faso traite 76 à 102 kg de graines à l'heure contre 66,67 kg (considérant la capacité horaire qui donne les meilleurs résultats). De plus, le taux de brisure des cotylédons n'ayant pas été mentionné par les auteurs (Traoré et al., 2004), il est difficile de faire une comparaison complète des deux équipements. Le taux de brisures moyen obtenu, pour un taux de décortilage de 50 %, est de 11,97 % sur le présent équipement testé. Aussi, les tests d'acceptabilité ont montré qu'il existe une différence significative pour la couleur entre l'afitin traditionnel et celui obtenu mécaniquement. En effet, l'afitin issu du décortilage mécanique obtient une note moyenne de 3 contre 4 dans le cas du afitin issu du décortilage traditionnel (Oje, 1993).

1.3.3. Expérience du Nigeria

Les travaux de mécanisation du décortilage des légumineuses ont été réalisés également au Nigeria à l'Université de Maïduguri (Kone, 2001 ; Reichert et al., 1979 ; Despande et al., 1982). Ils ont montré que le simple trempage dans l'eau à 30°C des graines n'améliore pas l'efficacité du décortilage mécanique. Par contre, le traitement des graines à la vapeur permet d'améliorer ses performances techniques.

1.3.3.1. Description et principe de fonctionnement de la décortiqueuse à graines de néré étuvées

En se basant sur les résultats de recherche cités au paragraphe 1-3-3, une décortiqueuse de graines de néré étuvées a été mise au point par Audu et al. (2004).

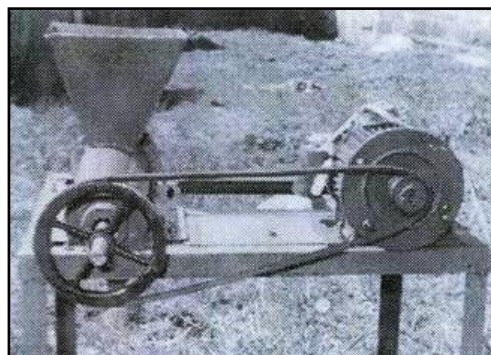


Photo 1- 5. Décortiqueuse de graines étuvées (Nigeria)

Elle est constituée de deux cylindres concentriques (Photo 1-5). Le cylindre interne est mobile et celui externe est fixe (Audu et al., 2004). Le moteur mis en marche, imprime au cylindre mobile un mouvement qui, par l'intermédiaire de la vis sans fin, entraîne les graines étuvées situées dans la trémie. Ces dernières sont convoyées dans la chambre de décortiquage constituée par l'espace entre les deux cylindres. Elles y subissent l'effet abrasif de la tôle perforée qui favorise la séparation des coques et des cotylédons.

1.3.3.2. Performance de la décortiqueuse à graines étuvées

L'indice d'efficacité de la décortiqueuse est de 70,3 %. Elle a une capacité horaire de 30,6 kg/h. Elle présente ces performances lorsque la graine est étuvée et a une teneur en eau de 110 % (base sèche) (Adewumi and Igbeka, 1993 ; Audu et al., 2004). L'introduction de cette décortiqueuse permet une certaine réduction de la pénibilité de la technologie artisanale de transformation des graines de néré en "iru". En effet, la durée d'étuvage est réduite à 6 heures contre 12 à 72 heures pour la méthode artisanale. Aussi présente-elle une capacité horaire de 30 kg/h contre 5 à 10 kg/h pour la méthode artisanale.

Malgré ces améliorations, les performances de cette dernière restent inférieures à celles du CIRAD et de l'UAC-INRAB. Les deux premières décortiqueuses réalisent le décortiquage à sec des graines ; ce qui permet d'éliminer les opérations de première cuisson et de premier lavage, induisant ainsi une réduction du temps de travail et de consommation en bois. De plus, la décortiqueuse mise au point au Nigeria traite deux fois moins rapidement les graines que celles du CIRAD et de l'UAC -INRAB. Son indice d'efficacité est de 7 % inférieur à celui de la décortiqueuse UAC/INRAB.

1.4. Facteurs influençant le décortiquage mécanique

Un bon décortiquage dépend, non seulement de l'opération elle-même, mais aussi et surtout de la matière première (Fliedel et al., 1996). C'est la raison pour laquelle la caractérisation de cette dernière est indispensable. Elle sera abordée dans la suite de l'étude.

1.4.1. Propriétés physiques des graines

1.4.1.1. Pureté de l'échantillon

Un lot de graines est considéré comme pur, s'il ne contient pas d'autres espèces de graines étrangères et pas de corps étrangers : sable ou de corps métalliques. La présence de grains de sable ou de corps métalliques entraîne l'usure prématurée des organes de décortiquage voire leur destruction. Il est

important de débarrasser les graines des corps impurs par un tamisage préalable. Le mélange de plusieurs variétés n'assure pas la pureté des graines et peu rendre peu performant l'équipement.

1.4.1.2. Teneur en eau

La teneur en eau maximale recommandée pour le néré et le karité est de 9-10 % (CNUCED, 2003 ; Sanou et al., 2005). A une teneur supérieure à 10 %, les graines s'altèrent rapidement. Une teneur en eau anormale aura sans aucun doute un effet néfaste sur les performances des équipements, avec un taux de décortiquage faible et un taux de brisure de cotylédons élevé. Les traitements de trempage, de séchage, de cuisson, contribuent à la variation de la teneur en eau des graines. Généralement, on distingue la teneur en eau base humide (b. h) et la teneur en eau en base sèche (b. s). Les expressions littérales utilisées pour la détermination de la teneur en eau (B) sont (Ahouansou, 2005):

❖ sur base humide:

$$H_{(bh)} = \frac{(m_0 - m)}{m_0} * 100 \text{ (\%)} \quad \text{avec,} \quad (1-1)$$

- m_0 : masse initiale de l'échantillon humide (g);
- m : masse de l'échantillon après évaporation d'eau (g)
- $m_0 - m$: masse d'eau contenue dans l'échantillon.

❖ sur base sèche:

$$H_{(bs)} = \frac{(m_0 - m)}{m} * 100 \text{ (\%)} \quad (1-2)$$

Ces deux relations sont liées par :

$$H_{(bh)} = \frac{100B_{(bs)}}{100 + B_{(bs)}} \text{ (\%)} \quad (1-3)$$

1.4.1.3. Dimension des graines

La caractérisation dimensionnelle des graines est effectuée par mesurage de leur longueur, largeur et épaisseur. Ces dimensions donnent une idée de la forme et de la grosseur des graines et ont un lien étroit avec la conception des équipements. Dans le cas de la décortiqueuse de néré, l'épaisseur des graines détermine le jeu à prévoir entre la grille mobile et la grille fixe. Un échantillon très hétérogène sera mal décortiqué avec des taux brisure et de décortiquage élevés ou faibles, selon le cas. Connaître la composition en épaisseur offre, l'intérêt pour le choix précis du jeu entre les grilles d'une part, et permet de déterminer la valeur du réglage du jeu entre ces grilles de la décortiqueuse, d'autre part.

1.4.1.4. Diamètre équivalent d'une graine

La notion de diamètre équivalent est définie pour les graines de forme irrégulière en comparaison à celle d'une sphère. Il se définit alors comme étant le diamètre de la sphère ayant le même volume que la graine (Chasseray, 1991 ; Godon and Willan, 1991).

$$D_g = 1,24\sqrt[3]{V_z}, \quad (1-4)$$

avec V_z : le volume de la graine (m^3)

1.4.1.5. Forme des graines

La forme se détermine par l'observation microscopique, avec un degré d'empirisme lié à l'opération permettant d'assimiler les particules à des formes géométriques simples : tétraèdres, cylindres, parallélépipèdes, trois dimensions, ou triangles aigus et rectangles (Godon and Willan, 1991). Elle est caractérisée par les paramètres suivants :

- ✓ Elongation E

$$E = \frac{\text{Longueur}}{\text{Larg eur}} \quad (1-5)$$

- ✓ Degré d'aplatissement A

$$A = \frac{\text{Larg eur}}{\text{Epaisseur}} \quad (1-6)$$

Le décortilage, la mouture et le concassage sont considérés comme des processus au cours desquels se forment de nouvelles surfaces (aires).

- ✓ Aire massique S_m (m^2 / kg)

$$S_m = \frac{6}{\rho D_g} \quad (m^2 / kg) ; \text{ avec :} \quad (1-7)$$

- ρ : masse volumique de la graine (kg / m^3) ;
- D_g : diamètre équivalent de la graine (m).

- ✓ Aire Volumique s (m^3 / kg):

$$s = \frac{6}{\rho} \quad (m^3/kg) \quad (1-8)$$

- ✓ Taux de réduction u (%)

$$u = \frac{D_g}{D_c} ; \text{ avec :} \quad (1-9)$$

- D_g : diamètre équivalent de la graine ;
- D_c : diamètre équivalent du cotylédon.

1.4.2. Bilan des travaux de caractérisation physique de produits agricoles

Différents auteurs ont étudié les propriétés physiques de divers produits agricoles. Leurs travaux ont permis l'évaluation des principales dimensions de plusieurs produits tels que le soja noir (*Vigna Mungo*) (Dutta et al., 1988), le soja jaune (*Vigna radiata*) (Despande et al., 1993), le *Pantaclethra macrophylla* (Oje and Ugbor, 1991), le pois bambara (*Vigna subterranea*) (Baryeh, 2001), le néré (Ahouansou, 2005 ; Ogunjimi, et al., 2002), l'orge (Zavrajnov and Nikolow, 1990) et le karité (Aviara et al., 2000). D'autres travaux ont été consacrés à l'étude des variations des dimensions de certaines graines en fonction de leur teneur en eau: arachide (Kaleemullah, 1992), soja (Despande et al., 1993) et guna (Aviara et al., 1999). La méthode de calcul des moyennes arithmétique, géométrique et de diamètre équivalent de la sphère, dans l'évaluation du volume de la graine a été utilisée également (Dutta et al., 1988). Le résultat a montré que les diamètres permettent approximativement de prédire les valeurs expérimentales. Les travaux similaires, réalisés sur le guna, ont montré que le diamètre géométrique conduit à l'obtention des valeurs les plus réalistes du volume du guna déterminé de façon expérimentale (Aviara et al., 1999).

Deux méthodes ont été utilisées pour la détermination de la masse volumique réelle et de la densité des produits agricoles. La méthode du déplacement gazeux a été appliquée en 1967 pour la détermination de la porosité des grains et graines (Thomson and Isaacs, 1967), et en 1980 pour l'évaluation de l'effet de la teneur en eau sur la masse volumique apparente du blé et du maïs (Nelson, 1986). La même méthode a été utilisée en 1993 pour la détermination des propriétés physiques de la graine de citrouille (*Cucurbita pepo*) (Joshi et al., 1993) et pour la caractérisation physique de la graine de pastèque (*Citruellus lanatus*) (Suthar and Das, 1996). La méthode de déplacement du liquide (eau) a été utilisée en 1986 pour caractériser le pois d'Angole (*Cajanus cajan*) (Shepherd and Bhardwaj, 1986) et en 1988 pour la détermination des propriétés physiques du soja noir (Dutta et al., 1988). La même méthode a été utilisée par différents auteurs pour caractériser respectivement les oléagineux (Oje and Ugbor, 1991) et la graine de guna (Kaleemullah, 1992). La masse volumique relative est déterminée par la méthode AOAC (1980) (AOAC., 1980). La relation de Mohsenin est utilisée pour calculer la porosité des produits (Mohsenin, 1980).

Différentes méthodes sont utilisées pour calculer le coefficient de frottement sur différentes surfaces des produits agricoles. On distingue la méthode qui consiste en un déplacement de la surface contre la

matière (Lawton, 1980), d'une part, et celle du plan incliné (Dutta et al., 1988 ; Aviara et al., 1999 ; Mohsenin, 1980). Les surfaces utilisées sont souvent la tôle galvanisée et le contre-plaqué.

1.4.3. Propriétés mécaniques des graines.

1.4.3.1. Dureté des graines

La dureté « physique » des grains se définit comme étant leur résistance à l'écrasement, à la fragmentation, à la réduction (Chasseray, 1991 ; Infogate, 2011). L'antonyme de dur est, pour les graines, friable, tendre, facile à réduire. Il s'agit d'une propriété mécanique. Pour les métaux, la dureté se mesure par la résistance à la pénétration (largeur ou profondeur) de l'empreinte (Godon and Willan, 1991). La dureté des graines est la caractéristique qui exerce une influence majeure directement le déroulement du décorticage, de la mouture, du broyage, etc. Elle détermine la durée du décorticage, du broyage et les dépenses d'énergie nécessaires à l'obtention du produit final. Elle affecte le rendement au décorticage puisqu'une graine tendre produit, au cours de l'abrasion, un taux de brisure supérieur à celui d'un grain dur.

Les méthodes d'évaluation de la dureté sont nombreuses. La plupart ont été mises au point pour le blé et utilisées ensuite pour d'autres grains. Ainsi, la dureté peut être évaluée comme étant la résistance à la pénétration d'un stylet en mesurant la force nécessaire pour rompre la graine, ou encore comme une résistance à la compression entre deux plaques, en utilisant un appareil de type Instron, pour mesurer la force exercée sur le grain jusqu'à sa cassure. Des tests d'abrasion sont aussi utilisés. C'est le cas du test Abrasive Hardness Index (AHI) qui donne un indice de dureté correspondant au temps nécessaire pour éliminer 1 % du grain (Fliedel et al., 1996). Enfin, plusieurs autres tests sont fondés sur la résistance des grains au broyage. Le test dit de Particule Size Index (PSI) est fondé sur l'évaluation de la taille des particules après broyage, à l'aide d'un tamis d'ouverture de mailles bien définie (Dutta et al., 1988), le test de Brabendes Hardness Index (BHI) et celui de Stenvert Hardness Times (SHT) qui mesurent le temps nécessaire pour obtenir une certaine quantité de broyat, avec un broyeur donné.

Une mesure de la réflectance, en spectroscopie infrarouge à 1680 nm, effectuée sur un échantillon de grains broyés très finement, permet d'évaluer la taille moyenne des particules après mouture, à l'instar de PSI. Enfin, il y a un test lié à la densité des grains qui consiste à mesurer le pourcentage de grains flottants à la surface d'une solution de densité connue (Fliedel et al., 1989). Les tests réalisés sur le blé, avec le Hardness-Tester développé par les établissements Pfizer-France, donnent les valeurs de dureté suivantes : 7 à 9 kg sur les grains du blé farineux ; 9 à 11 kg sur les grains vitreux et 11 à 14 kg sur du blé très vitreux.

La résistance des grains à l'écrasement est très différente selon le type d'effort. En compression par exemple, elle est de 15 kg et vaut en cisaillement 3,8 kg, pour une amande farineuse (Chasseray, 1991).

1-4-3-2. Contrainte et déformation de la graine

Dans les processus de transformation des graines (décorticage, concassage, broyage), celles-ci subissent diverses influences du milieu (humidité, pression, température de l'air). A cet effet, leurs propriétés mécanique, physique et chimique connaissent aussi des changements. Les effets mécaniques imprimés durant le décorticage, le concassage, le broyage, ou la mouture, provoquent des modifications de forme, dimensions, propriétés et état physique des graines. Il existe trois types de contraintes qui induisent la modification de la taille des particules alimentaires : (i) la force de compression ; (ii) la force d'impact (par choc) ; (iii) la force de cisaillement (ou friction).

Dans beaucoup de cas, le processus de réduction de la taille des particules (graines) dans les équipements agroalimentaires se déroule sous l'effet de ces trois forces. Mais selon le cas, un type de force est dominant par rapport aux autres. Dans le cas du décorticage du néré, les forces de cisaillement sont prédominantes. Lorsque la force est appliquée aux graines, elle provoque la déformation des tissus. Souvent, les contraintes exercées ne dépassent pas la limite d'élasticité. Ainsi, tout comme pour les autres matériaux, la déformation des produits alimentaires se fait suivant le diagramme contrainte - déformation (Figure 1-3).

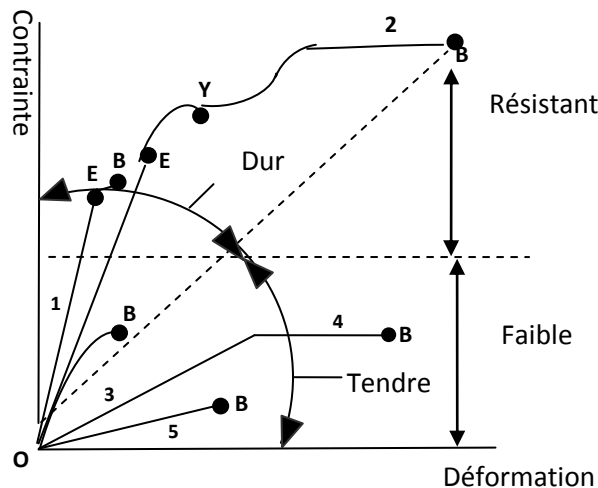
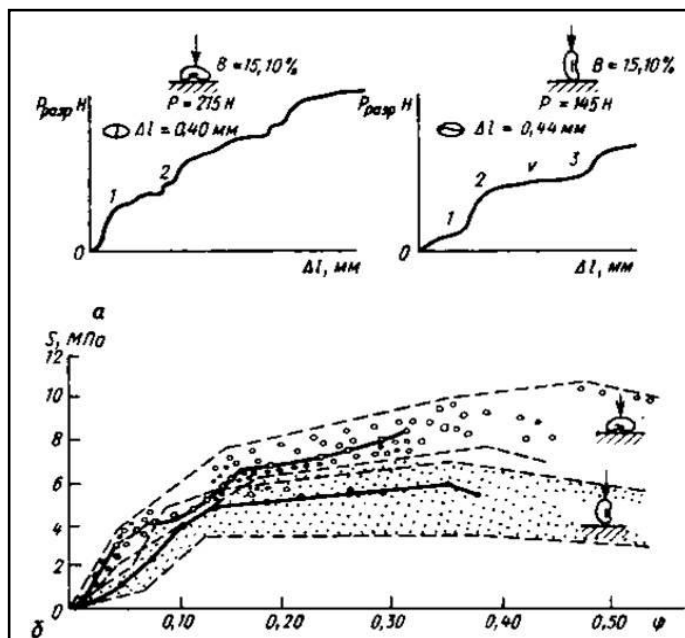


Figure 1-3 : Diagramme Contrainte-Déformation de différents produits alimentaires (Loncin and Merson, 1979)

- E: Limite d'élasticité; Y: Seuil de plasticité initiale ; B: limite de plasticité
- OE : Zone de déformation élastique ; EY: Palier d'écoulement ;
- YB: Zone déformation plastique
- Produit1 (courbe1) : dur, résistant et fragile ;
- Produit 2 (courbe2) : dur, résistant et ductile ;
- Produit 3 (courbe 3) : dur, peu résistant et fragile ;
- Produit 4 : (courbe 4) : doux, peu résistant et ductile ;
- Produit 5 (courbe 5) : doux, peu résistant et fragile

Au-delà du domaine élastique, la courbe passe par le domaine dit plastique. Les forces provoquent une déformation irréversible du produit. La déformation croît, sans que la charge n'augmente, pour le cas du produit 4. Le produit 2 subit l'écroutissage au-delà du point Y. Ce tronçon s'appelle *palier d'écoulement*. La contrainte est appelée limite d'écoulement (σ_E). L'augmentation de la charge entraîne la rupture. Le point E du diagramme (Figure 1-3) correspond à la contrainte conventionnelle maximale appelée charge de rupture.

La courbe de déformation en essai de compression de l'orge est illustrée sur la figure 1-4 (Zavrajnov and Nikolow, 1990).



P_{pazp} : force de rupture ; Δl : allongement ; B : teneur en eau ; S : contrainte ; Ψ : déformation

Figure 1-4: Diagrammes Force-allongement et contrainte-déformation en compression de l'orge (Ogunjimi et al., 2002)

Le diagramme de déformation de l'orge s'apparente à celui des métaux doux. On distingue trois étapes dans le développement des déformations du matériau jusqu'à sa destruction. La zone 0-1 correspond à celle des déformations élastiques. La deuxième (1-2) étape est celle des déformations plastiques. Par la suite, l'augmentation de la charge permet d'obtenir la 3^e partie (2 - 4) qui se termine par la destruction de l'enveloppe et l'apparition des fissures, le plus souvent, suivant la ligne médiane. Ces études ont révélé l'orge comme la plus résistante des "céréales". De ce fait, l'orge est pris comme étalon pour apprécier les autres graines.

Les diagrammes de compression des produits alimentaires tropicaux en général, et du néré en particulier, sont encore des domaines à explorer.

Ce diagramme d'essai en compression permet d'avoir les valeurs numériques des indices de résistance des corps (plasticité, friabilité, viscosité).

❖ **Indice de plasticité**

L'indice de plasticité e_p est apprécié par la formule (Zavrajnov and Nikolow, 1990).

$$e_p = \ln \left[\frac{1}{1 - \psi} \right] \quad (1-10)$$

avec Ψ la déformation relative en compression. ($0 \leq \psi \leq 1$)

❖ **Module de plasticité E_p**

Le module de plasticité E_p peut être apprécié par la relation (Zavrajnov and Nikolow, 1990).

$$E_p = 100 \frac{(S_r - \sigma_s)}{e_p} : \quad (1-11)$$

avec S_r : la contrainte à la rupture (MPa) et σ_s la limite d'élasticité (MPa). Les résultats des études montrent que pour les graminées: $E_p = 9,5 \dots 10$ MPa

❖ **Viscosité**

La viscosité du matériau est caractérisée par l'aire du diagramme d'essai en compression et l'indice de viscosité est le rapport d'énergie de rupture par le volume du corps déformé. Des graminées testées, le seigle est le plus visqueux (Zavrajnov and Nikolow, 1990). Outre les propriétés physiques

et mécaniques de la graine, les caractéristiques liées à la conception de la machine, à son mode de fonctionnement influencent aussi la qualité du décortilage.

1.4.3.3. Principe de conception de l'équipement

Les performances des décortiqueuses à plateaux, dont l'un fixe et le second mobile, dépendent des caractéristiques de ces derniers. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- diamètres des plateaux ;
- écartement entre les plateaux ;
- vitesse des plateaux ;
- nature de la surface de travail des grilles ;
- débit d'alimentation.

❖ Diamètre des plateaux

Il est choisi de manière à assurer le décortilage de la graine et à expulser le cotylédon avec un risque minimal de ce dernier à frotter la grille. Ceci limite la brisure des cotylédons.

❖ Ecartement des plateaux

L'écartement ou le jeu séparant les deux tôles perforées agit sur les paramètres techniques de l'équipement tels que:

- le taux de décortilage ;
- le taux de brisure des cotylédons ;
- le débit maximum que peut avoir l'équipement.

❖ Vitesse de décortilage

Les vitesses des plateaux ont un effet sur le décortilage. Elles peuvent être déterminées de façon expérimentale. En exemples, les essais réalisés pour le décortilage du sorgho ont montré que, sur les quatre vitesses testées, (700 tr/mn, 900 tr/mn, 1100 tr/mn et 1300 tr/mn) celle de 1100 tr/mn permet à la décortiqueuse d'avoir ses meilleures performances techniques (Hucl et al., 2001). De même, les essais réalisés pour le décortilage des graines étuvées de néré ont montré que la vitesse de 500 tr/mn du cylindre interne est la meilleure des quatre valeurs testées (250 tr/mn, 500 tr/mn, 750 tr/mn et 1000 tr/mn) (Audu et al., 2004).

❖ Nature de la surface des grilles

Les grilles utilisées sont faites de tôle perforée. Les perforations sont semblables à celle d'une râpe. La tôle est en acier de haute résistance pour éviter l'usure prématurée.

❖ Alimentation de la zone de décortilage

Une couche unique de graines est considérée comme un idéal parfait, mais cet idéal ne peut être atteint qu'avec de grosses particules subissant peu les effets de la résistance de l'air. Dans la réalité, la trajectoire des graines est telle que la superposition des particules élémentaires est inévitable et que le nombre de ces superpositions croît rapidement avec le débit. Il est important d'optimiser le débit de manière à avoir, dans la plupart des cas, la couche unique.

1.4.3.4. Forces développées au cours du décortilage

Une graine en cours de décortilage est fragmentée par les forces qui s'exercent sur elle à partir de la surface de la grille ; ces mêmes forces s'exercent sur les différents organes de la décortiqueuse. La valeur de ces forces dépend de:

- la nature de la graine à décortiquer ;
- la façon dont est alimentée la zone de décortilage ;
- la nature de la surface des tôles perforées ;
- la cinématique du plateau supportant les grilles (vitesse linéaire et différentielle).

Ces facteurs sont étroitement liés entre eux.

❖ Décomposition des forces s'exerçant sur les plateaux

Pendant le passage des graines dans la zone de décortilage, elles exercent sur la surface des plateaux:

- une force normale \vec{N} qui tend à les écarter. Cette force est la résultante d'une multitude de forces s'exerçant contre la paroi des plateaux dans la zone de décortilage ;
- sur le plateau fixe, s'exerce la force normale \vec{N} appliquée à une distance ε du centre du plateau. Par l'intermédiaire des graines, le plateau mobile tend à tourner le plateau fixe avec une force tangentielle appelée $\vec{F}_t = \vec{N} \tan \varphi$. Les forces \vec{N} et \vec{F}_t s'ajoutent vectoriellement $\vec{F} = \vec{N} + \vec{F}_t$. A ces forces s'ajoutent le moment résistant \vec{M} ;
- sur le plateau mobile agissent les forces \vec{N}_1 et \vec{F}'_t , de même que le moment \vec{M}_1 .

La graine est soumise à l'action des forces \vec{N} , \vec{F}'_t , \vec{N}_1 , \vec{F}_t . Elle est également soumise à l'action de son poids \vec{P} et à la force d'inertie $\vec{f}_i = m\omega^2 r$, avec :

- m: masse de la graine ;
- ω : vitesse de rotation du disque ;
- r: distance entre la graine et l'axe de rotation.

1.4.3.5. Ecartement réel en cours de décortilage

Au cours du décortilage, la force \vec{N} s'exerce sur :

- le plateau qu'elle fait fléchir (déformation élastique);
- l'axe du plateau (déformation élastique) mobile ;
- les paliers supportant l'axe mobile ;
- les parois de la cage supportant le plateau mobile.

De ce fait, les caractéristiques de réglage du décortilage, qui dépendent de l'espace « e_p » séparant les deux plateaux, se trouvent modifiées. Il en résulte une variation de la qualité de décortilage. Le jeu « e_r » de réglage, est donné par :

$$e_r = e_p + \Delta e, \text{ avec :} \quad (1-12)$$

- e_p : jeu de réglage statique;
- Δe : variation de l'écartement pendant le décortilage, fonction de la force \vec{N} ($\Delta e = f(N)$)

La variation Δe dépend de :

- Δe_1 : variation de l'écartement entre la grille et le plateau sur lequel elle est fixée;
- Δe_2 : déformation élastique du plateau et de l'axe qui le supporte;
- Δe_3 : dilatation de la grille et du plateau en fonction de la température;
- Δe_4 : déformation des paliers des organes supportant le système de décortilage et du système du réglage.

L'écartement réel peut s'écrire :

$$\Delta e = (\Delta e_1 + \Delta e_2 + \Delta e_3) - \Delta e_4; \text{ avec} \quad (1-13)$$

$$\Delta e_1 = k_1 N ; \Delta e_2 = k_2 N ; \Delta e_3 = k_3 N ; \Delta e_4 = \alpha \Delta t$$

- où k_1, k_2, k_3 : coefficients de déformation des butées (m/N) ;
- α : coefficient de température (m/°C) et Δt : variation de la température (°C).

A l'aide de cette équation, on peut contrôler le fonctionnement de la décortiqueuse en fonction de la température et des contraintes avec une jauge de contrainte et un capteur de température fixés sur les paliers.

1.4.3.6. Ecoulement des graines dans la trémie

Considérons un lit de particules, tassé, soumis à une force de cisaillement : les forces sont transmises de particules à particules, par l'intermédiaire des points de contact que présente leur surface. Il y a tout d'abord des déformations élastiques, puis les déformations plastiques lorsque l'intensité de la

force augmente ; enfin les particules commencent à glisser les unes sur les autres dans le plan de rupture et l'écoulement s'établit.

Le comportement mécanique de la graine peut donc se définir comme étant la résistance à la rupture sous sollicitation normale (degré de tassement) et tangentielle (cisaillement). L'échantillon est placé dans une cellule de cisaillement dont la moitié inférieure est mobile, et peut être mis en mouvement sous l'action d'une force horizontale. La mesure consiste à établir la relation existant entre la force tangentielle (t_f) pour atteindre le stade de rupture, exprimée par unité de surface, et la pression normale (s_n). Les deux (02) forces sont réunies par la relation de Warren Spring (Chasseray, 1991):

$$\left(\frac{t_f}{C} \right)^n = \frac{s_n}{T_f} + 1 \quad (1-14)$$

- n : l'indice du cisaillement variant entre 1 et 2. Il est fonction du rapport surface/volume des particules considérées ;
- C : la cohésion du produit dans les conditions de l'essai. Elle représente la tension nécessaire pour atteindre la rupture par cisaillement en l'absence de toute contrainte normale, c'est-à-dire sans la force de frottement ;
- T_f : la tension de rupture du matériau à cisaillement nul. Elle est constante pour un matériau.

1.4.4. Energie de déformation E

L'énergie nécessaire, pour réduire la taille du produit, dépend de sa dureté et de sa friabilité, toutes liées à la structure du produit. Elle est fonction des dimensions initiale et finale de la particule. Les corps durs absorbent plus d'énergie. L'énergie nécessaire pour entraîner la variation de la dimension (dL) d'une particule de dimension (L) est une fonction puissance de (L).

$$\frac{dE}{dL} = kL^n \quad (1-15)$$

❖ La loi de Kick's ($n = -1$) stipule que l'énergie nécessaire, pour réduire la taille d'un produit solide, est proportionnelle au rapport de la dimension initiale (diamètre, par exemple) sur la dimension atteinte après la réduction.

$$E_m = K_{kl} \cdot \ln \frac{d_1}{d_2} \quad (1-16)$$

- E_m : Energie nécessaire par unité de masse (Joule) ;
- K_{kl} : Constance de Kick's ;

- d_1 : dimension initiale de la graine (mm) ;
- d_2 : dimension finale de la graine (mm) ;
- d_1/d_2 : ratio de réduction de la taille de la graine. Il est utilisé pour évaluer la performance de l'équipement.

❖ La loi de Rittinger ($n = -2$) stipule que l'énergie nécessaire, pour réduire la taille de la graine, est proportionnelle, non pas à la variation de la dimension de la particule, mais à la variation de sa surface. Elle est appliquée pour les principes de réduction par abrasion.

$$E_m = K_R \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (1-17)$$

avec K_R la constante de Rittinger.

❖ La loi de Bond est utilisée pour calculer l'énergie nécessaire pour réduire la taille de la graine ou de l'amande à partir de la relation:

$$\frac{E_m}{W} = \sqrt{\frac{100}{d_1}} - \sqrt{\frac{100}{d_2}} \quad (1-18)$$

avec W l'index de Bond, égal à 40.000 – 80.000 ($J \text{ kg}^{-1}$) pour les corps durs : céréales (Loncin and Merson, 1979 ; Leniges and Beverlov, 1975).

❖ La loi de Melnikov est utilisée également pour le calcul de l'énergie de décortilage (Zavrajnov and Nikolow 1990). Elle s'exprime à travers l'équation:

$$E_m = C_1 \cdot \log u^3 + C_2 \cdot (u - 1) ; \text{ avec :} \quad (1-19)$$

- E_m : l'énergie nécessaire pour la réduction de la taille des grains;
- u : taux de réduction ;
- C_1 et C_2 : coefficients. Ces coefficients sont déterminés de façon expérimentale. Ils dépendent du type de produit. Les travaux de Melnikov ont permis de déterminer C_1 et C_2 pour l'orge, $C_1 = (10 \dots 13) 10^3$ Joules/ kg et $C_2 = (6 \dots 9) 10^3$ Joules/ kg.

1.5. Conclusion

La présente revue bibliographique, tout en faisant le point sur les importants travaux de d'amélioration de la technologie de transformation des graines de néré en afitin (iru, sourou, soubala, nététo), a montré les limites des différentes innovations introduites, notamment pour la mécanisation du décortilage de la graine de néré. En effet, alors que l'indice de décortilage de la

méthode traditionnelle avoisine 90 %, celui du décortilage mécanique oscille autour de 70 %, posant ainsi un sérieux problème d'adoption de l'innovation par les transformatrices. Ces innovations sont mises au point en méconnaissance des propriétés physiques et mécaniques des graines. Des investigations n'ont pas été faites sur l'effet des différents types de traitements (séchage, trempage, cuisson) sur ces propriétés physiques et sur l'efficacité du décortilage mécanique.

Le développement d'un nouvel équipement pour le décortilage des graines de néré intégrant les propriétés physiques, mécaniques et les différents prétraitements ainsi que le comportement de ces graines relativement aux contraintes à elles appliquées durant les opérations mécaniques, permettrait de mettre au point un système de décortilage plus efficace et efficient que la méthode traditionnelle de foulage. Ces différentes pistes de recherche sont explorées et les résultats présentés dans la suite de ce mémoire.

CHAPITRE 2

EFFETS DE DIFFÉRENTS TYPES DE PRE- TRAITEMENTS SUR LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES GRAINES DE NÉRÉ (*PARKIA BIGLOBOSA*)

2.1. Introduction

Le néré (*Parkia biglobosa*) est une légumineuse forestière que l'on retrouve sur les continents africain, asiatique et sud-américain (Guttierez et al., 2000). Sa zone géographique est comprise entre les vingtièmes parallèles nord et sud de part et d'autre de l'équateur. Il s'adapte aux zones caractérisées par une faible pluviométrie ainsi qu'aux sols pauvres (croûtes ferrugineuses) que l'on rencontre en Afrique de l'Ouest. On le retrouve en Afrique, principalement dans les zones climatiques de type soudanien. Au Bénin l'arbre est plus répandu dans les départements du Zou, Collines, Borgou, Alibori, Donga et Atacora. On le retrouve de manière clairsemée dans les champs et terrains en jachère souvent associée au karité. Son importance réside dans le fait qu'il procure aux populations ouest africaines, une gamme variée de produits utilisés dans l'alimentation (pulpe, graines), la médecine et la pharmacopée (écorce, tiges, racines, etc.) (Alihonou, 2006). Le principal intérêt tiré du néré est l'utilisation faite des graines. Les graines fermentées donnent un condiment très répandu en Afrique et porte diverses appellations : afitin (fon), iru (yoruba), sonru (bariba) au Benin, soumbala au Burkina Faso, Mali, Niger, nététo au Sénégal et dawadawa ou iru au Nigeria.

La graine de néré, matière première utilisée pour la production de l'*afitin*, de l'*iru* et du *sonru*, est une ressource végétale forestière menacée de disparition. Par ailleurs, on observe au Bénin une variabilité morphologique des graines de néré qui constitue une contrainte à la mécanisation du décorticage de la graine. Cette variabilité morphologique suppose une variabilité génétique. L'étude de la diversité génétique du *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth réaliée au Burkina Faso a révélé une certaine richesse allélique (Sibidou et al., 2004), un polymorphisme important et une forte diversité génétique. Aussi, les critères de choix des graines au marché par les transformatrices sont la faible teneur en eau : (les transformatrices préfèrent l'ancienne graine bien sèche à la nouvelle qui est pleine d'eau), la forte densité de la graine, la dureté de la graine et la propreté (Guttierez et al., 2000).

Toute démarche de conception ou d'optimisation d'équipement agroalimentaire qui se veut crédible doit se baser avant tout sur la connaissance des propriétés physiques, mécaniques et chimiques de produit à traiter avant celle du matériau de fabrication (Zavrajnov and Nikolow, 1990). La prise en compte des besoins des utilisateurs est aussi primordiale dans cette démarche (Traoré et al., 2004). Mais la plupart du temps, au Bénin et dans la sous-région, la mise au point des équipements agroalimentaires, se limite seulement à la définition des principes de fonctionnement et au calcul de résistance des matériaux de fabrication sans le souci d'étudier l'interaction entre le matériau de

fabrication et le produit à traiter. La connaissance des propriétés physiques et mécaniques des graines à traiter est importante pour réussir la conception d'une décortiqueuse, obtenir une efficacité satisfaisante de sa part et pour optimiser ses performances (Hucl et al., 2001 ; Loncin and Merson, 1979). Elle est surtout indispensable pour la conception de la grille motrice de décorticage, pièce principale de l'équipement qui occupe une part notable dans l'évaluation de ses performances techniques. C'est dans cette optique que quelques propriétés physiques et mécaniques d'une variété de graines de néré (*Parkia fillicoides*) cultivée au Nigeria ont été déterminées (Ogunjimi et al., 2002). A la teneur en eau de 10,25 % (b. s), la masse volumique réelle de la graine varie entre 1098,0 et 1215,7 kg/m³ et sa porosité de 51,0 à 53,5 %. Les dimensions moyennes de la graine sont de : longueur 8-12 mm, largeur 6-8,5 mm et épaisseur 4,5-6 mm. La conception d'une décortiqueuse, intégrant les caractéristiques des graines de néré, doit permettre d'obtenir un décorticage efficient, une réduction sensible de la pénibilité du travail des femmes transformatrices, une amélioration de la productivité et de la qualité du produit pour des marchés porteurs, et une préservation durable des ressources naturelles. La mise au point d'un système efficace de décorticage nécessite le choix raisonné d'un traitement approprié de la graine. Ce traitement peut être la cuisson, le trempage, le séchage, etc. Ces traitements peuvent entraîner des variations au niveau des propriétés physiques et mécaniques.

La présente étude est consacrée à l'évaluation de l'effet des différents prétraitements des graines de néré sur leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Divers auteurs ont abordé la caractérisation des produits agricoles à travers l'évaluation de leurs dimensions. Cette évaluation est faite par la mesure des dimensions axiales des graines (Dutta et al., 1988 ; Despande et al., 1993 ; Oje and Ugbor, 1991 ; Fraser et al., 1978 ; Oje, 1994 ; Omobuwajo et al., 1999). D'autres, dans leurs travaux, ont corrélé les dimensions des graines à celles de l'amande ou des cotylédons (Aviara et al., 2000 ; Joshi et al., 1993 ; Suthar and Das, 1996 ; Çarman, 1996 ; Mankanjuola, 1972). Ces travaux ont porté respectivement sur les graines du karité, de la citrouille, du pastèque, du fruit de l'arbre à pain et du melon. L'effet de la teneur en eau sur les variations des dimensions a été également étudié sur le soja, l'arachide et le guna (Despande et al., 1993 ; Kaleemullah, 1992 ; Aviara et al., 1999). La détermination de la masse volumique réelle a été également abordé dans la caractérisation des graines de citrouille, pastèque, du blé et du maïs (Oje, 1993 ; Joshi et al., 1993 ; Suthar and Das, 1996 ; Nelson, 1980). L'angle maximal au repos et le coefficient de frottement a été utilisé comme paramètre pour la caractérisation des graines de néré, du guna, du soja, du maïs et du sorgho (Despande al.,

1993 ; Ogunjimi et al., 2002 ; Aviara et al., 1999 ; Osunade and Lassisi, 1994). Très peu de travaux ont été consacré à la caractérisation des graines de néré (Ogunjimi et al., 2002 ; Ahouansou et al., 2006_a ; Olajide and Ade Omowaye, 1999). Aucun d'eux n'a abordé la caractérisation physique du cotylédon et n'a exploré l'effet des traitements tels que la cuisson, le séchage et le trempage sur les caractéristiques physiques et mécaniques de la graine.

2.2. Matériel et méthodes

2.2.1. Matériel

2.2.1.1. Matière première

La matière première de cette étude est la graine de néré (*Parkia biglobosa*) tout venant acquise au marché de Dantokpa à Cotonou (Photo 2-1). Cette graine serait récoltée à N'Dali dans le département du Borgou au nord du Bénin. Environ 100 kg de graines ont été nettoyées, triées et stockées dans un sac en polyéthylène conservé au laboratoire à la température de $25\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Les analyses physico-chimiques sont réalisées au Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA) de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) d'une part, et dans celui du Programme Technologie Agricole Alimentaire (PTAA), d'autre part.



Photo 2-1: Graines de néré brutes et sèches

2.2.1.2. Equipements de laboratoire

La teneur en eau des graines est évaluée, après mouture au moulin RETCH et séchage différentiel des graines moulues à température de 105°C , à l'aide de l'étuve HOH-EXPRESS HE50, PFEUFFER,

Germany. La pesée est effectuée à l'aide de la balance de précision SARTHORIUS, la balance de précision Sarthorius (plage de mesures : 0,1 g à 120g ; précision 0,1 mg ; division 0,1 g).

Les dimensions moyennes des graines (longueur, largeur, épaisseur) sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse FACOM de précision 0,001mm. Le volume réel de 1000 noix est obtenu à l'aide du Pycnomètre de Brückner. La masse des graines est obtenue à l'aide de la balance électronique type Mettler Toledo SB1600 la balance Toledo Mettler (plage de mesures : 50 g à 16100g, division : 1g, précision : 1 mg)

2.2.2. Méthodes

2.2.2.1. Traitements des graines

❖ Cuisson des graines

Les graines, prélevées du stock conditionnées et versées dans de l'eau désionisée à la température de 30°C, à raison de 2,5 L d'eau par kg, sont chauffées au bois dans des marmites en aluminium. L'eau est portée à l'ébullition après environ 15 min et maintenue durant le temps de cuisson. Sept lots d'échantillons (E_0 , E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5 , E_6), de 100 graines chacun, sont constitués à partir du stock. L'échantillon E_0 représente le témoin et ne subit aucun traitement. Les six autres lots (E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5 et E_6) subissent la cuisson à l'eau, pendant respectivement 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h et 6 h, la durée de la cuisson étant comptée à partir de l'ébullition.

Après la cuisson d'un lot donné, les mesures préconisées sont ensuite effectuées sur les graines formant ce lot. Les graines du lot sont manuellement décortiquées à l'aide d'une pince et les mesures correspondantes sont prises sur les cotylédons. Pour chaque lot, six (6) répétitions sont réalisées à raison de 100 graines par répétition.

❖ Séchage des graines

Cinq (5) lots d'échantillons (E_{s0} , E_{s1} , E_{s2} , E_{s3} , E_{s4}) de cent (100) graines sont constitués à partir du stock nettoyé. Le lot E_{s0} représente le témoin et les lots E_{s1} , E_{s2} , E_{s3} , E_{s4} sont séchés à l'étuve à la température de 105 °C pendant des durées respectives de 1 h, 2 h, 2 h30 mn et 3 h. Les mesures effectuées sur les graines ainsi séchées sont identiques à celles subies par les graines cuites.

❖ Trempage des graines

Le trempage des graines est réalisé dans l'eau désionisée, à raison de 2 L d'eau par kilogramme de graines, à la température ambiante (environ 30 ± 1 °C). Quatre (4) lots d'échantillons (E_{t0} , E_{t1} , E_{t2} , E_{t3})

de cent (100) graines sont constitués à partir du stock nettoyé. Le lot E_{t0} représente le témoin et les lots E_{t1}, E_{t2} et E_{t3} sont trempés dans l'eau à la température ambiante (30±1°C) pendant des durées respectives de 24 h, 48 h et 72 h. Les mêmes mesures que celles effectuées sur les graines cuites et séchées sont réalisées sur les graines trempées.

2.2.2.2. Caractérisation physique des graines

La caractérisation physique est faite sur les graines ayant subi l'un des traitements décrits aux paragraphes précédents. Elle s'effectue à travers la détermination de la teneur en eau, des dimensions moyennes, de la masse et du volume des 1000-graines, des masses volumiques réelle et apparente, de la porosité, des paramètres relevant aussi bien, de la forme, de la masse, que du volume.

La teneur en eau est évaluée suivant la norme ISO-662-1998 (ISO-662, 1998). Cent (100) graines sont moulues à l'aide du moulin RETCH et l'échantillon de 5 g est prélevé pour un séchage différentiel à température de 105°C durant huit (08) heures à l'étuve HOH-EXPRESS HE50 PFEUFFER, GERMANY. L'échantillon est pesé chaque heure, après un refroidissement de 10 à 15 mn dans un dessiccateur ISO 9000, jusqu'à l'obtention de la masse constante attestée par trois (3) mesures consécutives. La teneur en eau en base sèche est calculée selon les formules (1-2) et (1-3)

Les dimensions moyennes (longueur, largeur, épaisseur) des graines sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse FACOM de précision 0,01 mm.

La connaissance des dimensions permet d'évaluer les paramètres caractéristiques des graines définis ci-après (Zavrajnov and Nikolow, 1990) :

✓ l'élongation des graines (E) : $E = L/l$
(2-1)

✓ le degré d'aplatissement des graines (A) : $A = l/e$ (2-2)

où L , l et e représentent respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur de la graine

✓ le diamètre basé sur la moyenne arithmétique des dimensions (D_a) donné par :

$$d_a = (L+l+e)/3 \text{ (mm)} \quad (2-3)$$

✓ le diamètre basé sur la moyenne géométrique des dimensions (D_g) calculé par (Mohsenin, 1980 ; Çalışir et al., 2005) :

$$d_g = (L \times l \times e)^{\frac{1}{3}} \text{ (mm)} \quad (2-4)$$

- ✓ la sphéricité des graines (S) est calculée par (Jha et al., 2006) :

$$S = L^{-1} \times (L \cdot l \cdot e)^{1/3} \quad (2-5)$$

- ✓ et les allongements $A_r(D)$ relatifs aux trois différentes dimensions D = (Longueur, largeur, épaisseur) et calculés par les expressions (Bup et al., 2008) :

$$A_r(D) = (D_t - D_0) / D_0 \quad (2-6)$$

où les D_0 représentent les dimensions au temps $t=0$ et les D_t celles au temps t de cuisson retenu.

L'aire de la surface de la graine et du cotylédon est calculée par la formule (McCabe et al., 1986 ; Olajide and Ade Omowaye, 1999),

$$A_s = \pi D_g^2 \quad (\text{m}^2) \quad (2-7)$$

La masse de mille (1000) graines est déterminée suivant la norme ISO-520 (ISO-520, 1998) à l'aide d'une balance électronique de précision 0,001 g.

Le volume réel de 1000 graines est obtenu au Pycnomètre de Brückner avec des prises d'essai de 100 graines. La partie inférieure du Pycnomètre est remplie de xylène jusqu'à la graduation 0. Les 100 graines sont versées dans le liquide et le volume (V) du liquide déplacé est lu. C'est le volume réellement déplacé par les 1000 graines qui est ensuite considéré.

La masse volumique réelle des graines de néré est également évaluée par la méthode AOAC (AOAC., 1980). Un échantillon de masse $m=500$ g est prélevée et versée dans le Pycnomètre contenant du xylène jusqu'à la graduation 0. Le volume V du liquide déplacé est lu sur le col gradué de l'appareil.

La masse volumique (ρ) est calculée par la formule :

$$\rho = m / V \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-8)$$

Le volume des 1000 graines donne accès au volume moyen d'une graine (V_z) qui, couplé avec la masse volumique (ρ), fournissent différents paramètres massiques des graines (Chasseray, 1991 ; Bellianchicov, 1990) tels que :

- ✓ le diamètre équivalent (D_E) : $D_E = 1,24\sqrt[3]{V_z} \quad (\text{m}) \quad (2-9)$

- ✓ l'aire massique (S_m) : $S_m = 6 \times (\rho \times D_E)^{-1} \quad (\text{m}^2/\text{kg}) \quad (2-10)$

- ✓ le volume massique (S) : $V_m = 6 \times \rho^{-1} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (2-11)$

où d_G représente le diamètre équivalent de la graine entière.

La masse volumique apparente des graines est celle mesurée lorsque les graines sont amoncelées dans un récipient de volume connu et laissant les espaces vides inter granulaires naturels. Un échantillon de masse $m_0 = 500$ g est prélevé et est versé dans une éprouvette graduée. Après avoir tassé les graines,

le volume (V_a) occupé par l'échantillon est lu. La masse volumique (ρ_0), obtenue dans ces conditions, en faisant usage de la relation (2-8), est celle apparente.

Le ratio de la masse des cotylédons (m_c) à celle de la graine (m) est évalué par la relation :

$$R_i = \frac{m_c}{m} \times 100 (\%), \quad (2-12).$$

La porosité ou degré d'espaces vides contenus dans le produit (P en pourcentage), lorsque celui-ci n'est soumis à aucune pression effective extérieure, est donnée par l'expression :

$$P = 100 \times (\rho - \rho_0) / \rho_0 (\%) \quad (2-13)$$

2.2.2.3. Paramètres de friction de la graine

❖ Coefficient de frottement statique de la graine

La méthode du plan incliné (Dutta et al., 1988 ; Aviara et al., 1999 ; Mohsenin, 1980) a été utilisée pour mesurer l'angle maximal au repos de la graine. L'appareil est constitué d'un cadre métallique de longueur 70 mm et de largeur 35 mm mobile autour d'un axe passant par sa largeur inférieure. Un dispositif de relevage permet de lui imprimer progressivement ce mouvement. Le cadre métallique mobile peut porter différentes surfaces (tôle noir, tôle inox, grille, etc.) sur laquelle le produit peut mouvoir.

Une boîte creuse de plexiglas mesurant 150 mm de longueur, 100 mm de largeur et 40 mm d'épaisseur est posée sur la surface (dont on veut déterminer le coefficient de frottement) portée par le cadre mobile. La boîte remplie des graines de néré ayant subit le traitement détermine, est soulevée légèrement sur une hauteur 5 à 10 mm de manière que ses bords inférieurs ne touchent plus la surface et qu'ils reposent sur les graines. Les graines portant le cadre étant posées sur la surface, le cadre métallique est relevé à l'aide du dispositif de relevage. La surface est relevée lentement jusqu'au moment où la boîte creuse commence à se déplacer vers le bas. L'angle θ du cadre métallique avec l'horizontal est déterminé par lecture directe et le coefficient de frottement statique μ_s est calculé par la formule:

$$\mu_s = \tan \theta \quad (2-14)$$

❖ Angle statique au repos

L'angle statique au repos est l'angle, par rapport à l'horizontal, à partir duquel les graines sont en équilibre lorsqu'elles sont entassées. Il est déterminé à l'aide d'un cylindre, de diamètre 15 cm et de hauteur 25 cm, ouvert par le haut et le bas, placé au centre d'une plaque de diamètre 35 cm. Une fois

le cylindre rempli de graines de néré ayant subi le traitement approprié, il est relevé lentement jusqu'à ce que les graines forment un cône sur la plaque circulaire. La hauteur du cône est mesurée de même que son diamètre. L'angle statique au repos est calculé par la relation (Razzavi et al., 2007 ; Orguven and Kubilay, 2004)

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{2H}{D}\right) \quad (2-15)$$

Avec : H la hauteur du cône et D son diamètre.

❖ Angle dynamique au repos

Pour déterminer l'angle dynamique au repos, une boîte cubique en contre plaqué d'arête 20 cm est utilisée. La boîte est ouverte à sa partie supérieure et l'une de ses faces est amovible. La boîte placée au sol, est remplie de graines et la face amovible est ouverte avec rapidité. Les graines se déversent alors formant un lit naturel en plan incliné. L'angle dynamique θ_d est calculé par la formule (Bart-Plange and Barye, 2003 ; Paksoy and Aydin, 2004 ; Seyed et al., 2006) :

$$\theta_d = \tan^{-1}\left[\frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1}\right] \quad (2-16)$$

avec h_1 et h_2 les hauteurs en 2 points du lit et $x_2 - x_1$, la distance qui les séparent.

2.2.2.4. Mesure de la résistance à l'écrasement des graines de néré

La mesure de la résistance à l'écrasement a été effectuée à l'aide du dynamomètre AMANDUS KHAL de précision 0,001N. Un prélèvement au hasard d'échantillon de 50 graines de néré ayant subi le traitement déterminé est utilisé. Chaque graine est individuellement pincée entre les deux plateaux de l'appareil, dans la direction de l'épaisseur jusqu'à son écrasement. La force appliquée pour l'écraser détermine alors la résistance à l'écrasement. La vitesse de la compression de la graine est constante et fixée à 5 mm/mn (Ahmadi et al., 2009_a ; Ahmadi et al., 2009_b).

2.2.3. Analyses statistiques des données et paramètres

Toutes les données sont collectées en six (6) répétitions. Les valeurs acquises pour les différents paramètres mesurés ont été ensuite traitées, à travers les calculs des valeurs moyennes, d'écart types et de fréquences, avec les logiciels MINITAB14 et SPSS 12.0. Les données ne vérifiant pas les tests de normalité de Ryan - Joiner et d'homogénéité de variance de Levene, sont soumises à ceux non

paramétriques de Kruskal-Wallis. Celles vérifiant les tests de normalité et d'homogénéité sont soumises au test de Student-Newman-Keuls (Capéraà and van Cutsem, 1988).

Les différentes courbes découlant sont réalisées sous le logiciel MS EXCEL 2007 également utilisé pour indiquer les équations et les coefficients de corrélation des modèles mathématiques.

2.3. Résultats et discussion

2.3.1. Cuisson des graines

2.3.1.1. Effets de la cuisson sur la teneur en eau des graines et cotylédons

La variation de la teneur en eau des graines et cotylédons de néré en fonction de la durée de cuisson est présentée sur la figure 2-1. De cette figure, il ressort que lorsque la graine est cuite de 0 à 6 h, sa teneur en eau varie de 16,14 % (bs) à 284,62 % (bs) tandis que celle du cotylédon varie de 14,94 % à 212,5 %. En tous les points, la teneur en eau de la graine est supérieure à celle du cotylédon. Ceci peut s'expliquer par le fait que la graine est composée du cotylédon et de la coque. Cette dernière et l'espace entre elle et le cotylédon constitue des poches de rétention d'une quantité notable l'humidité.

Les relations qui lient les teneurs en eau de la graine (H_g) et du cotylédon (H_c) et la durée de cuisson (t) s'expriment à travers les équations :

$$H_g = -0,776t^6 + 15,194t^5 - 112,73t^4 + 389,55t^3 - 613,46t^2 + 398,39t + 16,14 \quad (\%) \quad (2-17)$$

$$H_c = -1,199t^6 + 22,711t^5 - 162,52t^4 + 539,52t^3 - 809,46t^2 + 468,62t + 14,943 \quad (\%) \quad (2-18)$$

avec des coefficients de corrélation sensiblement égaux : $R^2=1$ et où H_g et H_c désignent les teneurs en eau (base sèche) respectives de la graine et du cotylédon, et t la durée de la cuisson.

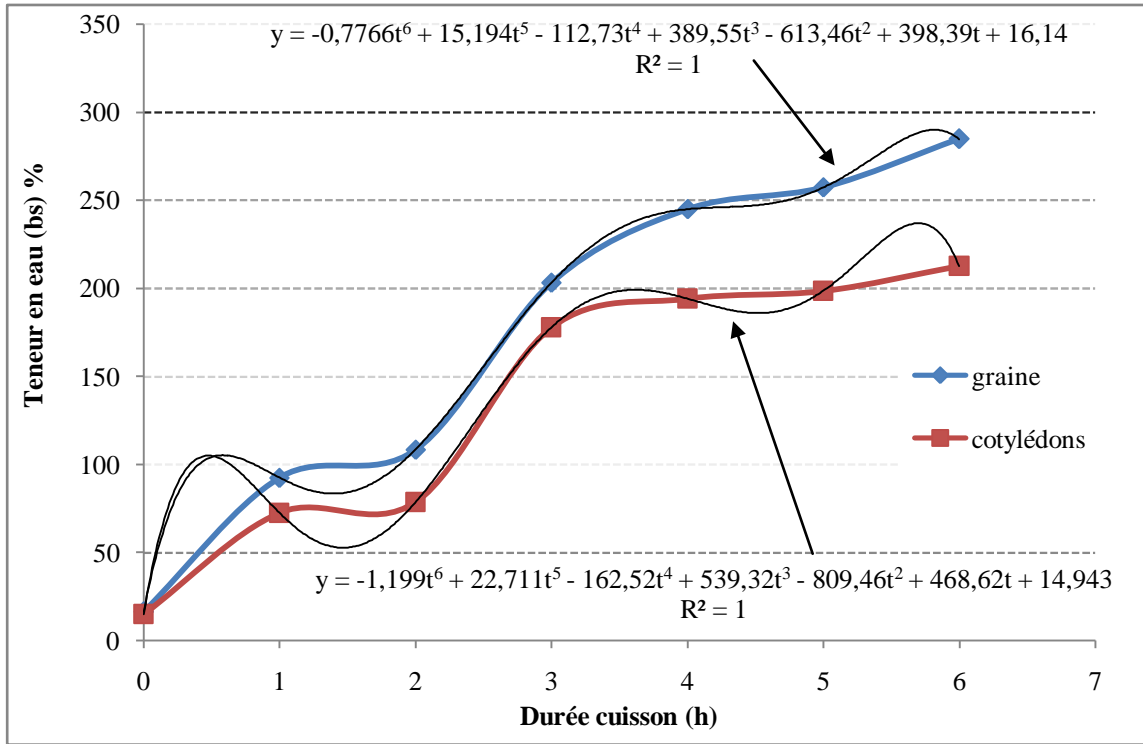


Figure 2-1. Effets de la cuisson sur la teneur en eau des graines et cotylédons de néré

2.3.1.2. Effets de la cuisson sur les dimensions des graines et des cotylédons

❖ Effets de la cuisson sur les dimensions des graines

Les résultats des mesures des dimensions axiales de la graine de néré (*Parkia biglobosa*) en fonction de la teneur en eau sont illustrés dans le tableau 2-1. De ce résultat, il ressort que la longueur, largeur et épaisseur des graines croissent respectivement de 10,12 à 11,59 mm ; 8,3 à 9,34 mm et 4,94 à 5,95 mm, lorsque la durée de la cuisson varie de 0 à 6 h. C'est dire que la cuisson provoque l'augmentation des dimensions de la graine contrairement au séchage qui en induit la diminution (Aviara et al., 2005).

Les tendances décrites sur les dimensions des graines s'observent également sur les moyennes arithmétiques et géométriques qui croissent respectivement de 7,78 à 8,98 mm et 7,42 à 8,60 mm.

Par contre, la sphéricité des graines n'est quasiment pas modifiée pendant la cuisson malgré l'augmentation des dimensions qui induit une variation de l'allongement de ces dernières.

Tableau 2-1. Dimensions axiales des graines de néré à différentes durées de cuisson

Traitement	Dimensions moyennes (mm)					Sphéricité
	Longueur	Largeur	Épaisseur	Moyenne arithmétique	Moyenne géométrique	
Sans traitement	10,12 ± 1,26	8,30 ± 1,20	4,94 ± 0,72	7,78 ± 0,75	7,42 ± 0,68	0,74 ± 0,06
Cuisson (1h)	10,40 ± 1,45	8,69 ± 1,41	5,23±0,97	8,12 ± 1,07	7,76 ± 1,05	0,74 ± 0,06
Cuisson (2h)	11,02 ± 1,47	8,98 ± 1,37	5,53±1,03	8,51 ± 0,98	8,13 ± 0,98	0,74 ± 0,07
Cuisson (3h)	11,24 ± 1,41	9,16 ± 1,47	5,6±0,99	8,67 ± 0,89	8,26 ± 0,91	0,74 ± 0,08
Cuisson (4h)	11,42 ± 1,47	9,24 ± 1,39	5,86±1,11	8,84 ± 0,98	8,47±1,00	0,75 ± 0,18
Cuisson (5h)	11,45 ± 1,39	9,36 ± 1,34	5,90±0,85	8,90 ± 0,93	8,55 ± 0,90	0,75 ± 0,06
Cuisson (6h)	11,59 ± 1,42	9,34 ± 1,24	5,95±1,04	8,98 ± 0,78	8,60 ± 0,80	0,75 ± 0,09

La figure 2-2 illustre les tendances relatives aux variations des allongements subies aux niveaux de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur.

De cette figure 2-2, il ressort clairement que l'épaisseur des graines est la dimension de la graine la plus affectée par le traitement. C'est elle qui exhibe la plus grande valeur d'allongement : jusqu'à 20 %. Les variations d'allongement subies par la longueur et la largeur des graines sont relativement faibles et approximativement de même ordre de grandeur : entre 2 et 6 %.

Cette forte variation d'allongement enregistrée sur l'épaisseur peut s'expliquer par le fait que la valeur de l'épaisseur de la graine est la somme de celles des deux (2) cotylédons, de la coque et des jeux entre les deux cotylédons d'une part, et entre la coque et le cotylédon de l'autre.

Par contre, il est commode de considérer que pour la longueur et la largeur, la valeur du jeu entre cotylédons n'intervient guère.

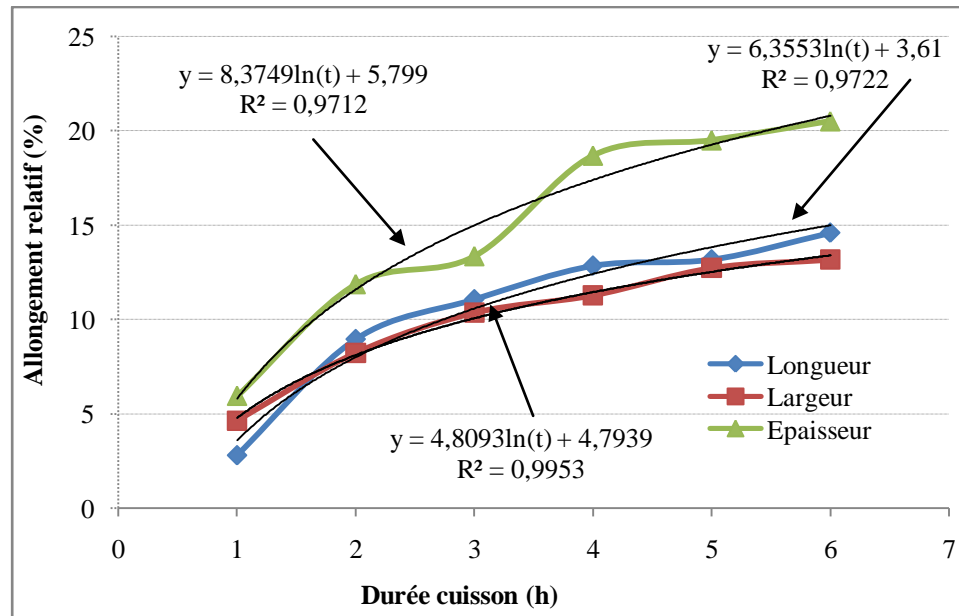


Figure 2-2. Allongements relatifs des dimensions des graines suivant la durée de la cuisson

Les relations mathématiques capables de décrire les allongements subis par les dimensions des graines et la durée t de la cuisson peuvent s'exprimer par les équations de tendances respectives:

$$A_L = 6,355 \ln(t) + 3,61 \quad (2-19)$$

$$A_l = 4,809 \ln(t) + 4,794 \quad (2-20)$$

$$A_e = 8,375 \ln(t) + 5,799 \quad (2-21)$$

Avec des coefficients de corrélation correspondants de $R^2 = 0,97$ (A_L), $R^2=0,99$ (A_l) et $R^2 = 0,97$ (A_e) où A_L , A_l et A_e désignent les allongements de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur.

❖ Effets de la cuisson sur les dimensions des cotylédons

Les résultats du tableau 2-2 montrent que, tout comme pour la graine, les dimensions des cotylédons croissent pendant la cuisson à eau. Lorsque la durée de cuisson varie de 0 à 6 h, la longueur croit de 8,4 à 8,91 mm, la largeur de 6,96 à 7,28 mm et l'épaisseur de 3,89 à 4,96 mm. D'autres auteurs indiquent pour l'épaisseur moyenne des cotylédons de néré (*Parkia biglobosa*) à teneur en eau de 13,66 (%) la valeurs à $3,88 \pm 0,46$ mm (Ahouansou, 2005). Si les valeurs moyennes arithmétique et géométrique des dimensions suivent les mêmes tendances d'accroissement que ces dernières, la sphéricité quant à elle varie très faiblement ou presque pas pendant la cuisson. Tout comme pour les

graines entières, la cuisson provoque la variation des dimensions des cotylédons de néré, induisant la modification de l'allongement de ces derniers.

Tableau 2-2. Dimensions axiales des cotylédons de néré à différentes durées de cuisson

Traitement	Dimensions moyennes (mm)					Sphéricité
	Longueur	Largeur	Epaisseur	Moyenne arithmétique	Moyenne géométrique	
Sans traitement	8,4 ± 1,15	6,96 ± 1,09	3,89 ± 0,77	6,42±0,87	6,08± 0,87	0,73±0,05
Cuisson (1 h)	8,52 ± 0,92	7,21 ± 0,92	4,13 ± 0,60	6,62 ± 0,56	6,30 ± 0,53	0,74 ± 0,06
Cuisson (2 h)	8,65 ± 0,98	7,27 ± 0,96	4,47 ± 0,81	6,8 ± 0,61	6,51 ± 0,60	0,76 ± 0,07
Cuisson (3 h)	8,70 ± 1,09	7,26 ± 1,22	4,60 ± 0,74	6,85 ± 0,69	6,58 ± 0,65	0,76 ± 0,07
Cuisson (4 h)	8,76 ± 0,97	7,28 ± 0,99	4,89 ± 0,68	6,98 ± 0,57	6,75 ± 0,55	0,77 ± 0,06
Cuisson (5 h)	8,82 ± 0,97	7,28 ± 0,84	4,92 ± 0,74	7,01 ± 0,54	6,78 ± 0,54	0,77 ± 0,07
Cuisson (6 h)	8,91 ± 0,88	7,28 ± 0,94	4,96 ± 0,85	7,05 ± 0,51	6,81 ± 0,52	0,77 ± 0,07

La figure 2-3 illustre les évolutions des allongements de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur durant la cuisson. De cette figure 2-3, il ressort que les allongements relatifs de la longueur et de la largeur des cotylédons sont faibles (2 à 6 %) comparés à ceux des graines entières (4 à 14 %). Cependant, l'allongement relatif de l'épaisseur est plus beaucoup plus élevé (20 à 27 %) concernant les cotylédons, notamment dans les trois dernières heures de la cuisson, que celui subi par les graines entières (13 à 21 %).

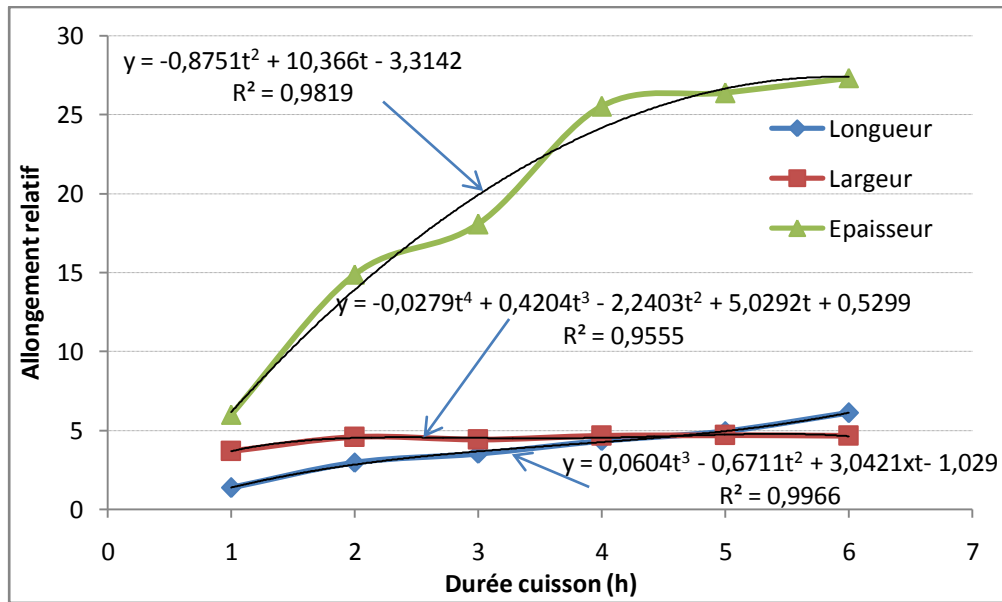


Figure 2-3. Allongements des dimensions des cotylédons en fonction de la durée de cuisson

Les relations mathématiques décrivant le comportement des allongements subis par les dimensions des cotylédons en fonction de la durée t de la cuisson s'expriment par les équations de tendances respectives :

$$A_L = 0,060t^3 - 0,671t^2 + 3,042t - 1,029 \quad (2-22)$$

$$A_l = - 0,0279t^4 + 0,420t^3 - 2,240 t^2 + 5,029t + 0,529 \quad (2-23)$$

$$A_e = 0,060t^3 - 0,671t^2 + 3,042t - 1,029 \quad (2-24)$$

avec des coefficients de corrélation correspondants de $R^2 = 0,993$ (A_L), $R^2=0,95$ (A_l) et $R^2 = 0,98$ (A_e) où A_L , A_l et A_e désignent respectivement les allongements de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur des cotylédons.

2.3.1.3. Paramètres de forme des graines et cotylédons

❖ Elongation et aplatissement des graines et des cotylédons

Le tableau 2-3 illustre la variation des paramètres de forme des graines et des cotylédons en fonction de la durée de la cuisson.

Tableau 2- 3. Effets de la cuisson sur les paramètres de forme des graines et cotylédons de néré

Traitement	Graines		Cotylédons	
	Élongation	Aplatissement	Élongation	Aplatissement
Sans traitement	1,23±0,17	1,72±0,38	1,22±0,15	1,83±0,32
Cuisson (1 h)	1,21±0,16	1,70±0,34	1,19±0,16	1,79±0,35
Cuisson (2 h)	1,25±0,20	1,67±0,36	1,20±0,16	1,68±0,40
Cuisson (3 h)	1,28±0,71	1,68±0,39	1,22±0,21	1,63±0,40
Cuisson (4 h)	1,25±0,20	1,62±0,34	1,22±0,19	1,52±0,31
Cuisson (5 h)	1,25±0,33	1,62±0,31	1,22±0,18	1,52±0,31
Cuisson (6 h)	1,25±0,23	1,62±0,31	1,24±0,20	1,51±0,33

Les valeurs de l'élongation et de l'aplatissement montrent que la graine de néré est d'une forme allongée et plate. De ce tableau 2-3, il ressort que, pendant la cuisson, le rapport entre la longueur et la largeur varie très faiblement : de 1,21 à 1,28 pour la graine, et de 1,19 à 1,24 pour les cotylédons. On note également une certaine baisse de la valeur du paramètre pendant la première heure de la cuisson. Cette observation semble révéler que, pendant cette phase, la largeur de la graine ou du cotylédon croît plus vite que sa longueur. De 2 à 6 h de cuisson, l'accroissement de la longueur prend de l'ascendance sur celui de la largeur. Par contre, les tendances au niveau des valeurs de l'aplatissement montrent une décroissance pendant la cuisson. Ce comportement laisse à penser que pendant la cuisson, l'épaisseur de la graine ou du cotylédon croît plus vite que leur largeur.

❖ Diamètre équivalent

Le diamètre équivalent d'une graine est le paramètre qui permet de la rapprocher de la sphère de référence qui aurait le même volume qu'elle, afin de comparer leurs diamètres. La figure 2-4 illustre l'évolution des diamètres équivalents des graines et des cotylédons en fonction de la durée de la cuisson.

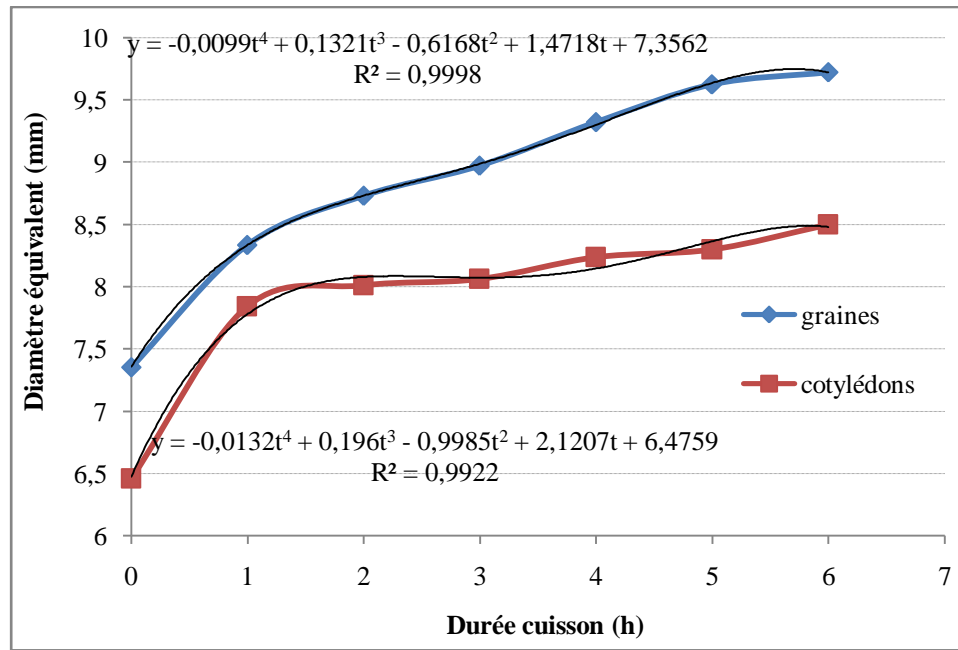


Figure 2-4. Évolution des diamètres équivalents de la graine et du cotylédon en fonction de la durée de cuisson

Ainsi, lorsque la durée de la cuisson passe de 0 à 6 h, les diamètres équivalents des graines et cotylédons croissent respectivement de 7,36 à 9,72 mm et de 6,46 à 8,50 mm. Les équations des courbes de tendance liant les diamètres équivalents et le temps de cuisson s'expriment par :

$$D_g = -0,0099t^4 + 0,132t^3 - 0,617t^2 + 1,472t + 7,356 \text{ (mm)} \quad (2-25)$$

$$D_c = -0,0132t^4 + 0,196t^3 - 0,998t^2 + 2,121t + 6,476 \text{ (mm)} \quad (2-26)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2 = 0,99$ et $R^2 = 0,99$ et où D_g et D_c désignent les diamètres équivalents de la graine et du cotylédon.

2.3.1.4. Aires des surfaces de la graine et du cotylédon

La figure 2-5 montre la variation des aires de la surface de la graine et du cotylédon en fonction de la durée de la cuisson. L'aire de la surface de la graine et du cotylédon croît en fonction de la durée de la cuisson. Ainsi, lorsque, la durée de la cuisson varie de 0 à 6 h, l'aire de la surface de la graine croît de 172,87 à 232,23 mm² et celle du cotylédon croît de 116,07 à 145,62 mm². Cette augmentation de l'aire des surfaces de la graine et du cotylédon s'explique par la variation de la teneur en eau qui croît respectivement de 16,14 à 284,62 % et de 14,94 à 212,5 %. Elle induit une augmentation des dimensions de la graine ou du cotylédon.

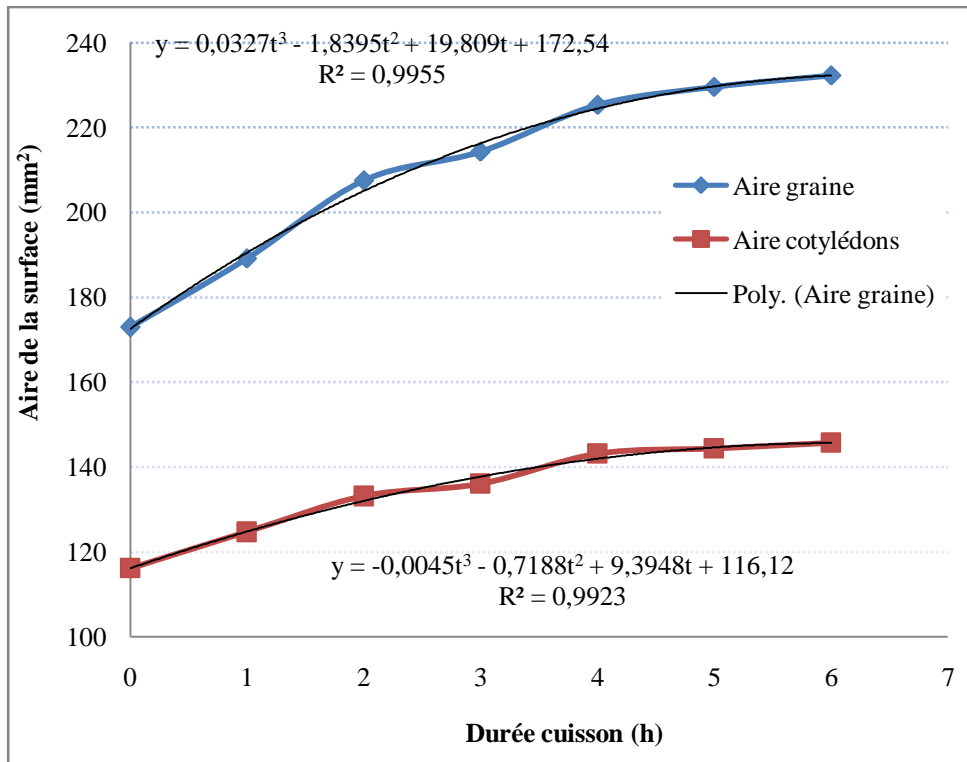


Figure 2-5. Variation des aires de surface de la graine et du cotylédon en fonction de la durée de cuisson

Les diamètres géométriques de la graine et du cotylédon croissent aussi respectivement de 7,42 à 8,66 mm et de 6,08 à 6,81 mm. La courbe d'évolution de l'aire de la graine entière est plus ascendante que celle du cotylédon. Les équations des courbes de tendance liant l'aire de la surface et le temps de cuisson s'exprime par les formules :

$$A_g = 0,0327t^3 - 1,839t^2 + 19,809t + 172,54 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2-27)$$

$$A_c = -0,0045t^3 - 0,718t^2 + 9,314t + 116,12 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2-28)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2=0,99$ et $R^2=0,99$ où A_g et A_c désignent les aires des surfaces de la graine et du cotylédon.

2.3.1.4. Effets de la cuisson sur les paramètres massiques des graines de néré et des cotylédons

❖ Masses de 1000 graines et de 1000 cotylédons

Les résultats des expériences concernant les mesures de la masse de 1000-graines de néré en fonction de la durée de cuisson sont montrés à la figure 2-6. Ils indiquent que, lorsque le temps de cuisson croît de 0 à 6 h, la masse de 1000-graines de néré s'accroît notablement de 231,66 à 508,33 g et celle des

cotylédons croit 166 à 330 g. Pendant ce prétraitement, les cellules de la graine et du cotylédon, sous l'action de la chaleur, se gorgent d'eau, provoquant l'accroissement de sa masse, suite à l'imbibition en eau des cotylédons et de la coque.

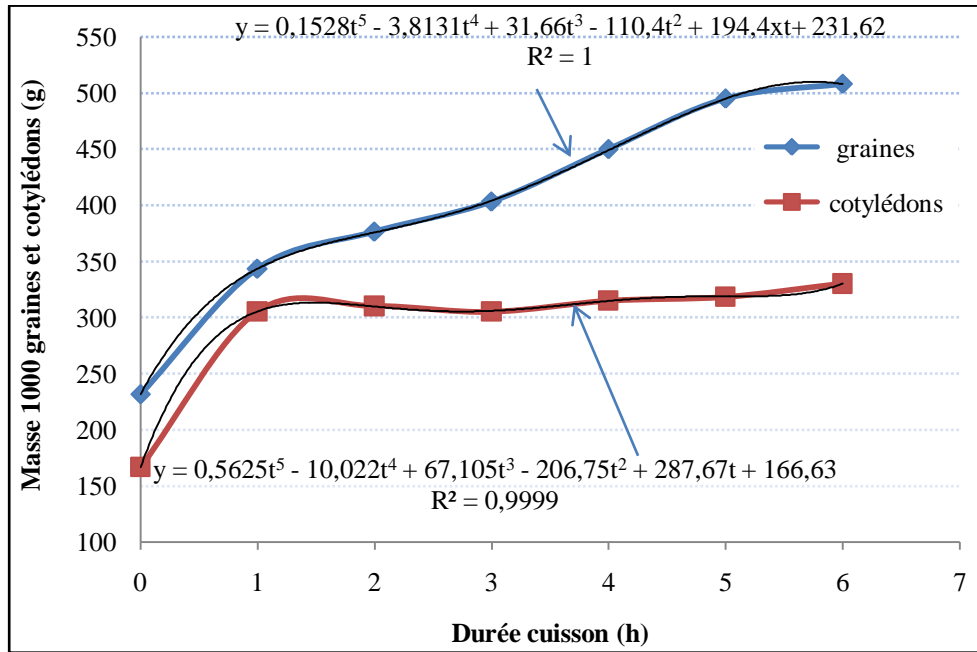


Figure 2-6. Effets de la cuisson sur les masses des 1000-graines et des 1000-cotylédons en fonction de sa durée

Si la masse de 1000-graines est ascendante pendant toute la durée de la cuisson, celle des 1000-cotylédons l'est seulement pendant la première heure de cuisson. Elle ne change pas de façon notable durant le reste du temps. Cela montre que, pendant la première heure de cuisson, l'augmentation de la masse de la graine est faite à travers celle du cotylédon, et le reste du temps, elle se poursuit à travers l'augmentation de la masse des coques qui s'imbibent d'eau. Cette imbibition fait alors varier le rapport $R_{C/G}$ des masses de ces deux principaux constituants de la graine défini par :

$$R_{C/G} = 100 \times \text{Masse.Cotylédons} / (\text{Masse.Cotylédons} + \text{Masse.Coque}) \quad (\%) \quad (2-29)$$

❖ Pourcentage de la masse des cotylédons sur la masse de la graine

La figure 2-7 présente l'évolution du rapport $R_{C/G}$ en fonction du temps de cuisson. Elle nous révèle que, pendant la toute première heure de la cuisson, ce rapport enregistre une augmentation, le portant de 72 à 89,3 %, soit un accroissement relatif de 24 %. Ensuite, à la fin de cette heure, le rapport $R_{C/G}$ commence à décroître de façon quasi linéaire jusqu'à atteindre la valeur 64,94 % après 6 h de cuisson. Ce qui correspond à une chute d'environ 9,80 % relativement à sa valeur initiale.

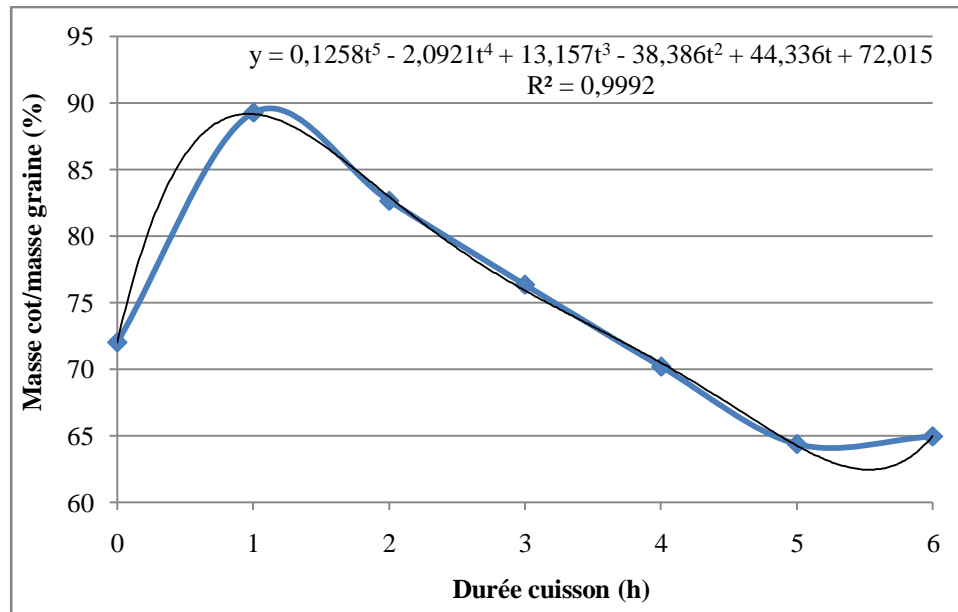


Figure 2-7. Effets de la cuisson sur le ratio (masse du cotylédon / masse de la graine) en fonction de sa durée

On peut être tenté d'en déduire que cette observation confirme bien le résultat précédent, stipulant que l'accroissement de masse de la graine, enregistré pendant la première heure, se fait essentiellement à travers celui de la masse des cotylédons. Ces derniers, sous les actions conjuguées de la chaleur et de l'humidité, absorbent de l'eau. Pendant le reste du temps de cuisson, allant de 1 h à 6 h, la masse de la coque s'accroît plus vite que celle des cotylédons. Ainsi, la coque ingurgite continuellement de l'eau, ce qui contribue à la fragilisation de sa structure, voire à la destruction de ses parois.

Cette courbe a l'avantage de fournir des indications utiles sur les valeurs maximales que pourraient atteindre les paramètres tels que le taux et le rendement de décortiquage en fonction de la durée de cuisson. Ces valeurs sont très importantes pour l'évaluation des performances techniques de la décortiqueuse, à travers le calcul du rendement au décortiquage.

Les modèles rendant mieux compte des effets de la cuisson, respectivement sur la masse des 1000-graines (M_{1000-g}), la masse de 1000 cotylédons ($M_{1000-cot}$) et le ratio (R_{CG}) de la masse de cotylédons (M_c) à celle de la graine (M_g), en fonction de la durée du traitement, sont illustrées sur les figures 2-6 et 2-7 et s'expriment par les équations :

$$M_{1000-g} = 0,152t^5 - 3,813t^4 + 31,66t^3 - 110,4t^2 + 194,4t + 231,62 \text{ (g)} \quad (2-30)$$

$$M_{1000-cot} = 0,562t^5 - 10,022t^4 + 67,105t^3 - 206,75t^2 + 287,67t + 166,63 \text{ (g)} \quad (2-31)$$

$$R_{C/G} = M_c / M_g = 0,125 \cdot t^5 + 2,092t^4 + 13,157t^3 - 38,386t^2 + 44,336t + 72,015 \text{ (%) } \quad (2-32)$$

Les coefficients de corrélation de ces modèles respectifs sont : $R^2=1$, $R^2=0,99$ et $R^2=0,99$.

❖ Aire massique des graines et cotylédons

La cuisson humide des graines à 100°C entraîne la baisse de l'aire massique des graines et des cotylédons par rapport au produit brut (tableau 2-4).

Tableau 2-4. Aires massiques des graines et cotylédons du néré durant la cuisson

Durée de cuisson (h)	Aire massique (m ² /kg)	
	Graines	Cotylédons
0	0,735 ±0,009 _a	0,788 ±0,008 _a
1	0,639 ±0,016 _b	0,634 ±0,007 _e
2	0,638 ±0,015 _b	0,652 ±0,006 _d
3	0,631 ±0,023 _b	0,670 ±0,005 _c
4	0,608 ±0,008 _c	0,670±0,008 _{bc}
5	0,589 ±0,009 _d	0,681±0,010 _{bc}
6	0,585 ±0,040 _d	0,688 ± 0,006 _b

NB: Les chiffres de la même colonne portant en indice la même lettre ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5%

Ainsi, lorsque la durée de la cuisson varie de 0 à 6 h, l'aire massique de la graine diminue de 0,735 à 0,585 m²/kg et celui des cotylédons de 0,788 à 0,634 m²/kg. Si l'évolution de ce paramètre caractéristique est décroissante de 0 à 6 h pour la graine, elle connaît un minimum à 1 h de cuisson, avant de croître progressivement pendant le reste du temps de cuisson. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que, pendant la cuisson, la masse de la graine s'élève plus vite que ses dimensions et sa surface.

Si la masse des graines est ascendante pendant toute la cuisson, (figure 2-6), elle le doit à celle des cotylédons qui connaît un fort taux d'accroissement pendant la première heure de cuisson (83 %), alors que ce taux devient faible pendant le reste du temps (8 %).

2.3.1.5. Effets de la cuisson sur les paramètres volumiques des graines et cotylédons de néré

❖ Volumes réels des graines et des cotylédons

La figure 2-8 exprime le comportement des volumes des graines de néré et des cotylédons durant la cuisson. Les résultats montrent que, lorsque le temps de cuisson s'élève de 0 à 6 h, le volume des graines croît de 0,208 à 0,482 dm³.

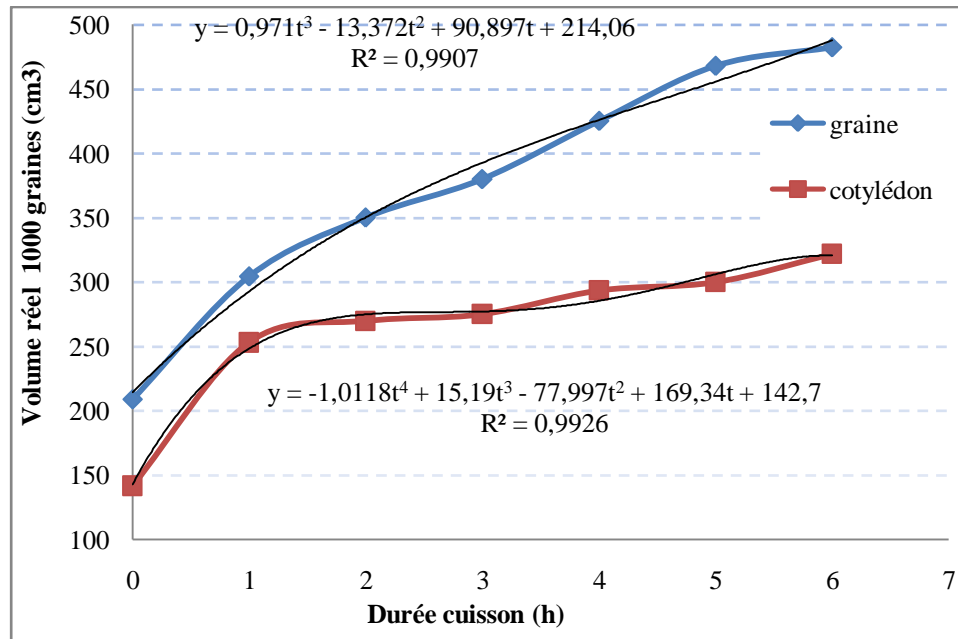


Figure 2-8. Evolution des volumes réels des graines et des cotylédons durant la cuisson

Cette augmentation est conséquente à celle des dimensions de la graine décrite présentée dans le tableau 2-1. En effet, la cuisson provoque une certaine dilatation de la coque et du cotylédon. Ce phénomène favorise la fragilisation de la coque et pourrait subséquemment faciliter un meilleur décortiquage contrairement à celui obtenu avec des graines crus secs difficiles à réaliser. La connaissance du volume de 1000-graines permet d'avoir des données très intéressantes et utiles pour la conception de certaines parties de la décortiqueuse aussi importantes que les autres telles que la trémie et la chambre de décortiquage.

Les équations décrivant respectivement les évolutions du volume des 1000-graines (V_{1000-g}) et de 1000-cotylédons ($V_{1000-cot}$) en fonction du temps (t) de cuisson s'expriment par :

$$V_{1000-g} = 0,971t^3 - 13,372t^2 + 90,897t + 214,06 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2-33)$$

$$V_{1000-c} = -1,0118t^4 + 15,19t^3 - 77,997t^2 + 169,34t + 142,7 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2-34)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2=0,99$ et $R^2 \approx 0,99$.

❖ Masses volumiques réelles des graines et cotylédons

A l'instar du ratio de la masse du cotylédon à celle de la graine (Figure 2-7), la masse volumique réelle affiche une croissance rapide qui connaît son pic après seulement 1 h de cuisson (Figure 2-9). Pendant cette phase, les masses de la graine et du cotylédon croissent plus vite que les volumes correspondants : c'est celle de l'absorption d'une importante quantité d'eau.

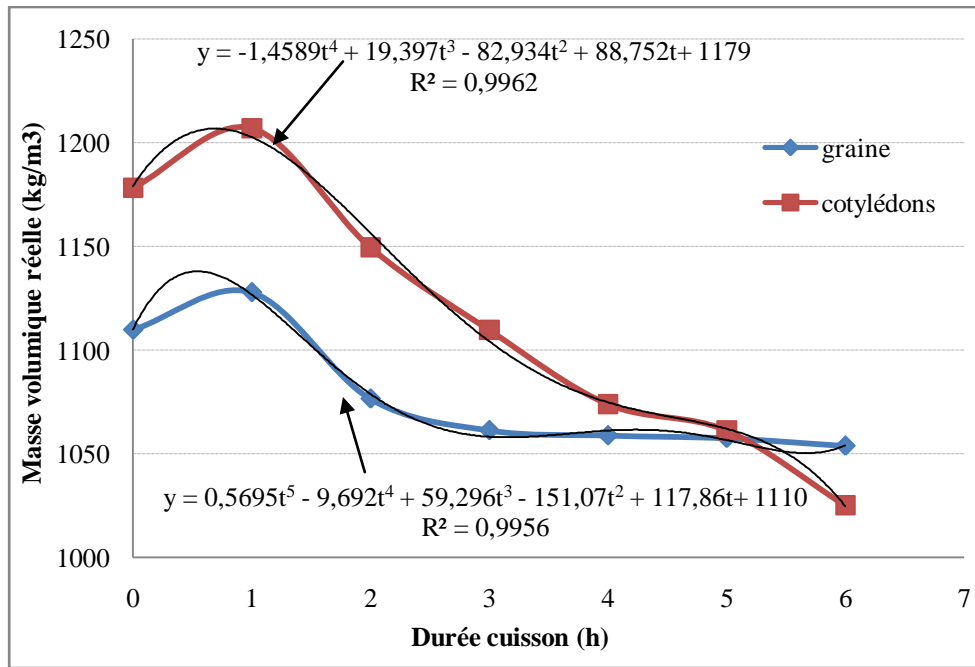


Figure 2-9. Effets de la cuisson sur la masse volumique réelle des graines et des cotylédons en fonction de sa durée.

Elle est favorisée par l'augmentation de la température de l'eau qui passe de 30 °C à 102 °C après 30 mn de cuisson, puis reste constante durant le reste du temps. Après, une heure de cuisson, les volumes réels des graines et cotylédons décroissent respectivement de 1127,9 à 1053,9 kg/m³ et de 1206,8 à 1025,2 kg/m³. Cette seconde phase pourrait être considérée comme celle de la forte dilatation des graines et des cotylédons où le volume croît à présent plus vite que la masse. Cette observation est confirmée par les résultats présentés dans les figures 2-2 et 2-3 qui illustrent les variations d'allongement des dimensions subies par les graines et donc les cotylédons pendant la cuisson.

Les équations décrivant respectivement les évolutions des masses volumiques réelles des graines et des cotylédons en fonction du temps (t) de cuisson et affichées sur la figure 2-10 s'expriment par :

$$Mv_g = 0,569t^5 - 9,692t^4 + 59,296t^3 - 151,07t^2 + 117,86t + 1110 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-35)$$

$$Mv_c = -1,459t^4 + 19,397t^3 - 82,934t^2 + 88,752t + 1179 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-36)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2 = 0,995$ et $R^2 = 0,996$.

❖ Masses volumiques apparentes des graines et des cotylédons

La masse volumique apparente est exprimée par le rapport entre la masse et le volume spécifique. Ce volume est la somme du volume réel et le volume de l'espace vide inter granulaire. Le volume

spécifique croit très vite par rapport à la masse de la graine, expliquant ainsi la forte décroissance de la courbe de variation de la masse volumique apparente de la graine et du cotylédon pendant la cuisson (Figure 2-10)

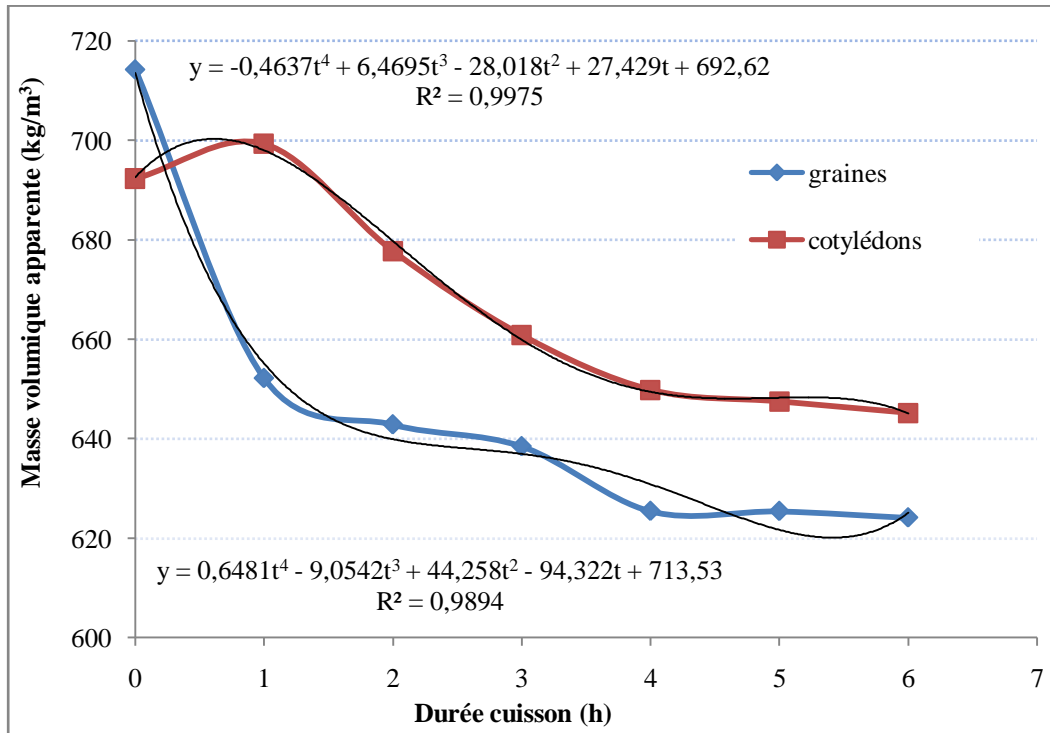


Figure 2-10. Évolutions des masses volumiques spécifiques des graines de néré et des cotylédons durant la cuisson

Les équations décrivant respectivement les évolutions des masses volumiques apparentes des graines (Ma_g) et des cotylédons (Ma_c) en fonction du temps (t) de cuisson sont affichées sur la figure 2-10 et s'expriment par :

$$Ma_g = 0,648t^4 - 9,054t^3 + 44,258t^2 - 94,322t + 713,53 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-37)$$

$$Ma_c = -0,464t^4 + 6,469t^3 - 28,01t^2 + 27,429t + 692,62 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-38)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs égaux à $R^2 = 0,989$ et $R^2 = 0,9975$.

❖ Porosité des graines et cotylédons

Le degré d'espaces vides contenus dans le produit est exprimé par la porosité. Les résultats d'estimation de la porosité des graines et des cotylédons de néré en fonction de la durée de la cuisson, sont présentés à la figure 2-11. Ils montrent un fort taux d'accroissement, environ 18,3 % de la porosité de la graine, pendant la première heure de cuisson dont celui du volume apparent.

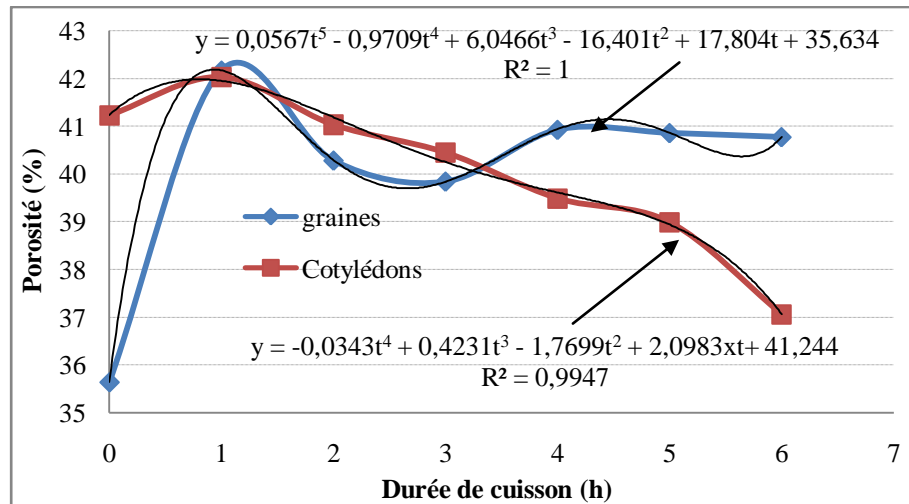


Figure 2-11. Variation de la porosité des graines et des cotylédons durant la cuisson

La porosité connaît sa valeur maximale après seulement 1 h de cuisson. Ce temps serait celui de début de l'affaiblissement des liaisons qui assurent l'adhérence entre la coque et le cotylédon. Après 4 h de cuisson, la porosité des graines varie très peu, signe qu'aucun changement significatif ne s'opère plus au niveau de l'adhérence coque - cotylédons de la graine. Il va sans dire que ce moment puisse être considéré comme celui mieux indiqué pour la réalisation d'un décorticage efficace des graines de néré. Par contre, on peut noter que le taux d'accroissement de la porosité du cotylédon durant la première heure de cuisson est nettement faible (1,94 %). De plus, la porosité du cotylédon adopte une allure décroissante après la toute première de cuisson (de 1 à 6 h). Cette période est caractérisée par la réduction du taux d'espace vide dans les cotylédons dont celle entre les deux demi-cotylédons.

Les modèles décrivant respectivement les évolutions des porosités de la graine (P_g) et du cotylédon (P_c) en fonction du temps (t) de cuisson s'expriment par les équations :

$$P_g = 0,0567 \cdot t^5 - 0,971t^4 + 6,046t^3 - 16,401t^2 + 17,804t + 35,634 \quad (\%) \quad (2-39)$$

$$P_c = -0,034t^4 + 0,423t^3 - 1,769t^2 + 2,098t + 41,244 \quad (\%) \quad (2-40)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2=1$ et $R^2 \approx 0,994$.

2.3.1.6. Paramètres de friction de la graine de néré

❖ Variation subie par le coefficient de frottement statique des graines

Les résultats des essais consignés dans le tableau 2-5 montrent que, des trois matériaux testés, la grille inox présente le coefficient de frottement le plus élevé pour une même durée de cuisson.

Tableau 2-5. Coefficients de frottement statique de la graine de néré durant l'opération de la cuisson : résultats d'essais sur différents matériaux

Durée cuisson (h)	Matériaux de tests		
	Tôle noire	Tôle inox	Grille inox
0	0,55±0,09a	0,47±0,07a	1,96±0,09 a
1	0,77±0,10b	0,74±0,10b	1,98±0,12a
2	0,82±0,11c	0,77±0,18b	2,10±0,48b
3	0,83±0,99c	0,85±0,15c	2,15±0,19b
4	1,09±0,13d	0,86±0,17c	2,21±0,13c
5	1,09±0,10d	0,93±0,21d	2,32±0,08c
6	1,10±0,11d	1,00±0,22d	2,42±0,15

NB: Les chiffres de la même colonne portant en indice la même lettre ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5%

La rugosité de sa surface favorise une forte adhérence des graines vis-à-vis de la grille. Les données ainsi recueillies sur le coefficient de frottement fournissent des indications intéressantes relativement à la valeur minimale de la force de frottement exercée par la grille sur la graine au cours du décorticage. On peut remarquer à travers ces résultats qu'en provoquant l'augmentation de la teneur en eau et de la masse de la graine, la cuisson induit aussi une élévation du coefficient de frottement. En effet, l'humidification des graines constitue un principal facteur d'adhérence entre la graine et le matériau sur lequel elle repose (ou se déplace) et vice-versa. Le coefficient de frottement statique de la graine de néré sur du bois à la teneur en eau de 10,25 % (bs) est égale à 0,43 (Ogunjimi et al., 2002). L'auteur n'a pas étudié l'effet de la variabilité de la teneur en eau de la graine de néré sur le coefficient de frottement entre la graine et les supports métalliques. Les résultats obtenus dans le tableau 2-5 confirment celles fournies par d'autres auteurs (Aviara et al., 2005 ; Aydin, 2002 ; Ögüt, 1998 ; Çarman, 1996 ; Peker, 1996 ; Joshi et al., 1993 ; Tsang-Mui-Chung et al., 1984). Ces derniers ont montré que les coefficients de frottement statique des graines étudiées augmentent avec leurs teneurs en eau.

❖ **Variation de l'angle statique au repos durant la cuisson des graines**

La figure 2-12 illustre la variabilité de l'angle statique au repos en fonction de la durée de la cuisson.

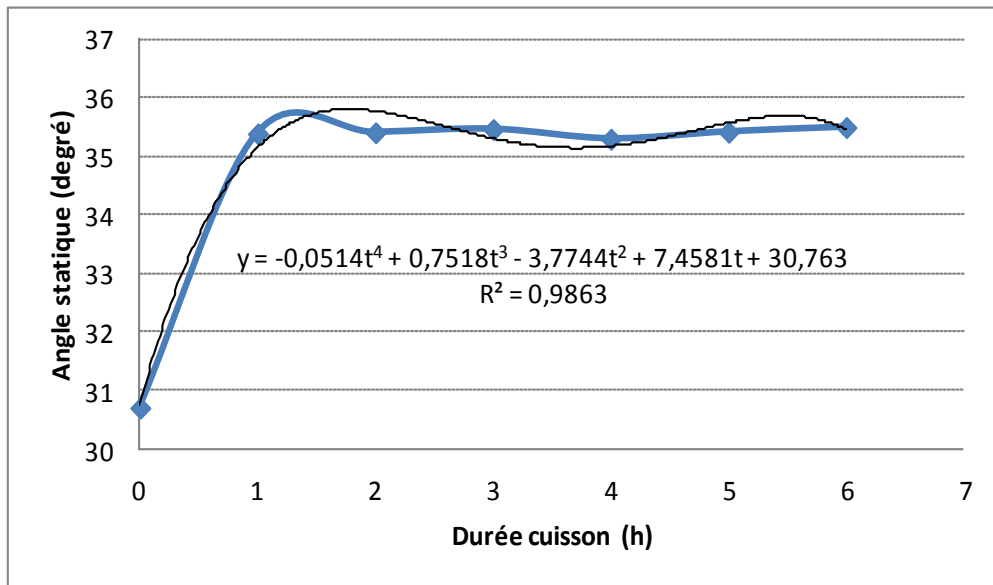


Figure 2-12. Effets de la cuisson sur l'angle statique au repos de la graine de néré

Pendant, la première heure de cuisson, cet angle augmente de 30,7° à 35,3°. Ainsi, lorsque la teneur en eau de la graine varie de 16,4 à 92,31 % (bs), l'angle statique au repos varie environ 15 % pour stagner quasiment pendant le reste du temps de la cuisson. L'angle statique au repos de la graine de néré (*Parkia fillicoides*), à la teneur en eau de 10,25 % (bs), est égale à 20,32° et celui karité à la teneur en eau de 15% (bs) est de 25° (Aviara et al., 2005), celui du melon à la teneur en eau de 4,55% est 30,57° (Seyed et al., 2006).

L'équation décrivant la variation de l'angle statique au repos de la graine (A_s) durant la cuisson s'expriment par :

$$\theta_s = -0,051t^4 + 0,751t^3 - 3,774t^2 + 7,458t + 30,76 \text{ (degré)} \quad (2-41)$$

avec un coefficient de corrélation $R^2 \approx 0,98$.

❖ **Variation de l'angle dynamique au repos durant la cuisson**

La courbe décrivant l'évolution de l'angle dynamique au repos de la graine suit la même tendance que celle de l'angle statique au repos. Avant la cuisson, à la teneur en eau de 16,4 %, l'angle dynamique au repos de la graine de néré est égal à 31° environ (Figure 2-1).

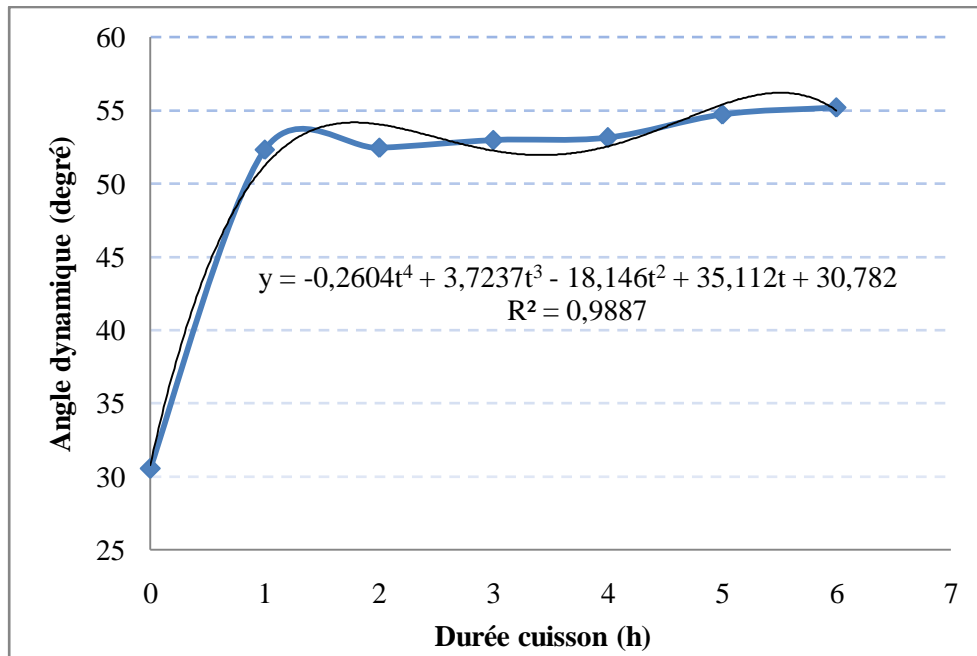


Figure 2-13. Effets de la cuisson sur l'angle dynamique au repos de la graine

Pendant la première heure de cuisson, cet angle croît de 71 %. Cette croissance est moins accélérée pendant le reste du temps de cuisson. Ainsi, entre 1 et 6 h, l'angle dynamique au repos croît de 5,5 %. L'équation décrivant le comportement de l'angle dynamique au repos de la graine (θ_d) durant la cuisson s'exprime par :

$$\theta_d = -0,260t^4 + 3,723t^3 - 18,146t^2 + 35,112t + 30,782 \text{ (degré)} \quad (2-42)$$

avec un coefficient de corrélation de $R^2 \approx 0,98$.

2.3.1.7. Effets de la cuisson sur la résistance minimale à la rupture des graines

La figure 2-14 montre l'évolution de la résistance minimale à la rupture de la graine en fonction de la durée de la cuisson. Lorsque la durée de la cuisson varie de 0 à 4 h, cette charge décroît de 228,84 N à 39,59 N. Les effets combinés de la chaleur et de l'humidité provoquent la baisse de la résistance minimale à la rupture de la graine de néré. Si la pente est lente pendant la première heure, elle est plus accentuée de la troisième à la quatrième heure. La charge à la rupture est quasi constante après la quatrième heure de cuisson.

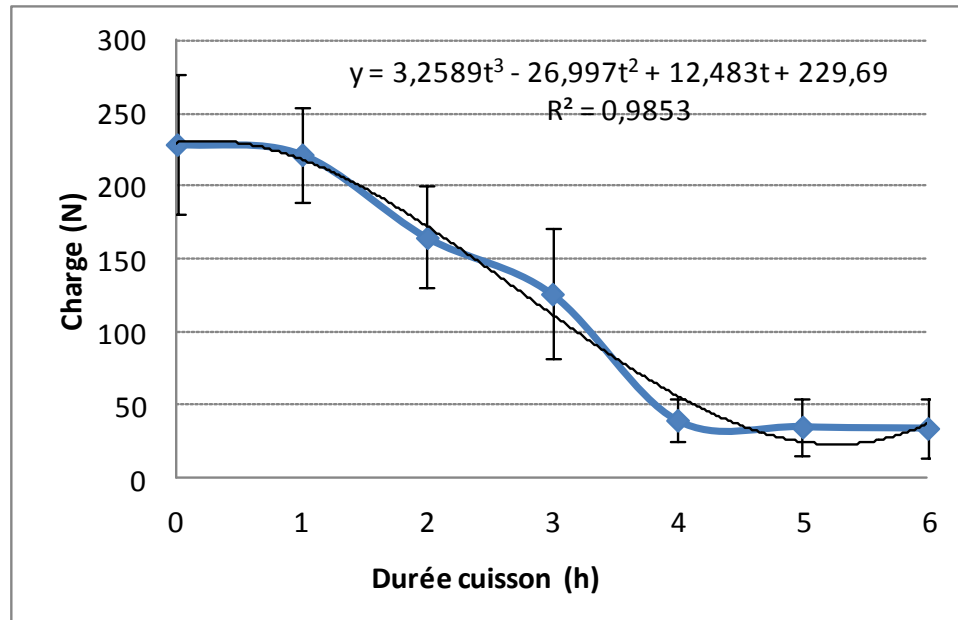


Figure 2-14. Evolution de la force minimale à la rupture en fonction de la durée de la cuisson

Ce comportement pourrait s'expliquer par le fait que, durant la cuisson, l'essentiel des changements physiques subis par la graine se passent pendant les quatre (4) premières heures. Dans le processus de la mise au point de la décortiqueuse, la charge à appliquer sur la graine doit tenir compte de ces données afin de réduire le taux de brisure des cotylédons. On en déduit que la durée de cuisson de 4 h serait suffisante pour un bon décortilage de la graine. La courbe de tendance correspondant à la variation de la charge minimale à la rupture s'exprime par l'équation:

$$F_c = 3,259t^3 - 26,997t^2 + 12,483t + 229,69 \text{ (N)} \quad (2-43)$$

avec une valeur du coefficient de régression $R^2 \approx 0,98$.

2.3.2. Séchage des graines

2.3.2.1. Effets du séchage sur la teneur en eau des graines et cotylédons

La figure 2-15 présente les variations de la teneur en eau des graines et cotylédons de néré au cours du séchage. Contrairement à la cuisson, lorsque la durée du séchage varie de 0 à 3 h, la teneur en eau des graines subit une diminution de 16,14 % à 6,64 % (bs) et celle des cotylédons diminue de 14,94 % à 6,38 %.

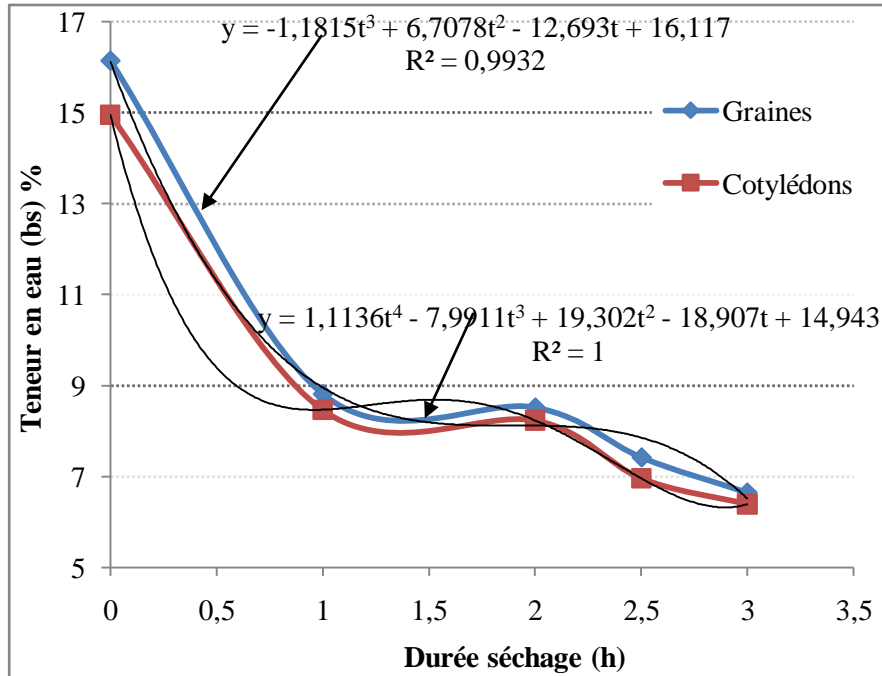


Figure 2-15. Effets du séchage sur la teneur en eau des graines et des cotylédons de néré

On note, pendant le séchage, un rapprochement entre les valeurs des teneurs en eau de la graine et du cotylédon bien que celle des graines restent supérieure à celle de cotylédons. Si avant le séchage, la différence entre la teneur en eau de la graine et du cotylédon est de 1,2 %, après le séchage, elle n'est plus que de 0,26 %. Pendant la première heure de séchage, la graine et le cotylédon perdent la moitié de leur teneur en eau passant de 16,14 % à 8,81 % pour la graine et de 14,94 % à 8,45 % pour le cotylédon. Pendant la suite du séchage, la pente de la décroissance est moins prononcée.

Les relations qui lient respectivement les teneurs en eau de la graine (H_g) et du cotylédon (H_c) à la durée de séchage s'expriment à travers les équations :

$$H_g = -1,1815t^3 + 6,707t^2 - 12,693t + 16,117 \quad (\%) \quad (2-44)$$

$$H_c = -1,113t^4 - 7,991t^3 + 19,302t^2 - 18,907t + 14,943 \quad (\%) \quad (2-45)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2=0,99$ et $R^2=1$ où H_g et H_c désignent les teneurs en eau (base sèche) de la graine et du cotylédon, et la durée t du séchage.

2.3.2.2. Effets du séchage sur les dimensions des graines et des cotylédons

Le tableau 2-6 présente les résultats des mesures des dimensions axiales de la graine de néré (*Parkia biglobosa*) en fonction de la durée de séchage.

❖ Effets du séchage sur les dimensions des graines

L'analyse des résultats du tableau 2-6 montre que les dimensions longueur, largeur et épaisseur des graines décroissent respectivement de 10,12 à 9,45 mm, de 8,3 à 7,4 mm et de 4,94 à 4,7 mm, lorsque la durée de séchage passe de 0 à 3 h, correspondant à une variation de la teneur en eau de la graine de 16,14 % à 6,64 % (bs).

Tableau 2-6. Dimensions axiales des graines de néré à différentes durées de séchage

Traitement	Dimensions moyennes (mm)					Sphéricité
	Longueur	Largeur	Epaisseur	Moyenne arithmétique	Moyenne géométrique	
Sans traitement	10,12 ± 1,26	8,30 ± 1,20	4,94 ± 0,72	7,78 ± 0,75	7,42 ± 0,68	0,74 ± 0,06
Séchage (1 h)	9,62 ± 0,92	7,76 ± 0,94	4,92±0,65	7,45 ± 1,07	7,14 ± 0,59	0,74 ± 0,05
Séchage (2 h)	9,59 ± 0,95	7,59 ± 0,94	4,85±0,64	7,35 ± 0,6	7,04 ± 0,58	0,74 ± 0,05
Séchage (2,5 h)	9,47 ± 1,07	7,44 ± 0,82	4,75±0,64	7,22 ± 0,68	6,92 ± 0,65	0,73 ± 0,04
Séchage (3 h)	9,45 ± 1,16	7,4 ± 1,05	4,7±0,91	7,20 ± 0,83	6,88±0,83	0,73 ± 0,06

Des travaux antérieurs indiquent les dimensions de la graine brute de néré (Ahouansou, 2005 ; Ahouansou et al., 2006). Selon les auteurs, à la teneur en eau de 13,66 %, les valeurs moyennes sont respectivement de: longueur 9,26±1,05 mm, largeur 7,59±0,87 mm et épaisseur 4,98±0,55 mm. Les dimensions moyennes de la graine brute de néré de la variété *Parkia fillicoides* à 10,25 % de teneur en eau (bs) sont respectivement 10,1 mm pour la longueur, la largeur 7,20 mm et l'épaisseur 5,5 mm (Ogunjimi et al., 2002). D'autres auteurs rapportent qu'à la teneur en eau de 6,42 %, les dimensions moyennes de la graine néré (*Parkia fillicoides*) sont de 10,80±0,76 mm ; 8,42±0,86 mm et 4,84±0,6 mm (Olajide and Ade Omowaye, 1999) respectivement pour la longueur, la largeur et l'épaisseur. On en déduit qu'à la même teneur en eau, les graines de néré (*Parkia biglobosa*) étudiées au Bénin, sont en tailles plus petites que les graines (*Parkia fillicoides*) étudiées au Nigeria.

Les résultats du tableau 2-6 confirment les ceux des travaux similaires de Aviara *et al.* (2005) réalisé sur le karité (*Vitellaria paradoxa*) (Aviara *et al.*, 2005). Ces derniers rapportent que lorsque la teneur en eau de la graine du karité varie de 39,40 % à 6 % (bs), la longueur, la largeur et la hauteur diminuent respectivement de 39,40 à 37 mm, de 28,30 à 26 mm et de 26,80 à 25 mm.

Les tendances décrites sur les dimensions des graines s'observent également sur les moyennes arithmétiques et géométriques qui décroissent respectivement de 7,78 à 7,20 mm et 7,42 à 6,80 mm. Mais la sphéricité des graines varie très faiblement pendant le séchage. Cette sphéricité est supérieure à celle de la graine de la fève (*Vicia faba L.*) qui est de 65 % (Altuntaş and Yildiz, 2005) à teneur en eau de 9,89 % mais plus faible que celle de la graine de soja qui présente une sphéricité de 85 % quand la teneur en eau de la graine est de 10 % (Kashaninejad *et al.*, 2008).

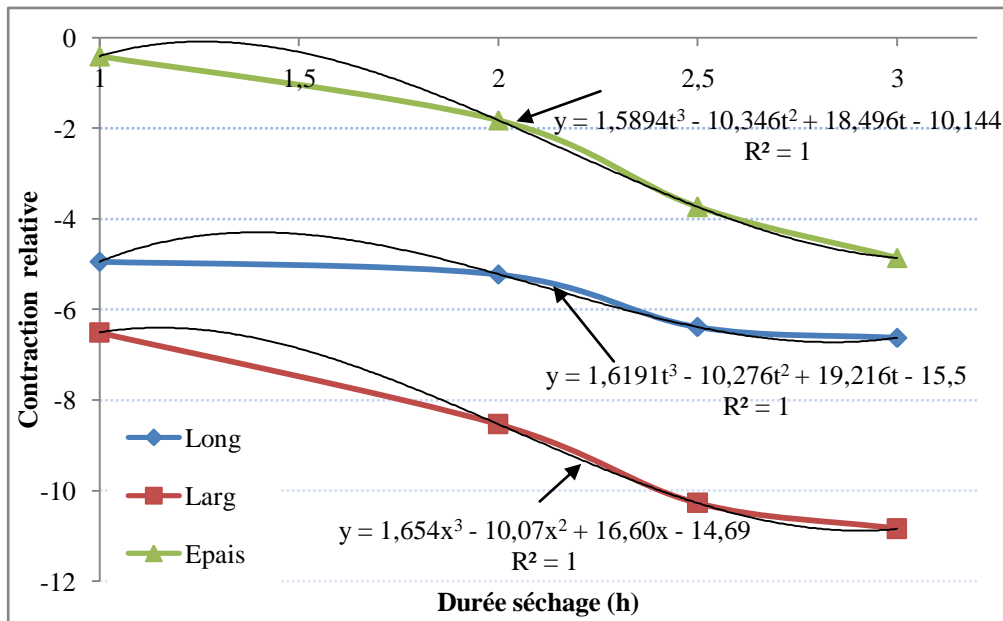


Figure 2-16. Rétrécissements relatifs des dimensions des graines fonction de la durée de séchage

Le séchage entraîne une diminution des dimensions des graines de néré induisant un rétrécissement de ces dernières. La figure 2-16 illustre les tendances au rétrécissement de la longueur, la largeur et l'épaisseur. De cette figure, il ressort que l'épaisseur est la dimension de la graine qui subit la plus grande variation tandis que la largeur est celle qui enregistre la plus petite. Tout comme pour l'augmentation durant la cuisson, cette forte réduction de l'épaisseur au cours du séchage s'explique par le fait que sa valeur est égale à la somme de celles des deux demis - cotylédons, de la coque, du jeu entre les demis - cotylédons et des jeux entre la coque et le cotylédon. Les relations décrivant les

contractions relatives des dimensions des graines et la durée du séchage s'expriment à travers les équations :

$$C_L = 1,654t^3 - 10,072t^2 + 16,606t - 14,695 \quad (2-46)$$

$$C_l = 1,619t^3 - 10,276t^2 + 19,216t - 15,5 \quad (2-47)$$

$$C_e = 1,589t^3 - 10,346t^2 + 18,496t - 10,144 \quad (2-48)$$

avec les coefficients de corrélation égaux à $R^2=1$ où C_L , C_l et C_e désignent respectivement les contractions relatives sur la longueur, la largeur et l'épaisseur.

❖ Effets du séchage sur les dimensions des cotylédons

Les résultats expérimentaux sur les mesures effectuées concernant les dimensions des cotylédons sont consignés dans le tableau 2-7.

Tableau 2-7. Dimensions axiales des cotylédons de néré en fonction de la durée de séchage

Traitement	Dimensions moyennes (mm)					Sphéricité
	Longueur	Largeur	Epaisseur	Moyenne arithmétique	Moyenne géométrique	
Sans traitement	8,4 ± 1,15	6,96 ± 1,09	3,89 ± 0,77	6,42±0,87	6,08± 0,87	0,73±0,05
Séchage (1 h)	8,37 ± 0,66	6,93 ± 0,75	3,87 ± 0,56	6,39 ± 0,44	6,05 ± 0,45	0,72 ± 0,05
Séchage (2 h)	8,32 ± 0,72	6,92 ± 0,73	3,80 ± 0,54	6,35 ± 0,45	6,01 ± 0,50	0,72 ± 0,05
Séchage (2,5 h)	8,28 ± 0,85	6,91 ± 0,81	3,71 ± 0,69	6,30 ± 0,53	5,93 ± 0,54	0,72 ± 0,06
Séchage (3 h)	8,26 ± 0,77	6,88 ± 0,71	3,65 ± 0,70	6,26 ± 0,46	5,88 ± 0,48	0,72 ± 0,06

Ils montrent, à l'instar de ceux obtenus pour la graine entière, que les dimensions des cotylédons diminuent pendant le séchage. Ainsi, lorsque la durée de séchage varie de 0 à 3 h, la longueur du cotylédon décroît de 8,4 à 8,26 mm, la largeur de 6,96 à 6,88 mm et l'épaisseur de 3,89 à 3,65 mm. Les moyennes arithmétique et géométrique des dimensions suivent les mêmes tendances en

décroissant respectivement de 6,42 mm à 6,26 mm et de 6,08 mm à 5,88 mm. Par contre, la sphéricité du cotylédon ne varie pratiquement pas durant le séchage.

Le séchage provoque une diminution des dimensions des cotylédons de néré. C'est à travers la contraction relative (figure 2-17) que l'on observe mieux les tendances des variations réellement subies par la longueur, la largeur et l'épaisseur. De cette figure, il ressort que les rétrécissements relatifs à la longueur et à la largeur des cotylédons sont de faible valeur. Par contre, la contraction relative subie par l'épaisseur est plus élevée comparée à celles de la longueur et de la largeur.

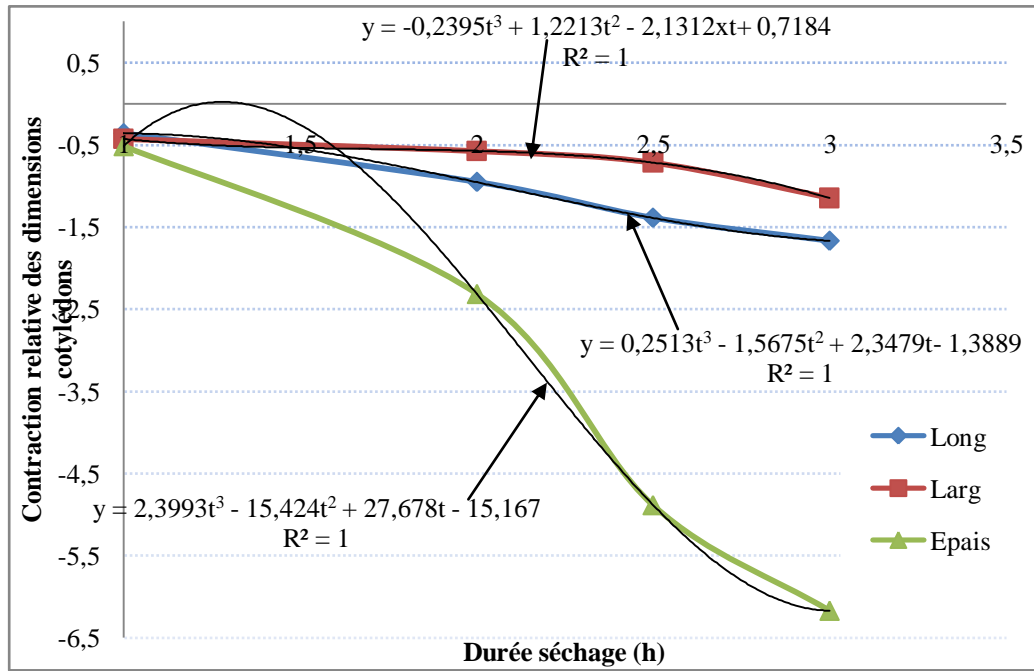


Figure 2-17. Rétrécissements des dimensions des cotylédons en fonction de la durée du séchage

Les modèles qui décrivent la contraction enregistrée par les dimensions des cotylédons et la durée de séchage s'expriment à travers les équations de régression :

$$C_L = 0,251t^3 - 1,567t^2 + 2,347t - 1,388 \quad (2-49)$$

$$C_l = -0,239t^3 + 1,221t^2 - 2,131t + 0,718 \quad (2-50)$$

$$C_e = 2,399t^3 - 15,524t^2 + 27,678t - 15,167 \quad (2-51)$$

avec des coefficients de corrélation tous égaux à $R^2=1$ et où C_L , C_l et C_e désignent respectivement les rétrécissements suivant la longueur, la largeur et l'épaisseur. Cette variation des dimensions provoquent, à l'intérieur de la graine et du cotylédon, des contraintes et des déformations

responsables de leur fragilisation. La maîtrise de l'intensité de cette fragilisation doit permettre de réaliser le décorticage de la graine tout en évitant au maximum la brisure du cotylédon.

2.3.2.3. Effets du séchage sur les paramètres de forme des graines et des cotylédons

❖ Élongation et aplatissement des graines

Le tableau 2-8 illustre les évolutions subies par les paramètres de forme des graines et des cotylédons en fonction de la durée du séchage.

Tableau 2-8 : Effets du séchage sur les paramètres de forme des graines et cotylédons de néré

Traitement	Graines		Cotylédons	
	Élongation	Aplatissement	Élongation	Aplatissement
Sans traitement	1,23±0,17	1,72±0,38	1,22±0,15	1,83±0,32
Séchage (1 h)	1,25±0,14	1,60±0,28	1,19±0,16	1,79±0,35
Séchage (2 h)	1,27±0,16	1,58±0,26	1,21±0,13	1,84±0,26
Séchage (2,5 h)	1,27±0,12	1,58±0,23	1,21±0,15	1,92±0,37
Séchage (3 h)	1,28±0,17	1,62±0,28	1,21±0,13	1,95±0,13

Ces résultats indiquent que, pendant le séchage, le rapport entre la longueur et la largeur augmente très faiblement : de 1,23 à 1,28 pour la graine (4,1 %), et de 1,58 à 1,72 pour les cotylédons (8,86 %). En ce qui concerne la cuisson, ce rapport varie respectivement de 1,21 à 1,28 pour la graine (5,79 %), et de 1,19 à 1,24 pour les cotylédons (4,20 %).

Si l'aplatissement des graines durant le séchage a une tendance décroissante, celui des cotylédons a une tendance ascendante. Au niveau des graines, l'épaisseur croît plus vite que la largeur, tandis qu'au niveau des cotylédons, on note plutôt un effet contraire.

❖ Effets du séchage sur le diamètre équivalent des graines et des cotylédons

La figure 2-18 illustre l'évolution des diamètres équivalents des graines et des cotylédons en fonction de la durée du séchage. Lorsque la durée du séchage passe de 0 à 3 h, les diamètres équivalents des graines et des cotylédons décroissent respectivement de 7,36 à 6,87 mm et de 6,46 à 5,73 mm. L'analyse de ces résultats montre qu'après seulement 2 h de séchage, les diamètres équivalents des graines sont réduits de 6,67 % et ceux des cotylédons de 11,30 %.

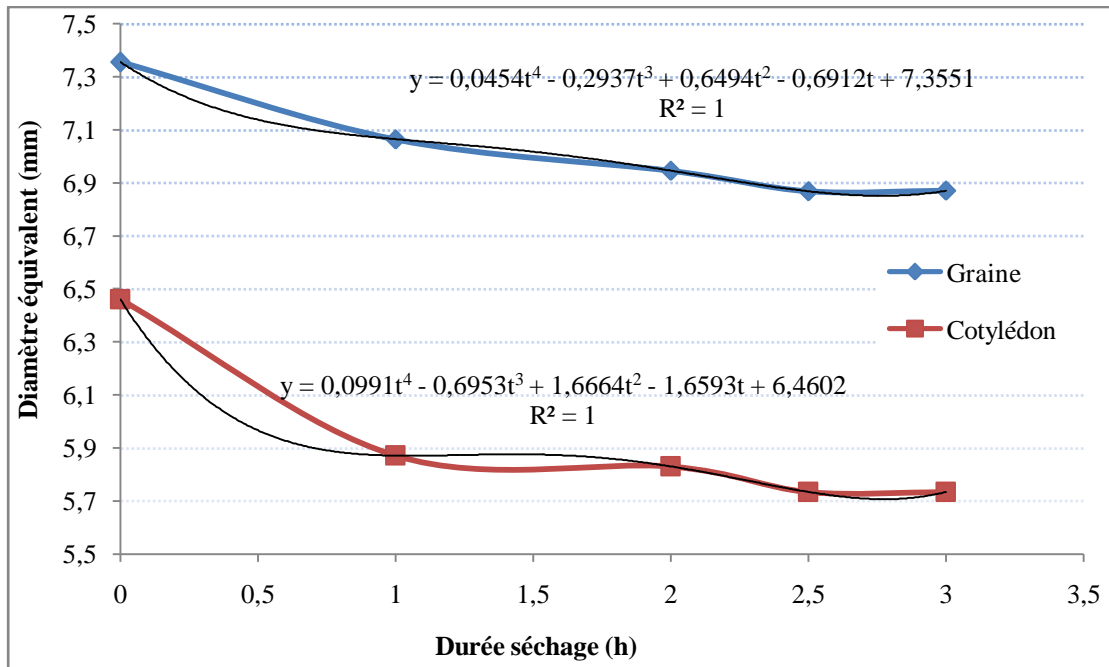


Figure 2-18. Évolution des diamètres équivalents de la graine et des cotylédons en fonction de la durée de séchage

Les modèles décrivant l'évolution des diamètres équivalents en fonction du temps de séchage s'expriment par les équations de tendances respectives :

$$D_g = 0,0454t^4 - 0,2937t^3 + 0,6494t^2 - 0,6912t + 7,3551 \quad (2-52)$$

$$D_c = 0,0991t^4 - 0,6953t^3 + 1,6664t^2 - 1,6593t + 6,4602 \quad (2-53)$$

avec des coefficients de corrélation tous deux égaux à $R^2=1$ et où D_g et D_c désignent les diamètres équivalents de la graine et du cotylédon.

2.3.2.4. Aires des surfaces des graines et des cotylédons

La figure 2-19 montre la variation de l'aire de la surface des graines et celle du cotylédon en fonction de la durée du séchage. L'analyse de cette figure révèle que les aires de la surface de la graine et du cotylédon décroissent en fonction de la durée du séchage. Ainsi, lorsque, la durée du séchage varie de 0 à 3 h, l'aire de la surface de la graine décroît de 172,87 à 148,63 mm² tandis que celle du cotylédon passe de 116,07 à 108,56 mm². Dans le même temps, les teneurs en eau des graines et des cotylédons subissent des réductions respectivement de 16,14 à 6,64 % et de 14,94 à 6,38 %. Les diamètres géométriques de la graine et du cotylédon connaissent une diminution les faisant passer respectivement de 7,42 à 6,88 mm et 6,08 à 5,88 mm.

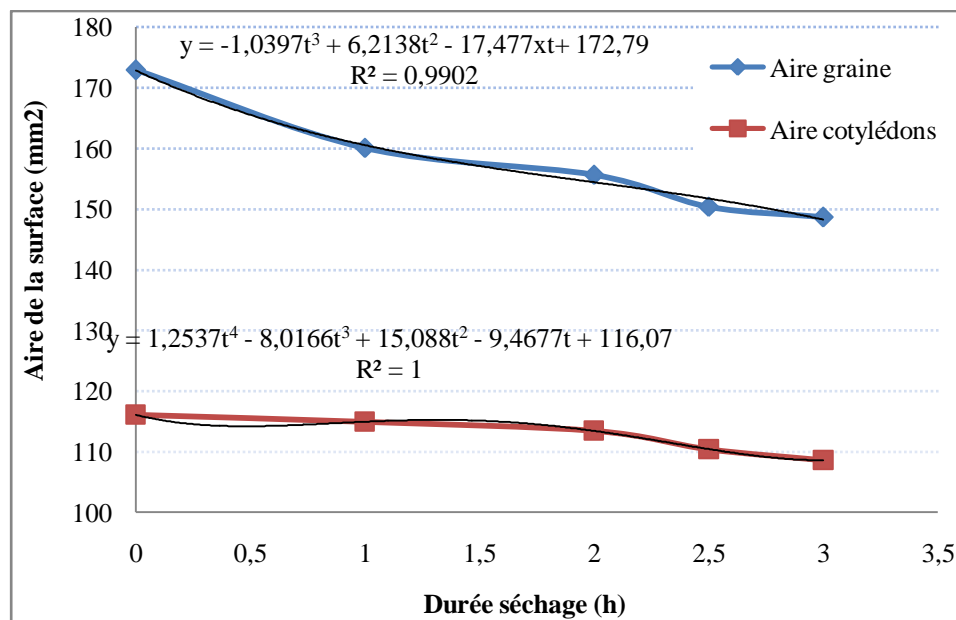


Figure 2-19. Modification subie par les aires de surface de la graine et du cotylédon en fonction de la durée de séchage

Les travaux réalisés au Nigeria ont montré qu'à la teneur en eau de 6,42 % (bs), le diamètre géométrique moyen de la graine de néré variété *Parkia fillicioidea* est égal à 7,42 mm et l'aire moyenne de la surface de la graine est égale à 175 mm² (Olajide and Ade Omowaye, 1999). Ces résultats confirment le fait qu'à la même teneur en eau, les graines de néré (*Parkia fillicioidea*) étudiées au Nigeria sont plus grosses que les graines (*Parkia biglobosa*) du Bénin.

Les comportements des aires des surfaces des graines de néré et de leurs cotylédons durant la cuisson peuvent s'exprimer en fonction du temps d'application par les équations :

$$A_g = 0,0327t^3 - 1,839t^2 + 19,809t + 172,54 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2-54)$$

$$A_c = -0,0045t^3 - 0,718t^2 + 9,314t + 116,12 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2-55)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2 = 0,99$ et $R^2 = 0,99$ où A_g et A_c , désignent les aires des surfaces de la graine et du cotylédon.

2.3.2.4. Effets du séchage sur les paramètres massiques des graines de néré

❖ Masse de 1000 graines et masse de 1000 cotylédons

La figure 2-20 présente les résultats des expériences concernant les mesures de la masse de 1000-graines et 1000-cotylédons de néré en fonction de la durée du séchage. Ils indiquent que, lorsque le

temps de séchage à 105°C varie de 0 à 3 h, la masse de 1000-graines de néré décroît de 231,66 à 212,66 g alors que celle des cotylédons diminue de 166 à 137,84 g.

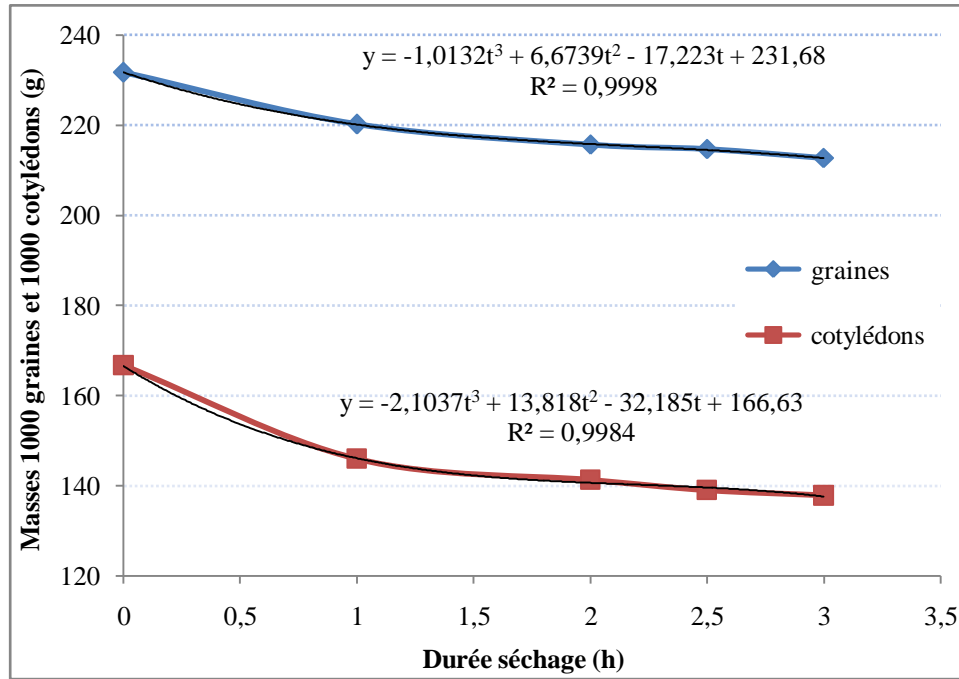


Figure 2-20. Evolution de la masse des graines et des cotylédons durant le séchage

Pendant ce prétraitement, les cellules de la graine et du cotylédon, sous l'action de la chaleur sèche, perdent l'humidité, provoquant la décroissance de sa masse, suite au dessèchement des cotylédons et de la coque. Ce dessèchement fait modifier le rapport $R_{C/G}$ des masses de ces deux principaux constituants de la graine défini par:

$$R_{C/G} = 100 \times \text{Masse.Cotylédons} / (\text{Masse.Cotylédons} + \text{Masse.Coque})(\%)$$

Les modèles rendant mieux compte des effets de la cuisson, sur la masse des 1000-graines (M_{1000-g}) et la masse de 1000 cotylédons ($M_{1000-cot}$) en fonction de la durée du traitement, sont illustrées par les figures 2-6 et 2-7 et s'expriment respectivement par :

$$M_{1000-g} = 1,013t^3 + 6,673t^2 - 17,223t + 231,68 \quad (g) \quad (2-56)$$

$$M_{1000-cot} = -2,103t^3 + 13,818t^2 - 32,185t + 166,63 \quad (g) \quad (2-57)$$

Les coefficients de détermination de ces modèles ont tous deux la valeur $R^2=0,99$.

❖ Effets du séchage sur le pourcentage masse cotylédons sur masse graine

La figure 2-21 présente la variation du rapport $R_{C/G}$ en fonction du temps de séchage. Elle montre que ce rapport est décroissant pendant toute la durée du séchage. On peut en déduire que la masse du cotylédon décroît plus vite que celle de la graine. Pendant la première heure de séchage, cette décroissance est plus accentuée, portant le rapport $R_{C/G}$ de 72 % à 66,2 %, soit une baisse relative de 8 %. Pendant les deux heures qui suivent, la teneur en eau a varié de 2,32 %.

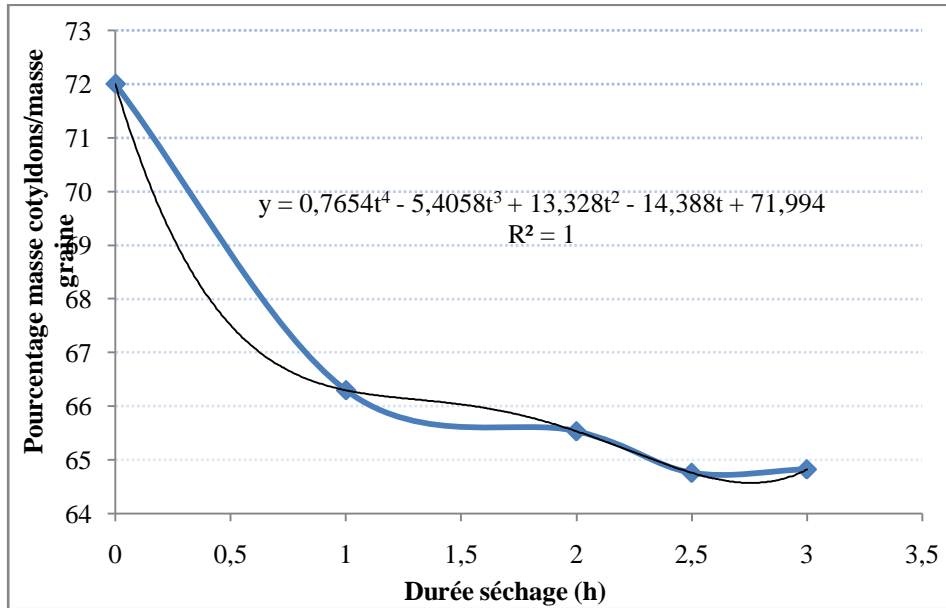


Figure 2-21. Évolution du rapport entre la masse du cotylédon et celle de la graine en fonction de la durée de séchage

Tout comme pour les expériences de la cuisson, cette figure fournit des indications utiles sur les valeurs maximales que pourraient atteindre le taux et le rendement de décortiquage en fonction de la durée du séchage. Ces valeurs sont importantes pour l'estimation des performances techniques de la décortiqueuse à travers le calcul du rendement au décortiquage.

Le modèle mathématique rendant mieux compte de l'effet du séchage sur le rapport ($R_{C/G}$) de la masse de cotylédons (M_c) à celle de la graine (M_g), en fonction de la durée du traitement, est polynomial et exprimé par l'équation :

$$R_{C/G} = M_c / M_g = 0,765t^4 - 5,405t^3 + 13,328t^2 - 14,388t + 71,994 (\%) \quad (2-58).$$

Le coefficient de corrélation de ce modèle est de $R^2=1$.

❖ Effets du séchage sur les aires massiques des graines et des cotylédons

Le séchage des graines à 105°C entraîne la réduction des aires massiques des graines et des cotylédons par rapport au produit brut, comme l'en témoignent les résultats présentés dans le tableau 2-9, de façon analogue celle obtenue pour la cuisson humide des graines à 100°C.

Tableau 2-9. Aires massiques des graines et des cotylédons du néré durant le séchage

Durée séchage (h)	Aire massique (m ² /kg)	
	Graines	Cotylédons
0	0,735 ±0,009 _a	0,788 ±0,008 _a
1	0,71 ±0,02 _b	0,77 ±0,003 _b
2	0,70 ±0,02 _b	0,76 ±0,02 _b
2,5	0,69 ±0,03 _c	0,75 ±0,03 _c
3	0,69 ±0,03 _c	0,75±0,03 _c

NB: Les chiffres de la même colonne portant en indice la même lettre ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5%

En effet, l'analyse des valeurs contenues dans le tableau 2-8 montre que, lorsque la durée du séchage varie de 0 à 3 h, l'aire massique de la graine varie de 0,735 à 0,60 m²/kg et celle des cotylédons change de 0,788 à 0,74 m²/kg. Toutefois, ces modifications sont moins accentuées en séchage qu'au cours de la cuisson humide, pour laquelle on enregistre respectivement de 0,735 à 0,585 m²/kg pour la graine et de 0,788 à 0,634 kg/m² pour le cotylédon.

2.3.2.5. Effets du séchage sur les paramètres volumiques des graines et cotylédons

❖ Volumes réels des graines et des cotylédons

Les modifications obtenues, en ce qui concerne le volume des graines de néré durant le séchage, sont illustrées par la figure 2-22. Les résultats montrent qu'après un temps de séchage de 3 h, le volume des graines décroît de 208 à 197 cm³. Rappelons que pendant la cuisson des graines de 0 à 6 h, le volume s'est accru de 208 à 482 cm³. Cette diminution de volume enregistrée pendant le séchage des graines est conséquente à la réduction des dimensions de la graine décrite à travers le tableau 2-7. Le

séchage provoque donc la contraction de la coque et du cotylédon. Il convient de souligner que le rétrécissement des cotylédons est plus élevé que celui des graines entières. Ce phénomène favorise la fragilisation de la coque et pourrait ainsi permettre d'obtenir un bon décorticage. Si pendant la cuisson, le volume des graines augmente de 131,7 %, on retient que pendant le séchage, il ne baisse que de 5,28 %. On pourrait en déduire que la cuisson provoque une forte fragilisation de la graine que le séchage. Cela pourrait constituer l'indication que les performances d'une décortiqueuse à graines cuites soient meilleures à celles d'une décortiqueuse utilisant les graines séchées.

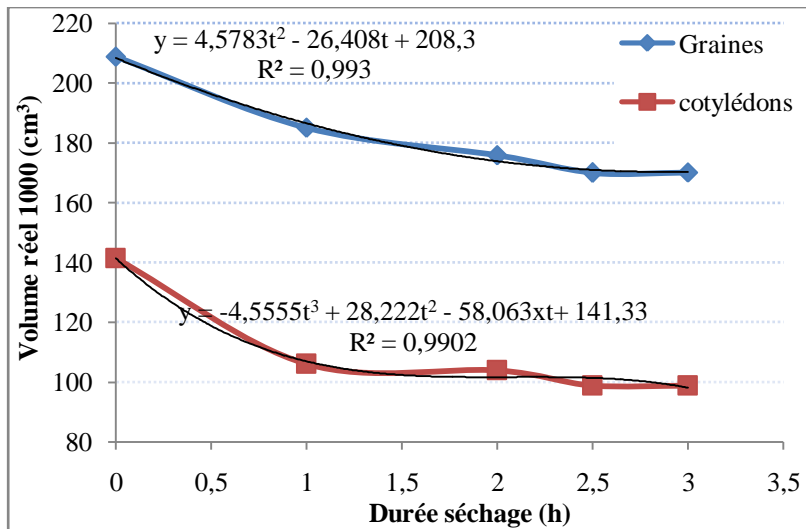


Figure 2-22. Evolution du volume réel des 1000-graines et des 1000-cotylédons durant le séchage en fonction du temps d'application

La dilatation des graines pendant la cuisson et la contraction pendant le séchage créent des contraintes susceptibles de réduire l'adhérence entre la coque et le cotylédon.

Les équations décrivant respectivement les évolutions du volume des 1000-graines (V_{1000-g}) et de 1000-cotylédons ($V_{1000-cot}$) en fonction du temps (t) de cuisson s'expriment par :

$$V_{1000-g} = 4,578t^2 - 26,408t + 208,3 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2-59)$$

$$V_{1000-c} = -4,555t^3 + 28,222t^2 - 58,063t + 141,33 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2-60)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2 \approx 0,99$ et $R^2 \approx 0,99$.

❖ Masses volumiques réelles des graines et des cotylédons

La figure 2-23 montre la variation de la masse volumique réelle des graines et cotylédons pendant du séchage. Pendant le séchage, les masse volumiques des graines et cotylédons croissent respectivement de 1109,8 à 1263,38 kg/m^3 et de 1178,07 à 1406,17 kg/m^3 . Si dans le cas du séchage la courbe est

ascendante, elle est décroissante pendant la cuisson des graines. On pourrait en déduire que dans le cas du séchage, les volumes des graines et cotylédons décroissent moins vite que leur masse. Dans le cas de la cuisson, le volume croit plus vite que la masse.

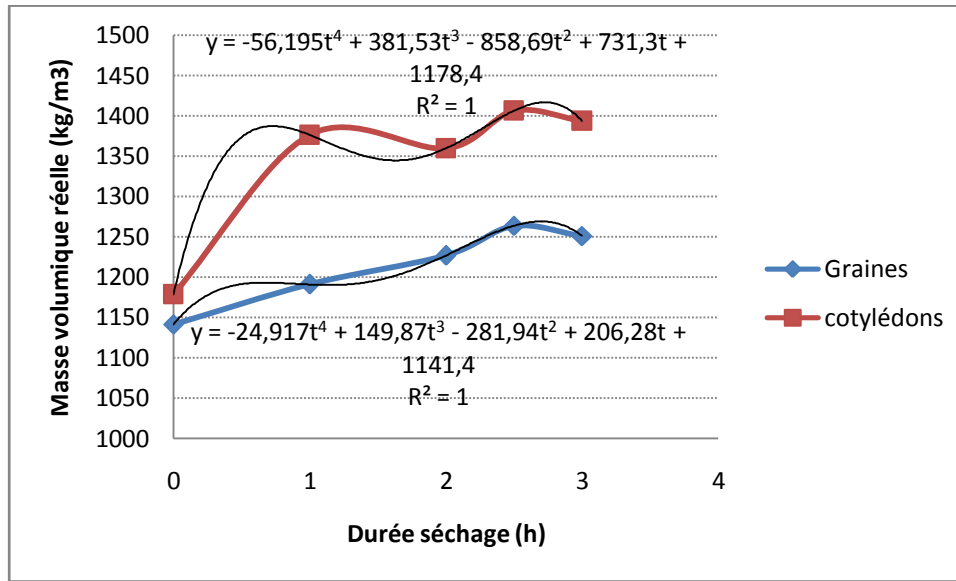


Figure 2-23. Variation de la masse volumique réelle des graines et des cotylédons durant le séchage

Les équations décrivant respectivement les évolutions des masses volumiques réelles des graines et cotylédons en fonction du temps (t) de cuisson sont illustrées sur la figure 2-23 et s'expriment par :

$$Mv_{-c} = -24,917t^4 + 149,87t^3 - 281,94t^2 + 206,28t + 1141,4 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-61)$$

$$Mv_{-c} = -56,195t^4 + 381,53t^3 - 858,69t^2 + 731,3t + 1178,4 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-62)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2 = 1$ et $R^2=1$

❖ Masses volumiques apparentes des graines et des cotylédons

La masse volumique apparente est exprimée par le rapport entre la masse et le volume apparent. Ce volume est la somme du volume réel et du volume de l'espace vide inter granulaire. Les tendances illustrées sur la figure 2-24 montrent que le volume apparent décroît moins vite par rapport à la masse de la graine, expliquant ainsi la légère décroissance de la courbe de variation de la masse volumique apparente de la graine pendant le séchage. Ainsi pendant le séchage la masse volumique apparente varie entre 714,29 et 687,07 kg/m³. Le volume apparent du cotylédon décroît moins vite que sa masse. On enregistre alors une ascendance de la courbe de variation de la masse volumique apparente en fonction de la durée de séchage.

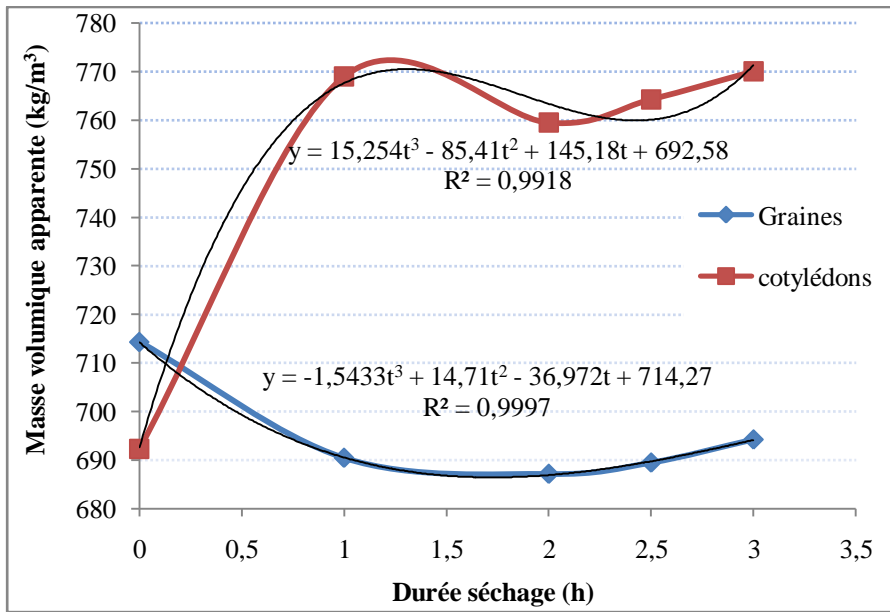


Figure 2-24. Variation des masses volumiques apparentes des graines et cotylédons durant le séchage

Les équations décrivant respectivement les évolutions des masses volumiques apparentes des graines (Ma_g) et cotylédons (Ma_c) en fonction du temps (t) de cuisson sont illustrées sur la figure 2-10 et s'expriment par :

$$Ma_g = -1,543t^3 + 14,71t^2 - 36,972t + 714,27 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-63)$$

$$Ma_c = 15,254t^3 - 85,41t^2 + 145,18t + 692,58 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-64)$$

avec des coefficients de détermination respectifs égaux à $R^2 \approx 0,99$ et $R^2 \approx 0,99$

❖ Effets du séchage sur la porosité des graines et des cotylédons

Les tests effectués en vue d'évaluer le comportement de la porosité des graines et de leurs cotylédons durant le séchage ont permis d'obtenir les valeurs présentées sous la forme de la figure 2-25. Ces résultats montrent un accroissement de la porosité de la graine et du cotylédon pendant le séchage. La porosité connaît sa valeur maximale au bout de deux heures et demie (2,5) de séchage. Après deux (2) heures de séchage, on note un rapprochement entre les valeurs de la porosité de la graine et celles du cotylédon.

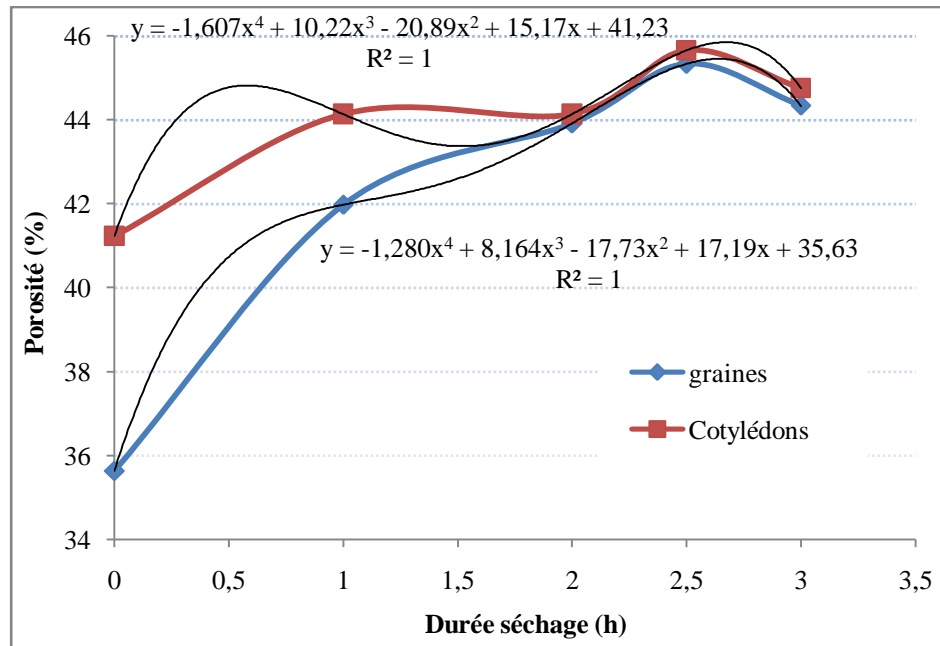


Figure 2-25. Effets du séchage sur la porosité des graines et des cotylédons en fonction de la durée d'application

Les équations décrivant respectivement les évolutions des porosités de la graine (P_g) et du cotylédon (P_c) en fonction du temps (t) de cuisson s'expriment par :

$$P_g = 0,0567 \cdot t^5 - 0,971t^4 + 6,046t^3 - 16,401t^2 + 17,804t + 35,634 (\%) \quad (2-65)$$

$$P_c = -0,034t^4 + 0,423t^3 - 1,769t^2 + 2,098t + 41,244 (\%) \quad (2-66)$$

Avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2=1$ et $R^2 \approx 0,994$.

2.3.2.6. Effets du séchage sur l'angle maximal au repos et le coefficient de frottement

❖ Effets du séchage sur le coefficient de frottement de la graine

Les résultats du tableau 2-9 nous montrent que, des trois matériaux testés, la grille inox présente le coefficient de frottement le plus élevé pour une même durée de séchage. L'état rugueux de la surface de la grille explique ce résultat. Ces données acquises sur le coefficient de frottement donnent des indications intéressantes sur la valeur minimale de la force de frottement qu'exercera la grille sur la graine lorsqu'une telle grille aura été développée et appliquée pour son décorticage.

De plus, ces résultats serviront de références à la détermination des valeurs minimales de la résistance des graines, différemment prétraitées notamment par la cuisson, le trempage ou le séchage, sous les contraintes imposées par le décorticage.

La tôle inox lisse, à l'opposé de la grille, exerce moins de frottements sur les graines. La tôle inoxydable, alliage de fer et de chrome, présente une faible rugosité par rapport à la tôle noire qui, de par sa nature, est recouverte de la rouille découlant des réactions d'oxydoréduction.

Tableau 2-10. Coefficients de frottement des graines sur différents matériaux

Durée séchage (h)	Matériaux testés		
	Tôle noire	Tôle inox	Grille inox
0	0,55±0,09	0,47±0,07	1,96±0,09
1	0,53±0,10	0,44±0,07	1,88±0,12
2	0,51±0,03	0,38±0,05	1,88±0,10
2,5	0,49±0,07	0,38±0,03	1,66±0,14
3	0,44±0,09	0,38±0,03	1,54±0,12

Le séchage permet aussi la baisse du coefficient de frottement. En effet, il provoque l'évaporation de l'eau libre, facteur d'adhérence entre la graine et le matériau de contact. Le poids de la graine est réduit par le séchage en raison de l'évacuation de l'eau libre. Ces résultats confirment ainsi les résultats des travaux antérieurs qui ont montré que la baisse de la teneur de la graine par séchage entraîne la baisse du coefficient de frottement statique de façon linéaire (Gupta and Das, 1998). A la teneur en eau 6,42 %, les coefficients de frottement de la graine de néré (*Parkia fillicoides*) sur la tôle galvanisée, la vitre et le contre plaqué sont respectivement de 0,38, 0,35 et 0,44 (Olajide and Ade Omowaye, 1999). La valeur du coefficient statique de frottement de la graine de néré (*Parkia fillicoides*) sur du bois, à la teneur en eau de 10,25 %, est égale à 0,43 (Ogunjimi et al., 2002).

❖ Effets du séchage sur l'angle statique au repos

Tout comme le coefficient de frottement, le séchage provoque la baisse de l'angle statique au repos (figure 2.26). Ainsi, lorsque la durée de séchage de la graine varie de 0 à 3 h, cet angle décroît de 30,70° à 28,61°, soit une baisse de 6,87 %.

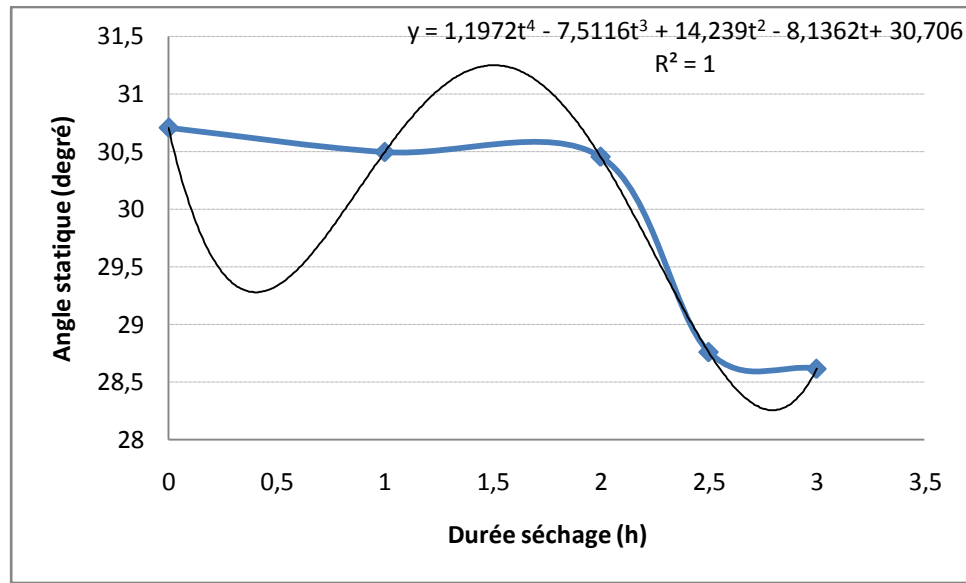


Figure 2-26 : Effets du séchage sur l'angle statique au repos de la graine de néré

Pendant le séchage, la teneur en eau de la graine diminue de 16,14 % à 6,44 %. C'est cette baisse qui explique l'allure décroissante de l'angle statique au repos. Les valeurs obtenues de l'angle sont supérieures à celles publiées par certains auteurs, qui rapportent respectivement des valeurs de $20,32^{\circ} \pm 1,84^{\circ}$ (Ogunjimi et al., 2002 ; Olajide and Ade Omowaye, 1999) et 13° à teneurs en eau correspondantes de 10,25 % et 6,42 % (bs), pour les graines néré (*Parkia fillicoides*) (Olajide and Ade Omowaye, 1999) du Nigeria. Ces valeurs de l'angle au repos sont proches de celle de la graine du soja ($32-35^{\circ}$) (Kashaninejad et al., 2008 ; Peker, 1996) , des graines de citrouille (*Cucurbita pepo*) ($29-30^{\circ}$) (Paksoy and Aydin, 2004 ; Fliedel et al., 1996), de pastèque (*Citrillus lanatus*) ($28-42^{\circ}$) (Aviara et al., 1999 ; Suthar and Das, 1996) , du haricot mungo (*Vigna radiata*) ($26,6^{\circ}-30^{\circ}$) (Nimkar and Chattopadhyay, 2001), du lin (*Linum usitatissimum*) ($21,6-33,4^{\circ}$) (Coskuner and Karababa , 2007) et de câpre (*Capparis spinosa*) ($21-32^{\circ}$) (Dursun and Dursun, 2005). Mais elles sont plus élevées que celles des graines de chanvre ($24,6-27,7^{\circ}$) (Sacilik et al., 2003), du quinoa (*chenopodium quinoa willd*) ($18-25^{\circ}$) (Vilche et al., 2003), de la noisette (*corylus avellana*) ($22,86-23,03^{\circ}$) (Ozdemir and Akinci, 2004), et d'azonbété (*Chrysophyllum albidum*) ($22-23^{\circ}$) (Oyelade et al., 2005).

L'équation décrivant l'évolution de l'angle statique au repos de la graine (θ_s) du temps (t) de séchage s'exprime par :

$$\theta_s = 1,197t^4 - 7,511t^3 + 14,239t^2 - 8,136t + 30,706 \text{ (degré)} \quad (2-67)$$

avec un coefficient de corrélation égal à $R^2=1$.

❖ Angle dynamique au repos

Le séchage entraîne la baisse de l'angle dynamique au repos de la graine (figure 2-27). L'analyse de ces résultats montre que lorsque la durée du séchage varie de 0 à 3 h, l'angle dynamique de la graine de néré décroît de 30,52° à 28,17°.

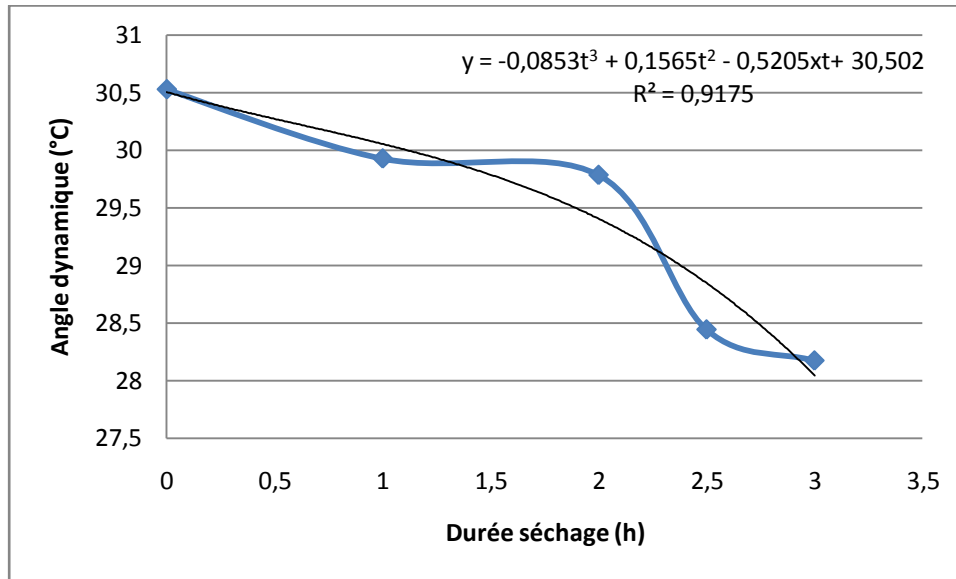


Figure 2-27. Effets de la durée de séchage sur l'angle dynamique au repos

L'équation décrivant l'évolution de l'angle dynamique au repos de la graine (θ_d) en fonction du temps (t) de séchage s'exprime par:

$$\theta_d = -0,085t^3 + 0,156t^2 - 0,520t + 30,502 \quad (\text{degré}) \quad (2-68)$$

Les valeurs de l'angle dynamique au repos de la graine de néré sont inférieures à celles de la graine du fenouil (*Foeniculum vulgare*). En effet, lorsque la teneur en eau de cette dernière baisse de 21,67 %, à 7,78 %, l'angle dynamique diminue aussi de 53,3° à 41° (Ahmadi et al., 2009). Elles sont par contre supérieures à celles de la graine de roselle (*Hibiscus sabdariffa L.*). Pour cette graine, lorsque la teneur en eau passe de 16,9 % à 8,8 % (bs), l'angle dynamique baisse de 24,85° à 20,83° (Bamgboye and Adejumo, 2011).

2.3.2.7. Effets du séchage sur la résistance minimale à la rupture des graines

La figure 2-28 présente la variation de la résistance minimale à la rupture des graines en fonction de la durée de leur séchage. Pendant la première heure de séchage, la charge supportée augmente de 228,84 à 264 N. L'abaissement de la teneur en eau, sous l'effet de la chaleur (température 105°C) et

du courant d'air, semble provoquer un durcissement de la graine, et par conséquent l'augmentation de la charge minimale à la rupture. Par contre, lorsque le séchage se prolonge de 1 à 3 h à la température de 105°C, la charge minimale à la rupture affiche une décroissance de 264 à 180 N. Cette phase pourrait être celle de la destruction physique de la graine par un excès de chaleur. En effet, après 1 heure de séchage, on note un brunissement du cotylédon s'apparentant à un début de calcination. A la teneur en eau de 10,25 % (bs), la force minimale de rupture de la graine (*Parkia fillicoides*) dans la direction de l'épaisseur est égale à 174,38±10,21N (Ogunjimi et al., 2002). La graine de néré est globalement plus dure que celle du Catharme des teinturiers (*Carthamus tinctorius*). En effet, lorsque la teneur en eau de cette graine est modifiée de 2 à 18 % (base sèche), la force minimale à la rupture varie de 25 à 40 N (Baümler et al., 2006), celle du fruit de la tomate entre 43 et 86 N (Li et al., 2011).

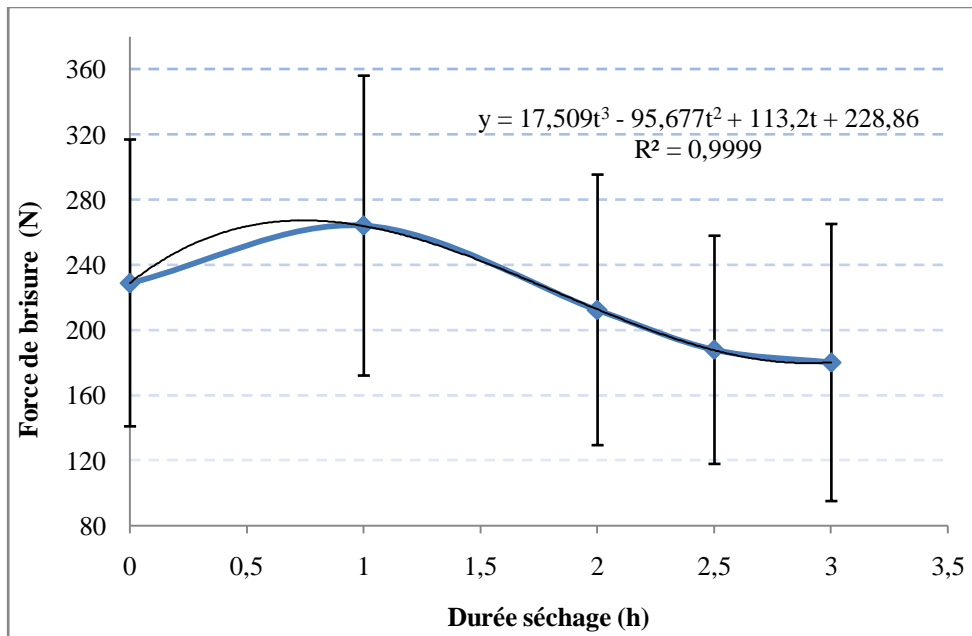


Figure 2-28. Effets du séchage sur la force de rupture des graines en fonction de la durée

Le modèle de l'évolution de la charge minimale à la rupture de la graine de néré pendant le séchage peut s'exprimer par l'équation :

$$F_c = 17,509t^3 - 95,677t^2 + 113,2t + 228,86 \text{ (N)} \quad (2-69)$$

avec le coefficient de corrélation égal à $R^2 \approx 0,99$.

2.3.3. Trempage des graines

2.3.3.1. Effets du trempage sur les teneurs en eau des graines et des cotylédons

La figure 2-29 présente les modifications intervenues aux niveaux des teneurs en eau des graines et des cotylédons de néré en fonction de la durée de trempage. Cette figure montre que, lorsque la graine est trempée de 0 à 72 h, sa teneur en eau croît de 16,14 % à 96,75 % (bs) tandis que celle du cotylédon s'élève de 14,94 % à 86 % (bs). Le trempage en eau, à température ambiante, provoque l'augmentation de la teneur de la graine et du cotylédon. Cependant, cette croissance n'est pas aussi accentuée comme dans le cas de la cuisson où les valeurs vont de 16,14 à 284,62 % et de 14,94 à 212,5 % respectivement pour la graine et le cotylédon. Le trempage de la graine en eau à température ambiante ne favorise pas la rupture de sa coque au même titre que dans le cas de la cuisson. On observe une certaine limitation dans le niveau d'absorption d'eau par la graine. De plus, le trempage ne peut être prolongé au-delà d'une durée donnée qui est celle marquant le commencement de la fermentation des graines.

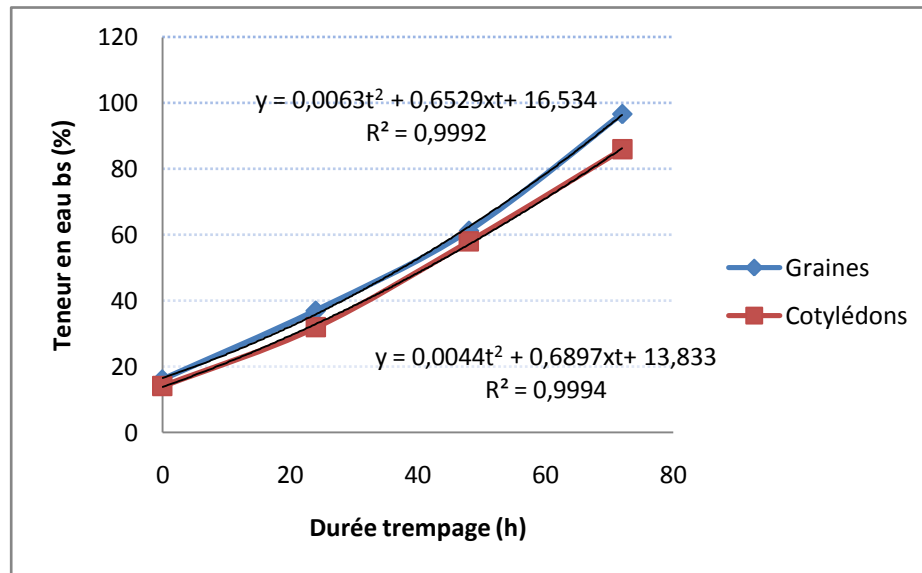


Figure 2-29. Effets du trempage sur la teneur en eau des graines et des cotylédons de néré

Les relations traduisant les changements opérés dans les teneurs en eau respectives de la graine (H_g) et du cotylédon (H_c) et la durée de trempage s'expriment par les équations suivantes :

$$H_g = -0,0063t^2 + 0,6529t + 16,534 (\%) \quad (2-70)$$

$$H_c = 0,0044t^2 + 0,06897t + 13,83(\%) \quad (2-71)$$

avec les coefficients de corrélation respectifs de $R^2 \approx 0,99$ et $R^2 \approx 0,999$ où H_g et H_c désignent les teneurs en eau (base sèche) de la graine et du cotylédon, et t la durée de trempage.

2.3.3.2. Effets du trempage sur les dimensions des graines et des cotylédons

❖ Effets du trempage sur les dimensions des graines

Le tableau 2-10 illustre les résultats des mesures des dimensions de la graine de néré, dans les directions de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur, en fonction de la durée du trempage.

Tableau 2-11. Dimensions axiales des graines de néré à différentes durées de trempage

Traitement	Dimensions moyennes (mm)					
	Longueur	Largeur	Epaisseur	Moyenne arithmétique	Moyenne géométrique	Sphéricité
Sans traitement	10,12 ± 0,6	8,30 ± 0,20	4,94 ± 0,22	7,78 ± 0,75	7,42 ± 0,68	0,737 ± 0,06
Trempage (24h)	10,14 ± 0,41	8,30 ± 0,11	4,97±0,33	7,80 ± 0,22	7,46 ± 0,25	0,736 ± 0,03
Trempage (48h)	10,16 ± 0,22	8,39 ± 0,20	5,014±0,21	7,85 ± 0,27	7,51 ± 0,26	0,740 ± 0,03
Trempage (72h)	10,37 ± 0,21	8,59 ± 0,21	5,14±0,36	8,03 ± 0,58	7,68 ± 0,59	0,741 ± 0,04

De ces résultats, il ressort que le trempage des graines à température ambiante provoque une légère augmentation des dimensions des graines qui subissent des accroissements : longueur de 10,12 mm à 10,37 mm (2,47 %), largeur 8,30 mm à 8,59 mm (3,5 %) et épaisseur de 4,94 mm à 5,14 mm (4,05 %). La modification enregistrée en trempage est beaucoup moins importante que celle obtenue durant la cuisson où les valeurs acquises (de 0 à 6 h) sont respectivement de 14,53 %, 12,53 % et 20,45 %.

Les dimensions moyennes arithmétiques et géométriques des graines connaissent des accroissements respectifs de 7,78 à 8,03 mm et 7,42 à 7,68 mm. Par contre, la sphéricité des graines change très peu pendant le trempage. En effet, lorsque la durée de trempage est passée de 0 à 72 h, la sphéricité a subi une augmentation de 0,54 %.

Le trempage provoque une augmentation des dimensions des graines de néré, induisant une variation de l'allongement de ces dernières. La figure 2-30 présente les allongements de la longueur, la largeur et l'épaisseur. Elle montre que l'épaisseur de la graine subit la plus grande variation suivie de la largeur et de la longueur. Cette tendance est observée également pour la cuisson de la graine à la différence que les valeurs notées sont nettement élevées dans le cas de cette dernière.

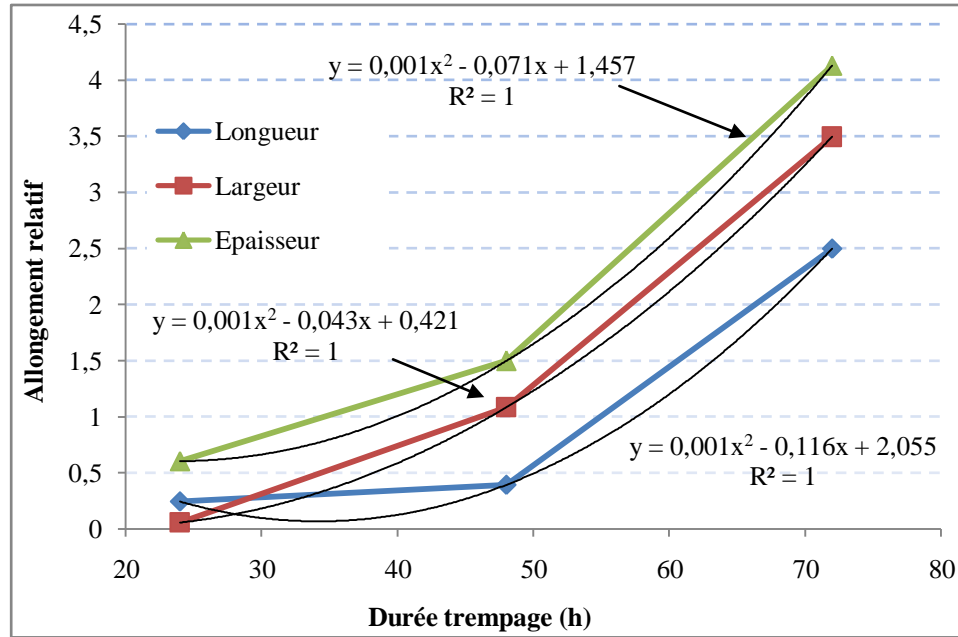


Figure 2-30. Allongements relatifs des dimensions des graines suivant la durée du trempage

Les relations qui lient l'allongement et la durée de cuisson s'expriment à travers les équations de régressions :

$$A_L = 0,0017t^2 - 0,116t + 2,055 \quad (2-72)$$

$$A_l = 0,0012t^2 - 0,0439t + 0,421 \quad (2-73)$$

$$A_e = 0,0015t^2 - 0,0717t + 1,455 \quad (2-74)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2 = 1$; $R^2 = 1$ et $R^2 = 1$ où A_L , A_l et A_e désignent les allongements relatifs respectifs de la longueur, largeur et épaisseur.

❖ Effets du trempage sur les dimensions des cotylédons

L'analyse des résultats du tableau 2-11 montre que les dimensions des cotylédons croissent pendant le trempage à l'eau, tout comme pour la graine. Lorsque la durée du trempage augmente de 0 à 72 h, la

longueur moyenne du cotylédon croît de 8,4 à 8,64 mm, la largeur de 6,96 à 7,24 mm et l'épaisseur de 3,89 à 4,07 mm.

Tableau 2-12. Dimensions axiales des cotylédons de néré à différentes durées de trempage

Traitement	Dimensions moyennes (mm)					
	Longueur	Largeur	Epaisseur	Moyenne arithmétique	Moyenne géométrique	Sphéricité
Sans traitement	8,4 ± 1,15	6,96 ± 1,09	3,89 ± 0,77	6,42±0,87	6,08± 0,87	0,73±0,05
Trempage (24 h)	8,41 ± 0,82	6,96 ± 1,05	3,91 ± 0,61	6,42 ± 0,42	6,07 ± 0,44	0,729 ± 0,09
Trempage (48 h)	8,43 ± 0,68	7,04 ± 0,82	3,95 ± 0,68	6,47 ± 0,55	6,14 ± 0,56	0,729 ± 0,05
Trempage (72 h)	8,64 ± 0,47	7,24 ± 0,72	4,07 ± 0,60	6,65 ± 0,32	6,31 ± 0,38	0,733 ± 0,07

Pour la cuisson, les valeurs moyennes de la longueur, largeur et épaisseur varient respectivement de 8,4 à 8,91 mm, 6,96 à 7,28 mm et de 3,89 à 4,9 mm. Si les moyennes arithmétique et géométrique des dimensions suivent les mêmes tendances d'accroissement que ces dernières, la sphéricité varie très peu pendant le trempage. Cette faible variation de la sphéricité est aussi notée au niveau des traitements de la cuisson et du séchage. On pourrait en déduire que les traitements de cuisson, de séchage et de trempage n'ont pas d'effet significatif sur la sphéricité des graines et des cotylédons de néré.

Le trempage provoque aussi une variation des dimensions des cotylédons de néré, entraînant une variation de l'allongement de ces derniers. La figure 2-31 illustre les allongements de la longueur, la largeur et l'épaisseur du cotylédon pendant le trempage. De cette figure, il ressort que l'épaisseur de la graine subisse l'allongement relatif le plus élevé. Elle est suivie de la largeur et de la longueur.

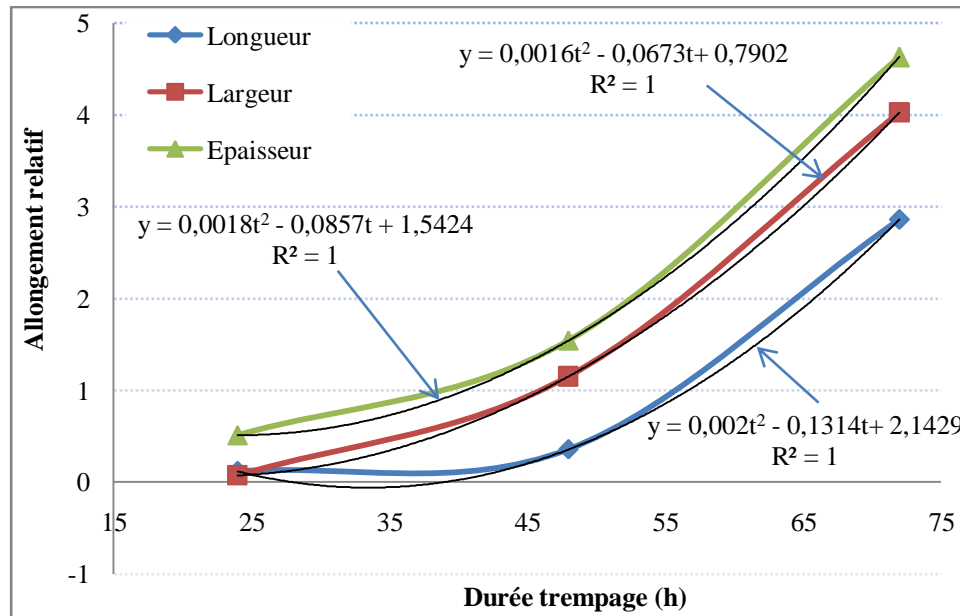


Figure 2-31. Effets du trempage sur l'allongement relatif des dimensions des cotylédons en fonction de la durée

Les modèles qui décrivent les allongements et la durée au cours du trempage s'expriment à travers les équations de régressions :

$$A_L = 0,002t^2 - 0,131t - 2,143 \quad (2-75)$$

$$A_l = 0,016 t^2 + 0,0673t + 0,0790 \quad (2-76)$$

$$A_e = 0,018t^2 - 0,0857t + 1,542 \quad (2-77)$$

avec des coefficients de corrélation tous égaux à $R^2 = 1$ et où A_L , A_l et A_e désignent les allongements respectifs de la longueur, largeur et épaisseur.

2.3.3.3. Paramètres de forme des graines et des cotylédons

❖ Elongation et aplatissement des cotylédons

Le tableau 2-12 illustre les modifications induites par le trempage sur les paramètres de forme des graines et des cotylédons en fonction du temps. L'analyse des données de ce tableau fait ressortir que pendant le trempage, le ratio de la longueur à la largeur varie peu de 1,23 à 1,22 pour la graine. Il est de 1,20 à 1,24 pour les cotylédons. Les tendances au niveau des valeurs de l'aplatissement exhibent une faible décroissance. C'est dire que pendant le trempage, l'épaisseur de la graine ou du cotylédon croît un peu plus vite que les largeurs correspondantes.

Tableau 2- 13. Effets du trempage sur les paramètres de forme des graines et des cotylédons de néré

Traitement	Graines		Cotylédons	
	Élongation	Aplatissement	Élongation	Aplatissement
Sans traitement	1,23±0,17	1,72±0,38	1,22±0,15	1,83±0,32
Trempage (24 h)	1,23±0,12	1,68±0,24	1,24±0,24	1,81±0,33
Trempage (48 h)	1,22±0,12	1,69±0,25	1,20±0,08	1,82±0,32
Trempage (72 h)	1,22±0,14	1,69±0,31	1,20±0,14	1,80±0,26

❖ Diamètre équivalent

La figure 2-32 indique la variation du diamètre équivalent en fonction de la durée de trempage.

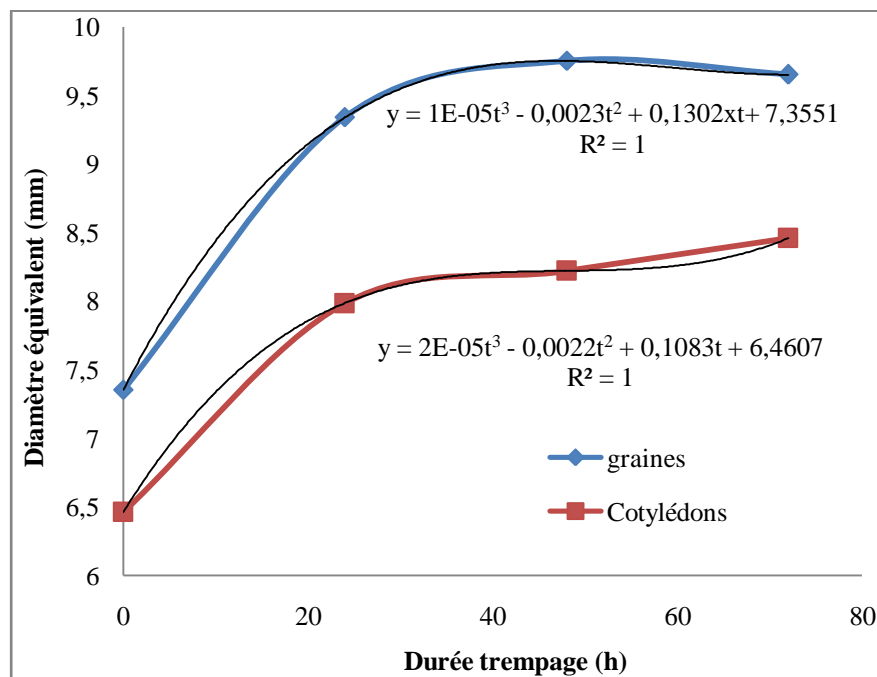


Figure 2-32. Effets du trempage sur les diamètres équivalents de la graine et des cotylédons en fonction du temps d'application

Ainsi, lorsque la durée de trempage passe de 0 à 72 h, les diamètres équivalents des graines et des cotylédons croissent respectivement de 7,36 à 9,65 mm et de 6,46 à 8,45 mm. Les tendances des

modifications subies par les diamètres équivalents en fonction du temps de trempage s'expriment par les équations:

$$D_g = -10^{-5}t^3 - 0,0023t^2 + 0,1302t + 7,355 \quad (2-78)$$

$$D_c = -210^{-5}t^3 - 0,0023t^2 + 0,1302t + 7,355 \quad (2-79)$$

Avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2 = 1$ et $R^2=1$ et où D_g et D_c désignent les diamètres équivalents de la graine et du cotylédon.

2.3.1.4. Aires de la surface des graines et des cotylédons

Tout comme pour le prétraitement par la cuisson, les aires de surfaces de la graine et du cotylédon croissent avec la durée du trempage.

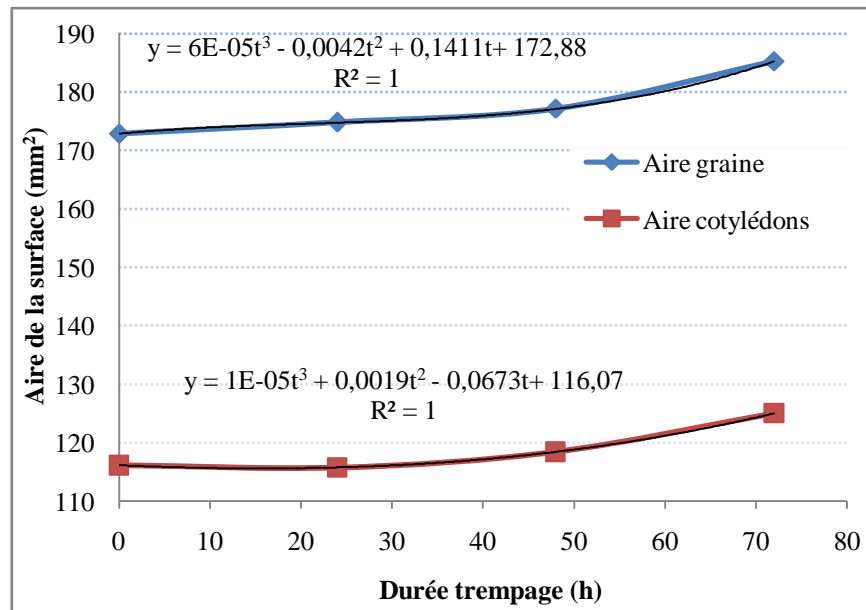


Figure 2-33. Évolution des aires de surface de la graine et des cotylédons en fonction de la durée du trempage

L'accroissement d'aire enregistré durant le trempage (Figure 2-33) est nettement faible (7 % pour un trempage de 72 h) en comparaison avec le cas de la cuisson (34 % en 6 h). L'aire de la surface des graines augmente de 172,87 à 182,2 mm² pendant que celle des cotylédons suit la même tendance passant de 116,07 à 125 mm². Cette évolution des aires des surfaces de la graine et du cotylédon s'explique par le changement dans la teneur en eau qui s'élève respectivement de 16,14 à 96,75 % et

de 14,94 à 86 % (bs). Les équations des courbes de tendance liant l'aire de la surface et le temps de cuisson s'expriment par :

$$A_g = 6 \cdot 10^{-5} t^3 - 0,0042t^2 + 0,1411t + 172,88 \quad (2-80)$$

$$A_c = 10^{-5}t^3 + 0,019t^2 - 0,0673t + 116,07 \quad (2-81)$$

avec des coefficients de détermination respectifs de $R^2=1$ et $R^2=1$ où A_g et A_c désignent les aires des surfaces de la graine et des cotylédons.

2.3.3.4. Effets du trempage sur les paramètres massiques des graines de néré

❖ Masses de 1000 graines et de 1000 cotylédons

Les résultats des mesures de la masse de 1000-graines de néré en fonction de la durée du trempage sont présentés sur la figure 2-34. Ils indiquent que, lorsque le temps de trempage augmente de 0 à 72 h, la masse de 1000-graines de néré s'accroît notablement de 231,66 à 361,66 g et celle des cotylédons augmente quasiment de la moitié de sa valeur initiale : de 166 à 320 g. Cette variation est due au fait que pendant le trempage, les cellules de la graine et du cotylédon, sous l'action de l'humidité, se gorgent d'eau, provoquant l'accroissement de sa masse. Le trempage prolongé de la graine provoque, au troisième jour sur certaines graines, un début de germination qui influe sur l'augmentation de la valeur de la masse des 1000-graines. Cela constitue un facteur limitant en durée.

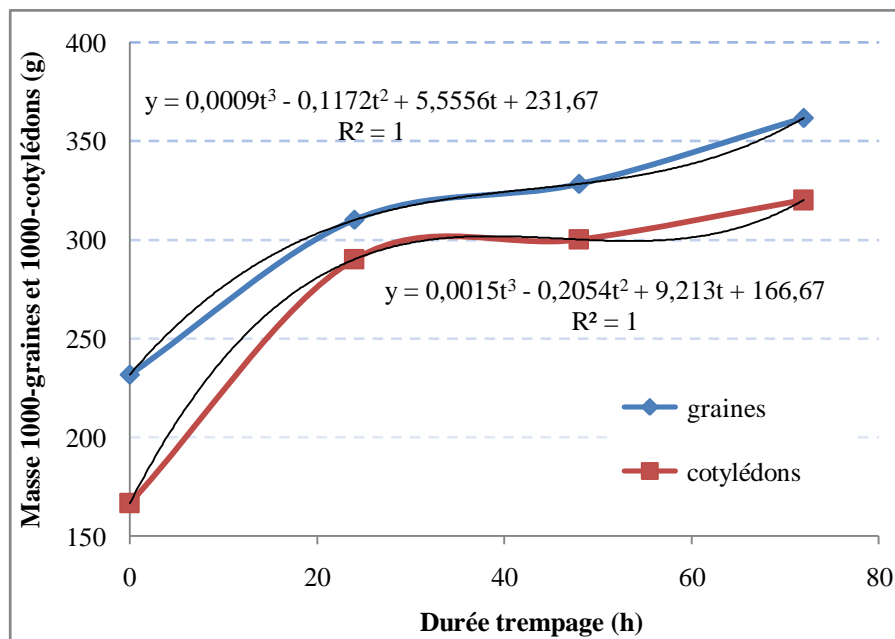


Figure 2-34. Effets du trempage sur la masse des graines et des cotylédons en fonction du temps d'application

❖ Pourcentage masse cotylédons sur masse graine

L'imbibition d'eau de trempage par la graine fait alors modifier le ratio $R_{C/G}$ des masses des deux principaux constituants de la graine (coque et cotylédon):

$$R_{C/G} = 100 \times \text{Masse.Cotylédons} / (\text{Masse.Cotylédons} + \text{Masse.Coque})$$

La figure 2-35 présente l'évolution du rapport $R_{C/G}$ en fonction du temps de trempage. Elle nous révèle que, pendant les premières 24 du trempage, ce rapport enregistre une augmentation qui le porte de 72 à 93,54 %. Ensuite, à la fin de cette heure, le rapport $R_{C/G}$ commence à décroître jusqu'à atteindre la valeur 88,5 % après 72 h de trempage.

L'accroissement enregistré, pour la masse de la graine pendant les premières 24 heures de trempage, se fait essentiellement à travers celui de la masse des cotylédons. Ces derniers, sous l'action prolongée de l'humidité, absorbent de l'eau. Pendant le reste du temps de trempage, allant de 24 h à 72 h, la masse de la coque subit une augmentation légèrement plus rapide que celle des cotylédons.

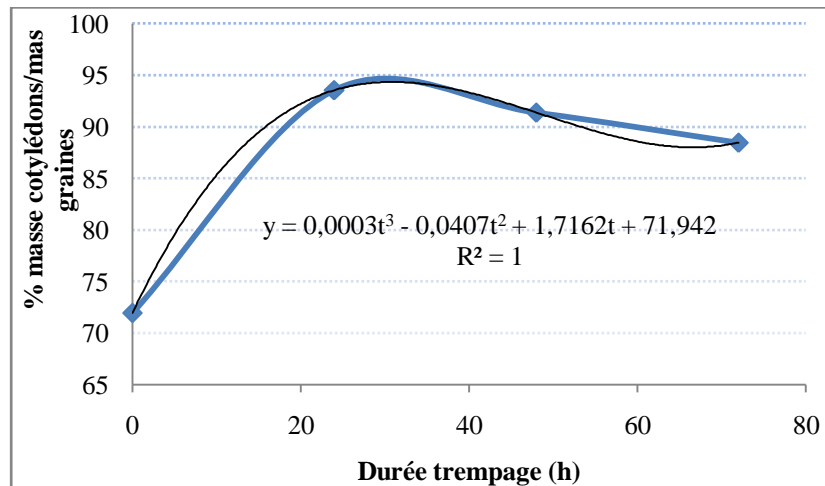


Figure 2-35. Effets du trempage sur le rapport entre la masse des cotylédons et celle de la graine en fonction du temps

La courbe ainsi obtenue fournit des indications utiles sur les valeurs maximales que pourraient atteindre le taux et le rendement de décorticage en fonction de la durée du trempage. Ces valeurs sont importantes pour l'évaluation des performances techniques de la décortiqueuse, à travers le calcul du rendement au décorticage.

Les modèles mathématiques rendant mieux compte des effets du trempage, respectivement sur la masse des 1000-graines (M_{1000-g}), la masse de 1000 cotylédons ($M_{1000-cot}$) et le ratio ($R_{C/G}$) de la masse

de cotylédons (M_c) à celle de la graine (M_g), en fonction de la durée du traitement, sont affichés sur les figures 2-34 et 2-35 et s'expriment par les équations :

$$M_{1000-g} = 0,0009t^3 - 0,1172t^2 + 5,5556t + 231,67 \quad (2-82)$$

$$M_{1000-cot} = 0,0015t^3 - 0,205t^2 + 9,213t + 166,67 \quad (2-83)$$

$$R_{C/G} = M_c/M_g = 0,0003t^3 - 0,0407t^2 + 1,716t + 71,942 \quad (2-84)$$

Les coefficients de corrélation de ces modèles respectifs sont tous trois égaux à $R^2=1$.

❖ Aire massique des graines et des cotylédons

Les résultats des tests révèlent que le trempage des graines entraîne la baisse des valeurs des aires massiques des graines et des cotylédons par rapport au produit brut. Cette tendance a été également observée pour les traitements de cuisson et de séchage. Lorsque la durée du trempage varie de 0 à 72h, l'aire massique de la graine diminue de 0,735 à 0,66 m²/kg et celui des cotylédons de 0,788 à 0,682 m²/kg.

Ces modifications peuvent s'expliquer par le fait que, pendant le trempage, la masse de la graine croît plus vite que ses dimensions et sa surface.

Tableau 2-14. Valeurs des aires massiques des graines et des cotylédons du néré durant le trempage en fonction du temps

Durée du trempage (h)	Aire massique (m ² /kg)	
	Graines	Cotylédons
0	0,735 ±0,009 _a	0,788 ±0,008 _a
24	0,672 ±0,011 _b	0,685 ±0,007 _c
48	0,660 ±0,005 _b	0,682 ±0,005 _c
72	0,660 ±0,023 _b	0,680 ±0,004 _c

NB: Les chiffres de la même colonne portant en indice la même lettre ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5%

2.3.3.5. Effets de trempage sur les paramètres volumiques des graines et cotylédons de néré

❖ Volumes réels des graines et des cotylédons

La transformation intervenue sur le volume des graines de néré durant le trempage est présentée sur la figure 2-36.

Ces résultats montrent que, lorsque la durée du trempage varie de 0 à 72 h, le volume des graines croît de 208 à 359 cm³. La modification subie est inférieure à celle obtenue durant la cuisson où la valeur atteinte est de 482 cm³. Le volume du cotylédon s'élève durant le trempage : de 141,48 à 310 cm³. Cette augmentation est consécutive à celle enregistrée pour les dimensions de la graine et des cotylédons et décrite à travers les tableaux 2-11 et 2-12. Le trempage entraîne la dilatation relative de la coque et du cotylédon. Ce phénomène favorise une certaine fragilisation de la coque et peut ainsi permettre d'obtenir un bon décorticage.

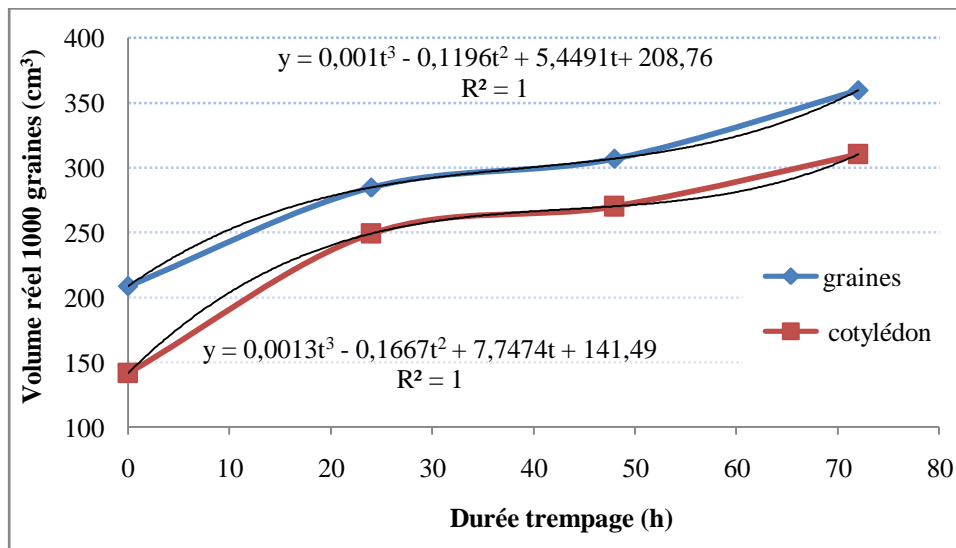


Figure 2-36. Résultats des effets du trempage sur le volume réel des graines et des cotylédons en fonction du temps

Les modèles décrivant respectivement les évolutions du volume des 1000-graines (V_{1000-g}) et de 1000-cotylédons ($V_{1000-cot}$) en fonction du temps (t) de cuisson s'expriment par les équations:

$$V_{1000-g} = 0,001t^3 - 0,1196t^2 + 5,4491t + 208,76 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2-85)$$

$$V_{1000-c} = 0,0013t^3 - 0,1667t^2 + 7,747t + 141,49 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2-86)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2=1$ et $R^2=1$.

❖ **Masses volumiques réelles des graines et des cotylédons**

La figure 2-37 présente la variation de la masse volumique réelle des graines et des cotylédons durant le trempage. L'analyse de cette figure montre que lorsque la durée du trempage varie de 0 à 72 h, la masse volumique réelle des graines décroît de 1109 kg/m³ à 1006,62 kg/m³. De même, la masse volumique des cotylédons décroît de 1178 kg/m³ à 1032 kg/m³. En tout point, la masse volumique des cotylédons est supérieure à celle des graines. Cette décroissance des masses volumiques pourrait s'expliquer par le fait que durant le trempage, le volume de chaque composant croît plus vite que sa masse.

Les modèles décrivant respectivement les évolutions des masses volumiques réelles des graines et cotylédons en fonction du temps (*t*) de trempage sont illustrées sur la figure 2-37 et s'expriment par les équations :

$$Mv_g = -0,0006t^3 + 0,00418t^2 - 1,542t + 1109,8 \quad (2-87)$$

$$Mv_c = 0,0002t^3 - 0,0479t^2 + 0,492t + 1177,9 \quad (2-88)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de R² = 1 et R² = 1

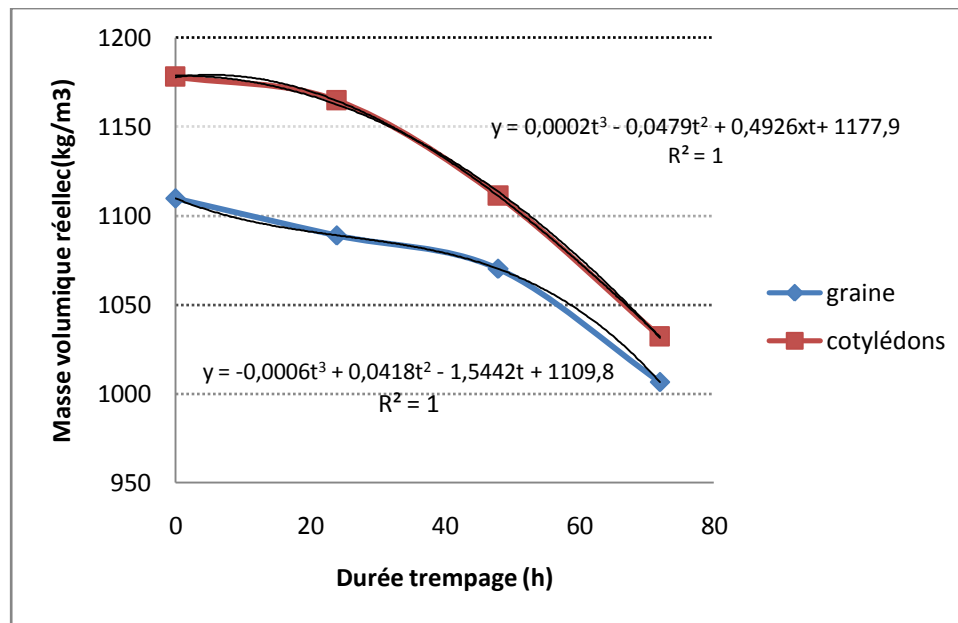


Figure 2-37. Évolution de la masse volumique réelle des graines et des cotylédons durant le trempage

❖ **Masses volumiques apparentes des graines et des cotylédons**

L'évolution des masses volumiques apparentes des graines et des cotylédons durant le trempage est présentée sur la figure 2-38. On y note que pendant les premières 48 h, les valeurs de ce paramètre évoluent de façon quasi constante pour la graine. Pendant cette phase, la

masse et le volume apparent croissent approximativement à la même vitesse. La courbe subit ensuite une décroissance entre 48 h et 72 h de trempage. Cette phase coïncide avec celle du début de la germination des graines. A cette phase, le volume spécifique croît plus vite par rapport à la masse de la graine. Pendant toute la durée du trempage, la masse volumique apparente de la graine décroît de 714,29 kg/m³ à 663,85, soit un taux de réduction de 7 %. Dans le même temps, la masse volumique apparente des cotylédons décroît de 692,29 à 681,81 kg/m³, soit une diminution de 1,51 %.

Les modèles décrivant respectivement les évolutions des masses volumiques apparentes des graines (Ma_g) et cotylédons (Ma_c) en fonction du temps (t) de cuisson sont illustrées sur la figure 2-38 et s'expriment par les équations :

$$Ma_g = -0,0006t^3 + 0,0419t^2 - 0,666t + 714,29 \quad (2-89)$$

$$Ma_c = 0,0001t^3 - 0,009t^2 - 0,0165t + 692,32 \quad (2-90)$$

avec des coefficients de corrélation respectifs égaux tous deux à $R^2 = 1$.

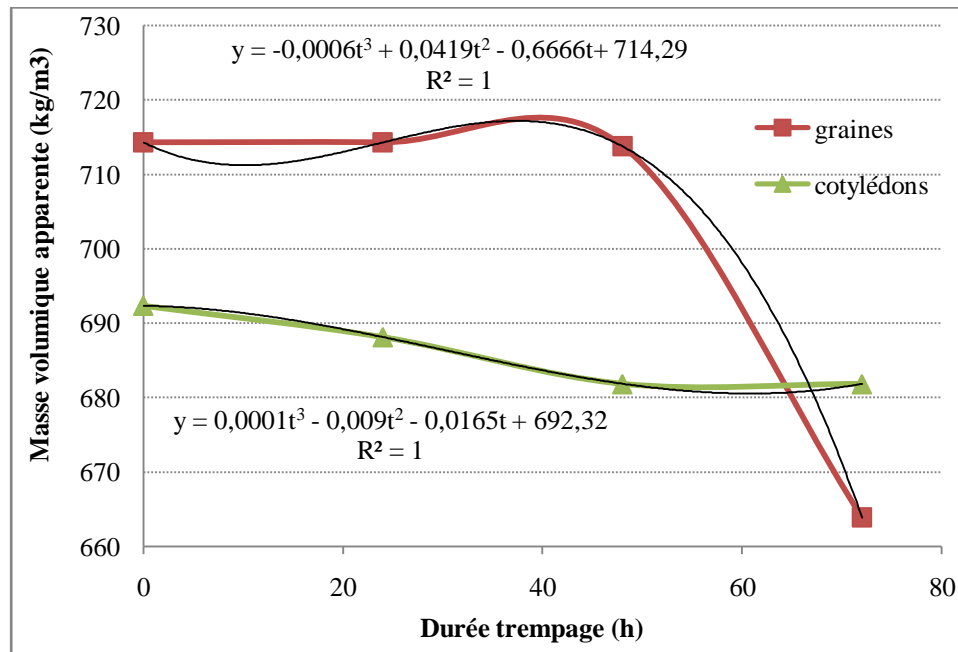


Figure 2-38. Effets du trempage sur les masses volumiques apparentes des graines et des cotylédons en fonction du temps

❖ **Porosité des graines et des cotylédons**

La figure 2-39 montre une faible variation de la porosité de graine durant le trempage pendant 72 h. On note en effet une baisse de 1,23 %. Pendant le trempage, le volume de l'espace vide et le volume réel de la graine varient pratiquement de la même manière. Par contre, pour les cotylédons, la courbe subit une décroissance de 16,58 % pendant les 72 h de trempage. Ainsi, au niveau des cotylédons, le volume réel croît plus vite que le volume de l'espace vide inter granulaire.

Les modèles décrivant respectivement les évolutions des porosités de la graine (P_g) et du cotylédon (P_c) en fonction du temps (t) de cuisson s'expriment par les équations :

$$P_g = -0,0003t^2 - 0,0039t + 35,654 \tag{2-91}$$

$$P_c = 0,0001t^3 - 0,0122t^2 + 0,2488t + 41,231 \tag{2-92}$$

avec des coefficients de corrélation respectifs de $R^2=1$ et $R^2 \approx 0,994$.

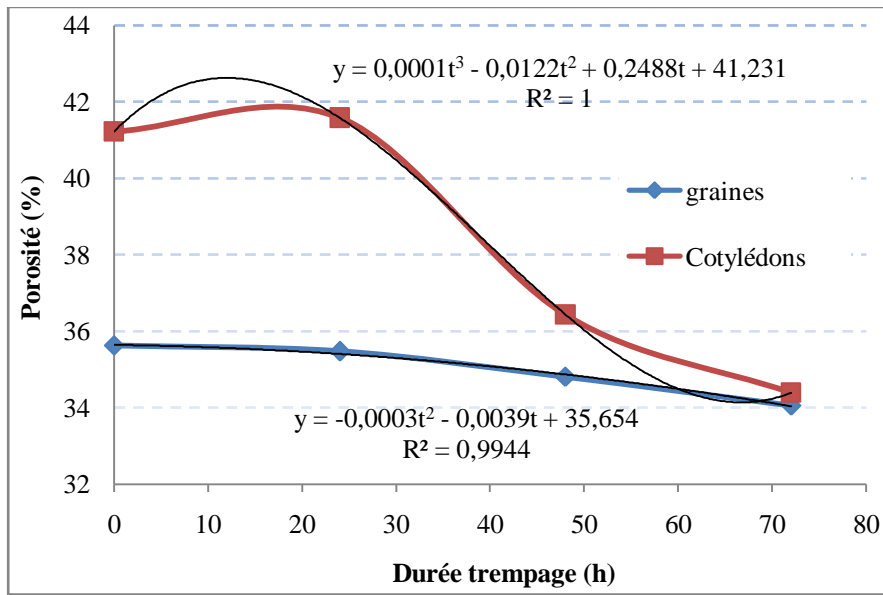


Figure 2-39. Effets du trempage sur la porosité des graines et des cotylédons en fonction du temps

2.3.3.6. Variation de l'angle maximal au repos et du coefficient de frottement

❖ **Coefficient de frottement statique au repos**

Les résultats du tableau 2-15 montrent que, des trois matériaux testés à cet effet, la grille en inox présente le coefficient de frottement le plus élevé pour une même durée de trempage. La surface rugueuse de la grille favorise une forte adhérence entre la graine et la surface de la grille. La tôle inox lisse et la tôle noire exercent approximativement les mêmes frottements sur les graines trempées. Le

trempe entraîne l'augmentation du coefficient de frottement. Il provoque l'humidification des graines, ce qui est un facteur d'adhérence entre la graine et le matériau.

Tableau 2-15. Effets du trempage sur le coefficient de frottement statique au repos

Durée trempage (h)	Matériaux		
	Tôle noire	Tôle inox	Grille inox
0	0,55±0,09	0,47±0,07	1,96±0,09
24	0,62±0,22	0,79±0,15	2,20±0,29
48	1,01±0,21	0,87±0,23	2,34±0,14
72	1,01±0,21	0,93±0,19	2,47±0,14

❖ **Angle statique au repos**

Les résultats illustrés sur la figure 2-40 montrent que le trempage en eau de la graine de néré provoque une légère augmentation de son angle statique au repos.

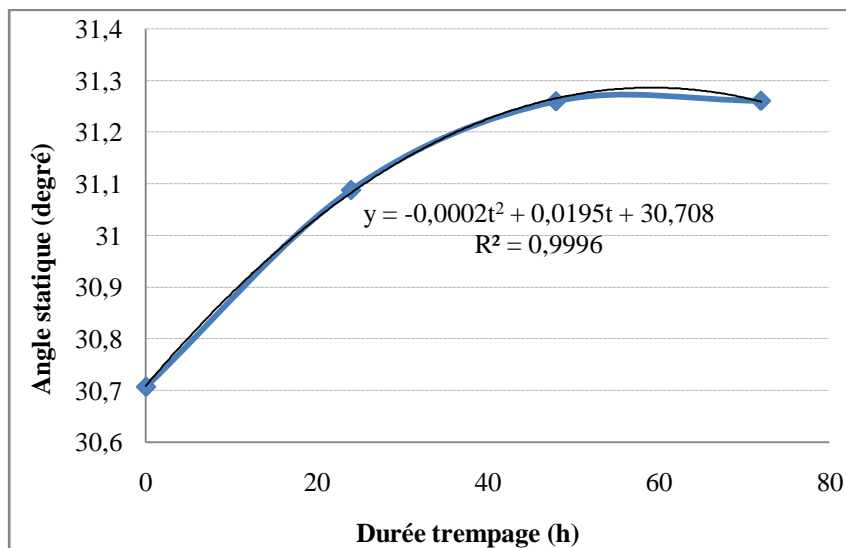


Figure 2-40. Variation de l'angle statique au repos en fonction du temps de trempage

Lorsque la durée du trempage varie de 0 à 72 h, l'angle statique au repos de la graine varie de 30,70° à 31,26°, soit une augmentation de 1,8 %. Le modèle décrivant l'évolution de l'angle statique au repos de la graine (θ_s) en fonction du temps (t) de trempage s'expriment par l'équation :

$$\theta_s = -0,0002t^2 + 0,0195t + 30,708 \quad (2-93)$$

avec un coefficient de corrélation de $R^2 \approx 0,999$.

❖ Angle dynamique

Tout comme l'angle statique au repos, l'angle dynamique de la graine de néré augmente en fonction de la durée du trempage (Figure 2-41). Cet angle croît de 30,52° à 52,74° lorsque la durée de trempage varie de 0 à 72 h. Il connaît son pic à 24 h de trempage. Cette modification peut être due non seulement à celle de la teneur en eau, de la masse de la graine, mais aussi à l'état de la surface de la graine.

L'évolution de l'angle dynamique au repos θ_d en fonction de durée du trempage s'exprime par l'équation :

$$\theta_d = 0,0004t^3 - 0,0523t^2 + 1,9534t + 30,527 \quad (2-94)$$

avec un coefficient de corrélation de $R^2 = 1$.

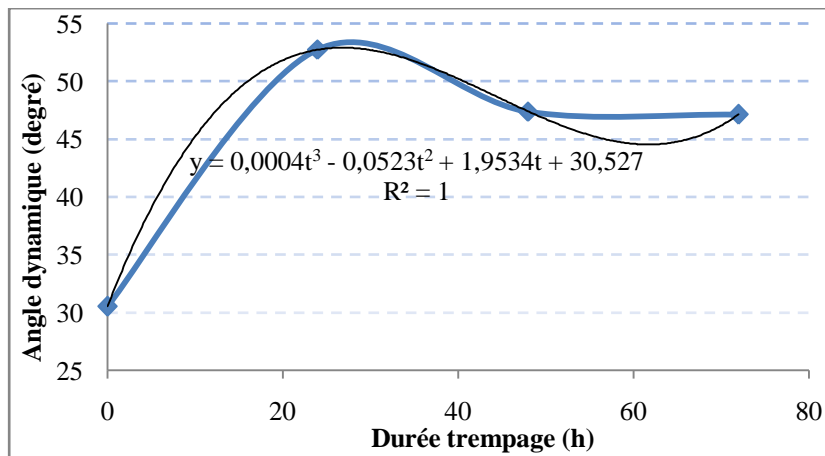


Figure 2-41. Effets du trempage sur l'angle dynamique au repos de la graine

2.3.3.7. Effets du trempage sur la résistance minimale à la rupture des graines

La figure 2-42 présente la variation de la résistance minimale à la rupture de la graine en fonction de la durée du trempage.

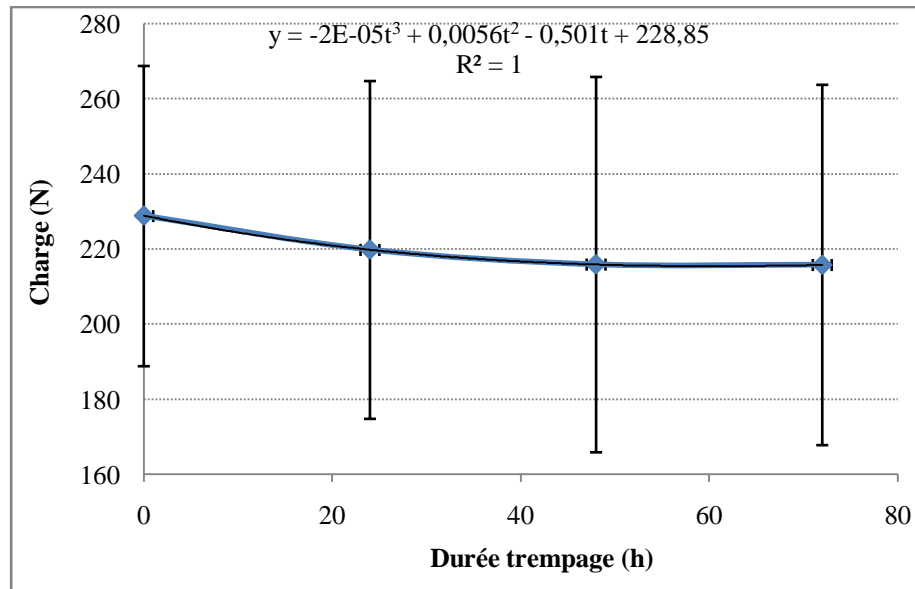


Figure 2-42. Évolution de la force minimale à la rupture en fonction de la durée du trempage

Pendant la première heure de trempage, cette charge augmente de 228,84 à 264 N. On note que le trempage à l'eau, à température ambiante, entraîne une faible variation de la force minimale à la rupture. Lorsque la durée de trempage varie de 0 à 72 h, la charge décroît de 228,84 à 216,82, soit un taux de 5,25 %. Cette faible variation pourrait traduire le fait que le trempage à température ambiante ait un faible effet sur la fragilisation de la graine. On pourrait à priori en déduire que ce traitement n'est pas à recommander en prélude au décorticage de la graine. La tendance de la variation de la charge minimale à la rupture s'exprime par l'équation :

$$F_c = -210^{-5}t^3 + 0,0056t^2 - 0,501t + 228,85 \quad (2-95)$$

avec le coefficient de corrélation de $R^2=1$.

2.4. Conclusion

Les effets des prétraitements de séchage, trempage et de la cuisson sur les caractéristiques physiques des graines et cotylédons de néré *Parkia biglobosa* sont étudiés à travers ce chapitre. Les résultats montrent que, lorsque la graine est soumise à la cuisson de 0 à 6 h, ou au trempage pendant 24 à 72 h, les paramètres évalués, tels que la teneur en eau, les dimensions moyennes (longueur, largeur, épaisseur, divers diamètres) et leurs allongements relatifs, les masses et volumes de 1000-graines, les masses volumiques réelles et spécifiques, la porosité et l'aire massique, subissent différentes

variations. Par contre, le traitement de séchage impose à la graine et aux cotylédons, une diminution des valeurs de ces différents paramètres.

La cuisson et le trempage des graines de néré provoquent l'accroissement du coefficient de frottement statique des graines et cotylédons sur les surfaces de tôle en acier noire, de tôle en acier inoxydable et sur la grille inoxydable, tandis que le séchage provoque la décroissance de ce coefficient de friction. Les valeurs de l'angle statique au repos, de l'angle dynamique et de la résistance minimale à la brisure décroissent lorsque la graine et le cotylédon sont soumis aux traitements de cuisson et de trempage. Par contre, avec l'opération de séchage, les valeurs de ces paramètres subissent plutôt des accroissements à mesure que la durée du traitement augmente.

Les résultats obtenus dans cette étude ont donné d'intéressantes indications sur le choix du meilleur prétraitement à assurer aux graines de néré en vue du succès de l'opération de décortilage. Toutefois, il nous faut concilier l'efficacité du prétraitement des graines de néré à l'efficience de l'équipement de décortilage. Ce sont là les objets des travaux développés dans la suite et dont les résultats sont discutés et résumés dans le chapitre à venir./.

CHAPITRE 3

EFFETS DES DIFFERENTS PRETRAITEMENTS SUR L'EFFICACITE DU DECORTICAGE MECANIQUE

3.1. Introduction

Les légumineuses constituent en général une importante source de protéines et peuvent de ce fait permettre d'augmenter l'apport protidique du régime alimentaire de la population et lutter contre la malnutrition protéino-énergétique en Afrique (Alihonou, 2006, Lemonier and Ingenbleck, 1989). Dans le monde asiatique, le *natto* japonais, le *thua-nao* thaïlandais, le *kinema* indonésien ou le *sufu* chinois sont des condiments obtenus par la fermentation alcaline des graines de soja (*Glycine max*) similaires à *l'afitin*, *l'iru* et *le sonru* (Beaumont, 2002).

Pour tenter de moderniser l'activité de production du afitin et standardiser la technologie, des travaux de recherche ont été initiés dans plusieurs pays de la sous région (Audu et al., 2004 ; Marouzé, 2004 ; Guttierrez et al., 2000) et concernent entre autre à la mise au point de décortiqueuses à graines de néré. Mais ces différentes décortiqueuses ont un l'indice d'efficacité qui ne dépasse pas 71 %. Ceci montre que le décortiquage n'est pas encore parfait. Le taux de décortiquage reste relativement faible par rapport à la méthode artisanale et le taux de brisure élevé. Un triage suivi d'un second décortiquage est nécessaire, ce qui limite l'adoption de la technologie par les transformatrices Au Bénin, pour contribuer à la levée des contraintes liées à la pénibilité du décortiquage, les travaux de recherches ont permis la mise au point d'une décortiqueuse à graines sèches de néré (Hounhouigan et al., 2004 ; Ahouansou, 2005). Les tests réalisés sur cette décortiqueuse ont montré que l'équipement a un taux de décortiquage intéressant au regard des travaux effectués au Burkina Faso avec un matériel semblable. En effet, avec des graines de faible teneur en eau (environ 6 %) décortiquées mécaniquement à un débit de 66,67 kg à l'heure, il est possible d'avoir un taux d'efficacité au décortiquage de l'ordre de 77 % pour un taux de brisure de l'ordre de 10-11 %. Malgré ces résultats intéressants, les performances de la décortiqueuse restent à optimiser car le taux de décortiquage est encore faible selon les transformatrices.

La faible performance de ces décortiqueuses est due aussi à l'hétérogénéité des graines (mélange possible de plusieurs variétés) ; ce qui rend difficile le réglage adéquat du dispositif de la décortiqueuse. Aussi, le néré est considéré comme une graine difficile à décortiquer du fait de la présence du mucilage qui forme un pont adhérent entre la coque et le cotylédon (Opoku et al., 2003). Pour décortiquer le néré et les légumineuses de la même famille, la coque doit être détachée des cotylédons avant qu'elle ne puisse être séparée de ceux-ci (Ogunjimi et al., 2002). Les coques des graines de légumineuses peuvent être détachées des cotylédons avant décortiquage en leur faisant subir certains prétraitements : la chaleur humide ou sèche et les traitements chimiques (Phirke and Bhole,

2000). Après un traitement à la chaleur sèche, la coque des graines devient cassante et peut être facilement enlevée par le contact d'une surface abrasive (Shyeth et al., 1980).

La conception d'un système de décortilage intégrant la combinaison d'un type de traitement approprié de la graine et des paramètres optimisés de l'équipement pourrait permettre d'avoir un indice d'efficacité proche de celui de la méthode traditionnelle ce qui augmentera les chances d'adoption de la nouvelle technologie.

La présente étude s'est fixée comme objectif général d'évaluer l'effet des différents types de traitement sur l'efficacité du décortilage mécanisé. De façon spécifique, il s'agira de :

- évaluer l'effet de la cuisson, du trempage, du séchage, du séchage-trempage et du séchage-cuisson des graines de néré sur l'efficacité du décortilage mécanique ;
- de dégager les traitements des graines qui favorisent une meilleure performance des équipements ;
- dégager les équipements les plus performants pour le décortilage des graines de néré

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Matériel

3.2.1.1. Sites de l'étude

Les expérimentations sont réalisées au Laboratoire du Programme Technologie Agricole Alimentaire (PTAA) de l'Institut National de la Recherche Agricole du Bénin (INRAB) et le Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA) de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC).

3.2.1.2. Graines de néré : provenance et conditionnement

Les graines de néré utilisées sont celles de la variété *Parkia biglobosa*. Elles ont été acquises au marché de Dantokpa à Cotonou au Bénin. Ces graines, de la qualité tout venant, proviennent de la région de N'Dali au Nord du Bénin. Environ 100 kg de graines ont été nettoyées, triées et stockées dans un sac en polyéthylène conservé au laboratoire à la température de $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

3.2.1.3. Equipements d'expérimentation

Le séchage des graines est réalisé dans une étuve ventilée HOH-EXPRESS HE-50 PFEIFFER.

Trois (03) équipements sont testés dans le cadre de cette étude. Il s'agit de la décortiqueuse à grilles mise au point par l'UAC et l'INRAB ((Hounhouigan et al., 2004 ; Ahouansou, 2005), d'une décortiqueuse à meules métalliques (Montcho and Ahouansou, 2001) et d'une décortiqueuse à

palettes à axe vertical (Ahouansou et al., 2010). Le choix de ces équipements est basé sur le fait que, dans leurs principes de fonctionnement, ils pourraient présenter une bonne performance pour le décortiquage des graines de néré.

❖ **Décortiqueuse verticale à palettes**

La décortiqueuse à palettes est constituée d'un réducteur, d'un axe central vertical portant des palettes tournant dans le plan horizontal (Photo 3-1). L'axe central est monté à l'intérieur d'une cage portant la trémie. Le décortiquage est fait à l'intérieur de cette cage. En effet, un moteur thermique de puissance 5 cv entraîne l'axe central par l'intermédiaire du réducteur. Dans sa rotation, l'axe central entraîne les palettes. Il se crée un choc entre ces dernières et les graines présentes à l'intérieur de la cage. Le choc provoque le détachement de la coque enveloppant le cotylédon, les séparant ainsi l'une de l'autre.



Photo 3-1: Décortiqueuse verticale à palettes

❖ **Décortiqueuse à grilles**

La décortiqueuse illustrée à la figure 3-2 est celle conçue et réalisée grâce à la collaboration entre l'Université d'Abomey-Calavi et l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin.

Elle est constituée d'un bâti mécano soudé, d'un moteur thermique de 5 cv, d'un mécanisme de transmission, d'une cage de décortiquage et d'une trémie. Le système de décortiquage, organe principal de la machine, comporte deux (02) plateaux : l'un fixe et l'autre mobile dans le plan horizontal. C'est en réalité la partie active de la machine. Sur ces plateaux, sont fixées des grilles faites en tôle

inoxydable perforée, à haute résistance. En marche, le moteur entraîne le plateau mobile par le biais de la transmission. Les graines versées dans la trémie sont acheminées dans l'espace annulaire réglable aménagé entre les deux (02) grilles où elles sont décortiquées par cisaillement.

Les résultats obtenus sur les propriétés physiques des graines et des cotylédons dans le chapitre 2 ont permis d'introduire dans l'équipement, un système de réglage du jeu en fonction du type de traitement.

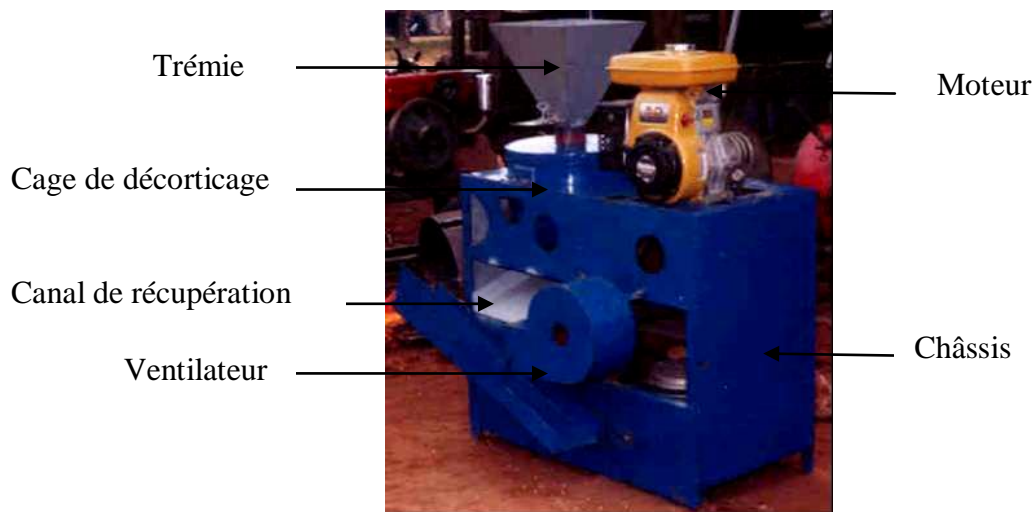


Photo 3-2 : Décortiqueuse à grilles en acier inoxydable

Elle est constituée d'un bâti mécano soudé, d'un moteur thermique de 5 cv, d'un mécanisme de transmission, d'une cage de décortilage et d'une trémie. Le système de décortilage, organe principal de la machine, comporte deux (02) plateaux : l'un fixe et l'autre mobile dans le plan horizontal. C'est en réalité la partie active de la machine. Sur ces plateaux, sont fixées des grilles faites en tôle inoxydable perforée, à haute résistance. En marche, le moteur entraîne le plateau mobile par le biais de la transmission. Les graines versées dans la trémie sont acheminées dans l'espace annulaire réglable aménagé entre les deux (02) grilles où elles sont décortiquées par cisaillement.

Les résultats obtenus sur les propriétés physiques des graines et des cotylédons dans le chapitre 2 ont permis d'introduire dans l'équipement, un système de réglage du jeu en fonction du type de traitement.

❖ **Décortiqueuse à meules**

La décortiqueuse illustrée à la figure 3-3 est celle à meules composée d'une trémie, d'un châssis et de deux (02) meules constituant la partie active : l'une fixe et la seconde mobile. Les deux meules

métalliques en fonte sont montées dans le plan vertical à l'intérieur de la cage de mouture. La meule mobile est montée sur un axe portant le convoyeur entraîné par un moteur thermique de puissance 5 cv. Un système de vis et écrou permet de régler le jeu entre les deux (02) meules. Le moteur, en marche, entraîne l'axe principal du moulin qui, par le biais du convoyeur, draine les graines de néré présente dans la trémie vers l'espace compris entre les deux (02) meules. La graine présente dans cet espace subit un cisaillement qui favorise son décortiquage. La qualité du décortiquage dépend du jeu entre les deux meules. Ce jeu est réglé par le système de vis et écrou mû par le poignet.



Photo 3-3 : Décortiqueuse à meules

3.2.2. Méthodes

3.2.2.1. Cuisson des graines

Les graines, prélevées du stock conditionné et versées dans de l'eau désionisée à la température de 30 °C, à raison de 2,5 L d'eau par kilogramme, sont chauffées au bois dans des marmites en aluminium. L'eau est portée à l'ébullition après environ 15 mn et maintenue durant le temps de la cuisson.

Sept (07) lots d'échantillons de 3 kg de graines, notés (C₀, C₁, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆), sont constitués à partir du stock conditionné. Le lot C₀ représente le témoin et n'est pas soumis à la cuisson. Les lots C₁, C₂, C₃, C₄, C₅ et C₆ subissent la cuisson à l'ébullition, respectivement pendant 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h et 6 h. La durée de la cuisson est comptée à partir du début de l'ébullition.

3.2.2.2. Trempage des graines

Le trempage des graines est réalisé dans l'eau désionisée, à raison de 2L d'eau par kilogramme de graines, à la température ambiante (environ 30±1°C). Quatre (04) lots d'échantillons de 3 kg de graines (T₀, T₁, T₂, T₃), sont constitués à partir du stock nettoyé et conditionné. L'échantillon T₀ reste

le témoin et n'est pas soumis au trempage. Les lots T_1 , T_2 , T_3 , sont trempés à l'eau respectivement pendant 24 h, 48 h et 72 h.

3.2.2.3. Séchage des graines

Le séchage des graines est effectué à l'étuve à la température de 105°C. Quatre (04) lots d'échantillons de 3 kg de graines (S_0 , S_1 , S_2 , S_3), sont constitués à partir du stock conditionné. L'échantillon S_0 est le témoin et n'est pas soumis au séchage. Les lots S_1 , S_2 et S_3 , subissent le séchage convectif en étuve, respectivement pendant 1 h, 2 h et 3 h.

3.2.2.4. Séchage suivi du trempage des graines

Les graines sont soumises au traitement mixte de séchage et de trempage. Dans cette série d'essais, le séchage des graines est aussi effectué à l'étuve à la température de 105°C comme dans les tests précédents. Pour ce faire, quatre (04) lots d'échantillons de 3 kg de graines (S_{T0} , S_{T1} , S_{T2} , S_{T3}), sont constitués à partir du stock nettoyé et conditionné. L'échantillon S_{T0} est le témoin et n'est pas soumis au séchage. Les lots S_{T1} , S_{T2} et S_{T3} , subissent le séchage convectif en étuve, respectivement pendant 1 h, 2 h et 3 h. Après quoi, ils sont ensuite trempés dans l'eau désionisée à la température ambiante (environ $30 \pm 1^\circ\text{C}$), à raison de 2 L d'eau par kilogramme de graines, et cette fois-ci pendant 24 h.

3.2.2.5. Séchage complété par la cuisson des graines

Les graines sont soumises au traitement mixte de séchage et de la cuisson. Le séchage des graines est toujours effectué à l'étuve à la température de 105°C. Quatre (04) lots d'échantillons de 6 kg de graines (S_{C0} , S_{C1} , S_{C2} , S_{C3}), sont constitués à partir du stock nettoyé et conditionné. L'échantillon S_{C0} est le témoin et n'est donc pas soumis au séchage. Les trois autres lots S_{C1} , S_{C2} et S_{C3} subissent le séchage convectif en étuve, respectivement pendant 1 h, 2 h et 3 h. Chacun, de ces trois lots S_{C1} , S_{C2} , S_{C3} , est ensuite divisé en deux. Les trois premiers sous lots (S_{C11} , S_{C21} , et S_{C31}) et les trois seconds sous lots (S_{C12} , S_{C22} et S_{C32}) sont alors soumis à la cuisson à l'ébullition respectivement pendant 1 h et 2 h, la durée de la cuisson étant toujours comptée à partir du début de l'ébullition.

Les différents échantillons ainsi prétraités sont ensuite portés dans chacun des trois équipements de décortiquage pour y effectuer les tests et en évaluer les performances.

Les performances obtenues grâce aux décortiqueuses mécaniques sont comparées à celles issues du procédé traditionnel choisi comme celui de référence.

3.2.2.6. Décortiquage traditionnel

Dans le procédé traditionnel, les graines de néré sont cuites dans une marmite durant au moins 12 h. Nous avons retenu la durée minimale car parfois, les femmes productrices vont jusqu'à 24 h. Elles sont ensuite décortiquées par le foulage aux pieds dans des bassines en plastique ou en aluminium après un ajout de sable, une pratique ancienne destinée à augmenter la friction au cours de l'opération (Photo 3-4).



Photo 3-4 : Décortiquage traditionnel par foulage aux pieds

Dans cette série d'investigations, aussi bien, le décortiquage traditionnel, que chacun des prétraitements des graines précédemment décrits et les tests dans les machines, sont effectués en six (06) répétitions.

3.2.2.7. Méthodes d'évaluation des paramètres de performance

Durant chaque type d'essai, un prélèvement d'échantillon de graines, de masse $M_s=500$ g, est effectué. Les graines de cette prise d'échantillon sont manuellement séparées au laboratoire en quatre (04) fractions, respectivement pesées pour en obtenir:

- la masse des cotylédons entiers ou éclatés en deux (M_C);
- la masse des graines non décortiquées ou partiellement décortiquées (M_U);
- la masse des cotylédons brisés (M_B);
- et la masse des coques (M_H).

Une graine est considérée comme décortiquée, si environ 90 % de la coque est enlevée (Leniges and Beverlov, 1975). L'efficacité de la décortiqueuse est évaluée au moyen des paramètres de

performance tels que l'Indice de décortiquage (I_D), le Taux de décortiquage (T_D), le Taux de brisure des cotylédons (T_B) et le rendement au décortiquage (R_D) exprimés par les formules (Sanya et al., 2009 ; Opoku et al., 2003 ; Hucl et al., 2001).

– Indice de décortiquage (I_D) :
$$I_D = [(M_C + M_H) - (M_U + M_B)] / M_S \quad (3-1)$$

– Taux de décortiquage (T_D) :
$$T_D = [(M_S - M_U) / M_S] \times 100 (\%) \quad (3-2)$$

– Taux de brisure des cotylédons (T_B) :
$$T_B = [M_B / (M_C + M_B)] \times 100 (\%) \quad (3-3)$$

– Rendement au décortiquage (R_B) :
$$R_D = [(M_C + M_B) / M_S] \times 100 (\%) \quad (3-4)$$

L'indice de décortiquage (I_D) sert à mesurer l'efficacité globale de la décortiqueuse. Sa valeur théorique est comprise entre -1 et +1. Elle est égale à -1 dans le cas d'une brisure totale des graines et +1 dans celui où le décortiquage est parfait, sans brisure et sans graines non décortiquées (Fliedel et al., 1989 ; Opoku et al., 2003).

Pour chaque traitement, la teneur en eau des graines est déterminée suivant la norme ISO-662. Un échantillon de $M_i = 5$ g, de graines mouluées au moyen du moulin RETCH, est prélevé et soumis au séchage différentiel à l'étuve à la température de 105 ± 0.2 °C pendant au moins 8 h, jusqu'à l'obtention de la masse constante (M_f). La teneur en eau, en base sèche, est calculée à partir de la masse initiale de l'échantillon (M_i) et la masse finale (M_f) (sortie de l'étuve) par la formule :

$$W_{bs} = [(M_i - M_f) / M_f] \times 100 (\%) \quad (3-5)$$

3.2.2.8. Analyses statistiques

Les données acquises sur les paramètres mesurés sont traitées, à travers les calculs des valeurs moyennes, d'écart types et de fréquences, avec le logiciel MINITAB. L'indice de décortiquage, le taux de décortiquage, le taux de brisure et le rendement au décortiquage, ne vérifiant pas les tests de normalité de Ryan-Joiner et d'homogénéité de variance de Levene, sont soumis à ceux non paramétriques de Kruskal-Wallis (Capéraà and van Cutsem, 1988).

3.3. Résultats et discussion

3.3.1. Effets des traitements simples sur l'efficacité des équipements

Les résultats des mesures effectuées sur les paramètres de performance des décortiqueuses testées et de la méthode traditionnelle de foulage aux pieds, en fonction des différents prétraitements (cuisson, trempage, séchage), sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3-1. Valeurs des paramètres de performance des décortiqueuses en fonction des prétraitements appliqués aux graines et celles du foulage traditionnel aux pieds.

Équipement	Pré-traitement	Indice de décortiquage	Taux de décortiquage (%)	Taux de brisure des cotylédons (%)	Rendement (%)
Décortiqueuse à palettes	Sans traitement	-0,70 ± 0,07	22,82 ± 2,82	22,82 ± 2,80	8,62±0,53
	Cuisson (1h)	-0,12 ± 0,23	67,48 ± 17,54	67,13 ± 3,16	37,22 ±10,19
	Cuisson (2h)	0,04 ± 0,01	57,99 ± 3,85	77,3 ± 8,41	17,33±7,69
	Cuisson (3h)	-0,28± 0,16	50,39 ± 3,48	68,09 ± 16,11	23,65±7,63
	Cuisson (4h)	-0,22 ± 0,01	47,47 ± 0,93	68,6 ± 5,4	19,58±2,60
	Cuisson (5h)	0,19 ± 0,04	73,86 ± 7,81	81,81 ± 6,29	22,72±11,81
	Cuisson (6h)	0,21 ± 0,18	80,72 ± 1,59	66,63 ± 4,77	37,03±9,10
	Séchage (1h)	-0,40 ± 0,02	42,58 ± 2,73	81,69 ± 0,51	18,05±3,51
	Séchage (2h)	-0,55 ± 0,02	58,50 ± 2,88	85,56 ± 4,71	34,5±0,57
	Séchage (3h)	-0,06 ± 0,01	81 ± 0,01	88,45 ± 2,22	35,00±1,15
	Trempage (24 h)	-0,29 ± 0,05	40,14 ± 1,74	94,93 ± 2,11	6,4±1,77
	Trempage (48 h)	-0,20 ± 0,04	60,04 ± 2,21	95,65 ± 0,02	21,29±0,05
	Trempage (72 h)	-0,28 ± 0,07	48,81 ± 2,62	73,59 ± 4,91	21,86±1,87
Décortiqueuse à grilles	Sans traitement	-0,69 ± 0,06	41,46 ± 11,19	39,86 ± 22,06	13,26±1,66
	Cuisson (1h)	-0,32 ± 0,15	45,15 ± 13,67	36,18 ± 24,55	23,09±6,60
	Cuisson (2h)	0,25 ± 0,01	74,32 ± 2,93	26,21 ± 3,72	37,28±5,71
	Cuisson (3h)	0,81 ± 0,11	94,07 ± 5,07	1,202 ± 1,38	48,38±4,71
	Cuisson (4h)	0,95 ± 0,01	98,64 ± 0,56	0 ± 0,01	45,73±3,12
	Cuisson (5h)	0,78 ± 0,04	94,17 ± 2,01	8,117 ± 1,05	42,27±2,70
	Cuisson (6h)	0,93 ± 0,06	99,44 ± 0,64	4,585 ± 4,55	51,91±2,94
	Séchage (1h)	-0,23 ± 0,01	65 ,63 ± 3,03	61,95 ± 0,96	38,68±3,09
	Séchage (2h)	0,09 ± 0,07	89,50 ± 2,88	60,25 ± 2,59	49±1,15
	Séchage (3h)	0,72 ± 0,06	98,02 ± 0,02	31,92 ± 3,48	33,76±2,91

	Trempage (24 h)	$-0,42 \pm 0,14$	$40,22 \pm 9,44$	$77,5 \pm 2,81$	$14,02 \pm 2,96$
	Trempage (48 h)	$-0,58 \pm 0,11$	$31,66 \pm 8,11$	$71,51 \pm 1,76$	$13,52 \pm 2,63$
	Trempage (72 h)	$-0,50 \pm 0,05$	$45,19 \pm 3,75$	$82,64 \pm 5,79$	$20,43 \pm 8,26$
Décortiqueuse à meules	Sans traitement	$-0,46 \pm 0,07$	$48,83 \pm 3,71$	$96,69 \pm 0,31$	$19,39 \pm 0,02$
	Cuisson (1h)	$-0,43 \pm 0,31$	$52,65 \pm 25,82$	$82,42 \pm 5,31$	$17,04 \pm 8,26$
	Cuisson (2h)	$-0,39 \pm 0,16$	$42,23 \pm 17,01$	$79,79 \pm 0,98$	$21,17 \pm 8,28$
	Cuisson (3h)	$-0,46 \pm 0,01$	$33,35 \pm 3,46$	$64,09 \pm 4,72$	$25,58 \pm 1,51$
	Cuisson (4h)	$-0,18 \pm 0,11$	$45,25 \pm 8,04$	$70,09 \pm 3,96$	$26,09 \pm 5,79$
	Cuisson (5h)	$0,08 \pm 0,04$	$60,43 \pm 2,21$	$65,7 \pm 8,32$	$28,35 \pm 2,51$
	Cuisson (6h)	$0,43 \pm 0,07$	$73,20 \pm 3,69$	$59,85 \pm 0,17$	$47,11 \pm 1,01$
	Séchage (1h)	$-0,10 \pm 0,04$	$72,40 \pm 0,15$	$88,68 \pm 0,78$	$30,04 \pm 1,53$
	Séchage (2h)	$-0,67 \pm 0,07$	$41,05 \pm 3,03$	$84,92 \pm 2,97$	$33,77 \pm 0,54$
	Séchage (3h)	$-0,22 \pm 0,11$	$88,53 \pm 0,21$	$86,05 \pm 1,66$	$50,87 \pm 7,29$
	Trempage (24 h)	$-0,43 \pm 0,08$	$46,77 \pm 0,91$	$94,9 \pm 0,20$	$19,51 \pm 2,99$
	Trempage (48 h)	$-0,49 \pm 0,05$	$38,75 \pm 6,06$	$92,79 \pm 2,35$	$14,86 \pm 2,91$
	Trempage (72 h)	$-0,52 \pm 0,15$	$31,26 \pm 10,98$	$88,27 \pm 6,83$	$10,09 \pm 1,85$
Méthode traditionnelle	Cuisson (12h)	$0,931 \pm 0,02$	$96,59 \pm 1,02$	0 ± 0	$48,41 \pm 4,38$
Probabilité		0,001	0,000	0,002	0,000

3.3.1.1. Analyse des performances techniques de la décortiqueuse à palettes

Dans le tableau 3-1, sont consignées les valeurs des indices et taux de décortiquage, de même que le taux de brisure et le rendement au décortiquage mécanique (Machine) des graines de néré prétraitées par cuisson, trempage ou séchage et des graines non prétraitées. Ces valeurs sont comparées à celles des graines provenant du décortiquage traditionnel (fouillage aux pieds).

L'analyse de ces données fait ressortir les conclusions suivantes :

- la décortiqueuse à palettes fournit ses meilleures performances avec des graines cuites à l'ébullition 6 h, par comparaison aux autres durées de cuisson. Les valeurs maximales sont celles obtenues autour de 6 h : ($I_D=0,21 \pm 0,18$; $T_D=80,72 \pm 1,59$ %) ; les valeurs d'Indice (I_D) et de Taux de

décortiquage (T_D), enregistrées par cet équipement machine sont inférieures à celles obtenues par la technique traditionnelle ($I_D=0,21\pm0,04$ et $T_D=96,59\pm1,02$ %).

– les valeurs d'indice de décortiquage (I_D) fournies par la machine, en utilisant les graines trempées à 30 °C, pendant 24 h, 48 h et 78 h, d'une part, ainsi que les graines non traitées, d'autre part, sont négatives. Cela atteste l'obtention d'un mauvais décortiquage et notamment qu'une part importante des graines et des cotylédons ont été brisés.

– les données recueillies, en utilisant les graines séchées pendant 3h, semblent quelque peu intéressantes, avec des Taux de décortiquage relativement élevés : $81\pm0,01$. Toutefois, ces valeurs sont contrariées par les faibles indices (I_D) correspondants ($-0,06\pm0,01$) et un taux de brisure élevé des cotylédons ($88,45\pm2,22$ %)

– les graines cuites pendant 6 h permettent d'obtenir les Rendements au décortiquage (R_D) les plus élevés $37,03\pm9,10$. Les graines non traitées d'une part, et celles trempées de l'autre, exhibent les plus faibles rendements au décortiquage : entre $8,62\pm0,53$ et $6,43\pm1,77$ %.

– les graines de néré séchées et celles prétraitées par trempage et par cuisson dévoilent des taux de brisure très élevés au décortiquage. Le taux de brisure varie de 22,82 % à 95,65 %. Par contre, la décortiqueuse à gousses de voandzou (*Vigna subterranean (L.) Verdc*), mise au point par Atiku et qui a le même principe de fonctionnement que la présente décortiqueuse, fournit ses meilleures performances lorsque la gousse est sèche : 5 % (bs). A cette teneur en eau, l'indice d'efficacité est de 0,80 pendant que le taux de brisure égal à 20 % et le taux de décortiquage égal à 95 % (Atiku et al., 2004 ; Akani et al., 2000). La décortiqueuse des graines de bambara présente aussi les mêmes performances à cette teneur en eau (Oluwole et al., 2007).

En définitive, seule la cuisson des graines pendant 6 h, favorise l'atteinte des indices de décortiquage les plus élevés : $I_D=0,21\pm0,18$. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues en appliquant la méthode traditionnelle : $0,93\pm0,04$. Le principe de fonctionnement de la décortiqueuse à palette est à la base de ce résultat. Le décortiquage se fait à partir du choc entre les palettes et les graines d'une part et entre les graines et la cage d'autre part. Ces actions combinées, tout en favorisant le décortiquage de la graine, provoquent la brisure des cotylédons. Pour réduire le taux de brisure, on pourrait être tenté de réduire la vitesse de rotation de l'axe des palettes. Dans ce cas on devra s'attendre à la réduction du taux de décortiquage et du rendement au décortiquage.

Ces performances obtenues par la décortiqueuse à palettes ne sont pas intéressante en comparaison avec la méthode traditionnelle. L'un des inconvénients de cet équipement est qu'il ne dispose pas d'un dispositif de réglage du taux de décortiquage. Le décortiquage se fait par choc. Cet équipement ne

peut-être recommandé pour être introduit auprès des transformatrices. La décortiqueuse à palette peut-être efficace pour le décortiquage des graines à coques fragiles tels le karité (Oluwole et al., 2004). Les travaux réalisés sur un équipement similaire ont montré qu'à la teneur en eau de 22,7 % (bs), la décortiqueuse présente un taux de décortiquage des noix de karité de 100% et un indice d'efficacité égale à 0,93. La décortiqueuse à palettes pourrait être recommandée pour le broyage des feuilles de neem, d'hyptis ou de papayer pour la production d'extrait aqueux (Ahouansou et al., 2010).

3.3.1.2. Analyse des performances techniques de la décortiqueuse à grilles

L'analyse des résultats du tableau 3-1 fait ressortir les conclusions suivantes :

– la décortiqueuse fournit ses meilleures performances avec des graines cuites à l'ébullition entre 3 h et 6 h, par comparaison aux autres durées de cuisson. Les valeurs maximales sont celles obtenues autour de 4 h : ($I_D=0,95\pm0,01$; $T_D=98,64\pm0,56$ %) ; les valeurs d'Indice (I_D) et de Taux de décortiquage (T_D), enregistrées à la machine ($I_D=0,81\pm0,11$ à $0,95\pm0,01$ et $T_D=64,07$ à $99,44\pm0,64$ %), sont légèrement supérieures à celles obtenues par la technique traditionnelle ($I_D=0,93\pm0,04$ et $T_D=96,59\pm1,02$ %). A la limite, on pourrait retenir que les indices de décortiquage, découlant de la cuisson à durées entre 4 h et 6 h, sont de même ordre de grandeur que ceux découlant du foulage aux pieds. Les valeurs du taux de décortiquage obtenues dans cette période sont supérieures à celles obtenues avec la décortiqueuse à graines d'arbre à pain (*Treculia africana*). En effet, lorsque la graine est trempée à 70°C pendant 10 mn et cuite à la vapeur chaude à 121°C pendant 10 mn, le taux de décortiquage des graines est de 84,6 %. Le taux de brisure des graines est évalué à 1 % tandis que le rendement au décortiquage est de 74,9 % (Omobuwajo et al., 1999 ; Ikegwuoha, 1998).

– les valeurs d'indice de décortiquage (I_D) fournies par la machine, en utilisant les graines trempées à 30°C, pendant 24 h, 48 h et 78 h, d'une part, ainsi que les graines non traitées, d'autre part, sont négatives. Cela atteste l'obtention d'un mauvais décortiquage et notamment qu'une part importante des graines et des cotylédons ont été brisés. Néanmoins, on peut noter que les indices de décortiquage (I_D) des graines trempées ($-0,42\pm0,14$ à $-0,58\pm0,11$) sont supérieurs à ceux des graines n'ayant subi aucun prétraitement ($-0,69\pm0,06$). Ce qui paraît légitime et pourrait s'expliquer par le fait que, le trempage a tout de même eu un léger effet sur les coques des graines (absorption d'eau) en comparaison avec celles non trempées. Les valeurs du taux de décortiquage (T_D) sont assez faibles, en ce qui concerne les graines non traitées ($41,46\pm3,19$ %) ainsi que celles trempées (entre 31,66 % et 45,19 %). Ces résultats confirment que ces deux types de graines ne conviennent pas à la machine.

– les données recueillies, en utilisant les graines séchées en 2 h et 3 h, semblent quelque peu intéressantes, avec des Taux de décortilage relativement élevés : $89,50 \pm 2,88$ et $98,02 \pm 0,02$. Toutefois, ces valeurs sont contrariées par les faibles indices (I_D) correspondants.

En se basant sur ces deux premiers critères techniques (paramètres Indices et Taux de décortilage), la cuisson des graines de néré se révèle comme étant le meilleur prétraitement (Tableau 3-1). Mais ces deux critères, à eux seuls, ne suffisent pas pour adopter définitivement la cuisson. Ce prétraitement ne pourra être validé, que si les précédentes performances sont renforcées par celles des deux autres importants paramètres que sont le Taux de brisure de cotylédons (T_B) faible et le Rendement au décortilage (R_D).

Les résultats expérimentaux concernant ces derniers paramètres sont ceux consignés dans les deux dernières colonnes du Tableau 3.1. L'analyse des données ainsi acquises permet de retenir que :

– les graines séchées en 2 h et 3 h d'une part, et celles cuites en 3 h, 4 h, 5 h et 6 h d'autre part, exhibent des rendements au décortilage (R_D) de mêmes ordres de grandeurs que ceux fournis par le procédé traditionnel : $47,76 \pm 2,91$ à $51,91 \pm 2,94$ %. Les valeurs (R_D) les plus élevées sont celles issues du décortilage à la machine des graines cuites durant 4 h à 6 h;

– les graines non traitées d'une part, et celles trempées de l'autre, exhibent les plus faibles rendements au décortilage : entre $13,26 \pm 1,66$ et $20,43 \pm 2,26$ % ;

– en plus, les graines de néré séchées et celles prétraitées par trempage dévoilent des taux de brisure très élevés au décortilage, respectivement de $31,92 \pm 3,19$ à $61,95 \pm 0,96$ % et de $71,51 \pm 1,76$ à $82,64 \pm 2,79$. Ces valeurs ne sont en rien comparables, ni à celles données par le procédé traditionnel (quasi nulle) d'une part, ni à celles émanant de la cuisson à 3 h, 4 h, 5 h et 6 h qui affichent des taux de brisure inférieurs à 5 %, d'autre part.

En définitive, la cuisson des graines pendant 4 h, 5 h et 6 h, favorise l'atteinte des indices de décortilage les plus élevés : $I_D = 0,94 \pm 0,04$ à $0,95 \pm 0,01$. Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues en appliquant la méthode traditionnelle respectivement de 1% et 2,15% ($0,93 \pm 0,04$). Il est important de souligner qu'elles sont meilleures aux valeurs d'indices (0,70) fournies par les décortiqueuses mises au point, respectivement au Nigeria pour des graines étuvées (Audu et al., 2004) et au Burkina-Faso pour les graines sèches (Diawara and Jakobsen, 2004). Ce dernier est de même ordre de grandeur que l'indice de décortilage atteint dans la présente investigation en utilisant les graines séchées à 105°C pendant 3 h: $I_D = 0,72 \pm 0,06$.

Durant son application, la cuisson soumet les graines de néré aux actions conjuguées de la chaleur et de l'eau (en excès) qui provoquent une certaine fragilisation de la coque et facilitent le décortilage.

Ces résultats corroborent ceux obtenus antérieurement par d'autres auteurs (Pirke and Bhole, 2000). Ils ont abouti à la conclusion que les coques des graines de légumineuses peuvent être détachées des cotylédons avant le décortiquage en leur faisant subir certains prétraitements à la chaleur humide ou sèche.

L'intérêt de ces résultats réside dans le fait qu'il est ainsi prouvé, qu'avec une réduction de 50 % à 66 % du temps de cuisson par rapport à la méthode traditionnelle, la décortiqueuse mécanique procure des indices de décortiquage aussi élevés que celui obtenu par le foulage traditionnel aux pieds. L'adoption de cet équipement permet, non seulement la réduction de la pénibilité du travail de décortiquage (objectif initial), mais en plus, de bénéficier d'impacts positifs aux deux niveaux économique et environnemental, par la diminution du temps de cuisson et la réduction de la consommation de la source d'énergie.

Les expériences de séchage des graines, à 105°C durant 3 h, ont donné les plus satisfaisants résultats pour ce prétraitement. Les valeurs moyennes d'indices et de taux de décortiquage sont $I_D=0,72\pm0,06$ et $T_D=98,02\pm0,02$ %, résultats globalement faibles en comparaison à ceux obtenus pour la cuisson à l'eau des graines.

Le trempage, réalisé à la température ambiante ($30\pm1^\circ\text{C}$), semble avoir eu peu d'effet sur la fragilisation des graines. La température d'eau de trempage étant constante et faible, les durées de 24 h à 72 h n'ont pas permis de briser l'adhérence coque-cotylédons des graines. C'est probablement ce qui explique les faibles taux de décortiquage obtenus pour les graines trempées $35,66\pm3,11$ à $45,19\pm3,75$ % contrastant avec ceux issus des graines cuites (supérieurs à 96 %) et des graines séchées à 3h (98,02 %). Aussi, convient-il de mentionner que la durée de trempage n'a pas été prolongée au-delà de 72 h, en raison de la crainte d'un éventuel développement des microorganismes dont les activités métaboliques pourraient dégrader les graines à cette température de travail de 30°C.

Les condiments afitin (fon) ou iru (yoruba) sont des produits frais contrairement à ceux élaborés au nord Bénin qui se présentent sous la forme sèche, le soleil étant le moyen de séchage. Les différentes présentations d'afitin prisé au Bénin ont cette caractéristique d'avoir un taux élevé de cotylédons (Gutierrez et al., 2000). Un décortiquage donnant des cotylédons à fort taux de brisure est mal accepté par les femmes transformatrices. Il délivre, non seulement de l'afitin à faible taux de cotylédons, mais aussi occasionne la perte des cotylédons brisés surtout pendant la phase de séparation coques-cotylédons par lavage à la boue, avec pour conséquence, la baisse du rendement. Les consommateurs considèrent qu'un afitin est de bonne qualité, s'ils retrouvent dans leur sauce, des morceaux de graines (Gutierrez et al., 2000). Ainsi, pour faciliter l'adoption de la décortiqueuse par les

transformatrices, le traitement de cuisson des graines de 4 h à 6 h est recommandé. Les études économiques favorisant la comparaison entre le gain de temps, la réduction de la consommation de différents intrants tels que le bois, l'eau et le rendement en afitin permettront d'opérer un choix judicieux de la durée optimale de cuisson entre 4h et 6 h.

Ces traitements permettent, non seulement d'avoir une Indice de décortilage élevé, mais aussi d'avoir un faible taux de brisure des cotylédons. Les tests d'acceptabilité, effectués sur du soubala produit par le décortilage mécanique des graines sèches, ont été réalisés au Burkina-Faso. Les résultats ont montré que, bien que le soubala mécanique ait une couleur plus attrayante et une odeur moins forte que celui obtenu par le décortilage traditionnel, il a été moins préféré à ce dernier (Lingani-Sawadogo et al., 2003). La raison est attribuée au fait que les caractéristiques organoleptiques du soubala traditionnel restent les critères de référence des consommateurs burkinabè. Les changements sur les caractéristiques organoleptiques du soubala sont dus au taux élevé de brisure des cotylédons des graines décortiquées mécaniquement. L'émiettement des cotylédons augmente les surfaces de contact et favorise un développement plus rapide des bactéries responsables de la fermentation (Lingani-Sawadogo et al., 2003). Ainsi, afin que l'introduction de l'équipement dans la chaîne de transformation de l'afitin ne provoque le rejet du produit par les consommateurs, la cuisson des graines entre 4 h à 6 h nous paraît mieux convenir. Les études économiques permettront de choisir le temps le plus approprié. Traditionnellement, les graines de néré sont cuites pendant 12 h et au-delà. Bien que cette étape de cuisson ait pour inconvénient, une forte consommation en eau et en bois, elle permet de gorger la graine d'eau et d'en augmenter la masse. La cuisson en 6 h augmente aussi la masse des 100 graines de 23 g à 51 g et celle des cotylédons de 17 g à 33 g (Ahouansou et al., 2010). Le rendement en afitin est un facteur important pour les productrices. Il s'agit alors de trouver la durée optimale de cuisson qui permette d'avoir un bon décortilage couplé à un bon rendement en afitin. Les valeurs des rendements de production (différent de celui au décortilage) d'afitin fon et yoruba oscillent traditionnellement entre 85,6 et 94,8 % (Houankpèvi, 2009). Il importe alors que l'introduction de la décortiqueuse et la réduction de la durée de la cuisson conduisent à l'obtention des mêmes valeurs de rendement, afin d'augmenter les chances d'adoption de cet équipement de transformation. Aussi, la durée de cuisson peut-elle connaître des modifications à la baisse ou à la hausse, suivant que les graines proviennent des récoltes de la nouvelle saison ou de l'ancienne. Les durées de cuisson de 4 h à 6 h sont celles découlant de l'utilisation des graines à teneur en eau de 16,14 % (bs). Si dans le cas du soubala (produit séché), il a été recommandé le décortilage des graines séchées durant 4 h après un trempage de 5 h, dans le cas de l'afitin fon ou d'iru yoruba, les

résultats des présents travaux amènent à recommander la cuisson des graines entre 4 h et 6 h. Les résultats obtenus au chapitre 2 montre que, entre 4 et 6 h, la masse de 1000 cotylédons varient de 315 à 330 g, tandis que leur teneur en eau croit de 194,11 % à 212 %. Pour des économies multiformes, le seuil de 4 h de cuisson peut être recommandé. L'introduction, dans l'équipement, du système de réglage du jeu existant entre les deux (02) grilles, explique en partie l'amélioration atteinte dans ces résultats. Ce système permet en réalité de modifier le jeu aménagé entre les grilles, de façon à l'adapter aux caractéristiques physiques acquises par les graines à la suite du prétraitement appliqué.

3.3.1.3. Analyse des performances techniques de la décortiqueuse à meules

Le tableau 3-1 présente les valeurs de paramètres de performances techniques du moulin à meules métalliques testé en utilisant les graines de néré issues des différents traitements cités.

L'analyse des résultats enregistrés avec le moulin fait ressortir les conclusions suivantes :

- la décortiqueuse fournit ses meilleures performances avec des graines cuites à l'ébullition pendant 5 h et 6 h. Les valeurs maximales de l'Indice (I_D) et du Taux de décortiquage (T_D) sont celles obtenues autour de 6 h : $I_D=0,43\pm 0,01$ et $T_D=73,20\pm 3,69$ %. On note qu'elles sont inférieures à celles obtenues par la technique traditionnelle : $I_D=0,93\pm 0,04$ et $T_D=96,59\pm 1,02$ %, d'une part et à celles découlant de l'utilisation de la décortiqueuse à grilles, d'autre part : $I_D=0,95\pm 0,01$ et $T_D=98,64\pm 0,56$ %. Les performances ainsi enregistrées restent également inférieures à celles fournies par la décortiqueuse à graines de néré à tambour qui, d'après les auteurs, affiche une valeur d'indice de décortiquage égale à 0,73 (Audu et al., 2004 ; Ojo, 1989 ; Oloso, 1988).

- les valeurs de l'indice de décortiquage (I_D) fournies par le moulin, en utilisant les graines trempées à 30°C pendant 24 h, 48 h et 78 h d'une part, ainsi que celles des graines non traitées et des graines séchées d'autre part, sont négatives. Cela peut s'expliquer par deux facteurs essentiels : le premier tient à un mauvais décortiquage et le second à une quantité importante dans la brisure des graines et des cotylédons.

- les données recueillies, en utilisant les graines séchées en 3 h, sont intéressantes avec des Taux de décortiquage relativement élevés : $88,53\pm 0,21$. Mais cette valeur est contrariée par le faible indice (I_D) correspondant (-0,22).

En se basant sur ces deux premiers critères techniques (paramètres Indices et Taux de décortiquage), la cuisson des graines de néré pendant 6 h se révèle comme étant le meilleur prétraitement à apporter aux graines de néré avant le décortiquage ;

– les graines séchées 3 h d'une part, et celles cuites en 6 h d'autre part, donnent des Rendements au décortilage (R_D) de mêmes ordres de grandeurs que ceux fournis par le procédé traditionnel : entre $47,11 \pm 1,01$ et $50,87 \pm 7,29$ % ;

– les graines non traitées d'une part, et celles trempées de l'autre, exhibent les plus faibles rendements au décortilage : entre $10,09 \pm 1,85$ et $19,39 \pm 0,017$ %.

– la décortiqueuse à meules présente des taux de brisure des cotylédons très élevés au décortilage, quel que soit le mode de prétraitement testé : entre $59,85 \pm 0,17$ et $96,69 \pm 0,31$. Ces valeurs sont très élevées en comparaison à celles obtenues par la méthode traditionnelle et avec la décortiqueuse à grilles.

La cuisson des graines pendant 6 h favorise l'atteinte des indices de décortilage les plus élevés. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues en appliquant la méthode traditionnelle ($0,93 \pm 0,04$) et à celles de la décortiqueuse à grilles ($0,95 \pm 0,011$). Elles restent également inférieures aux performances de la décortiqueuse d'égusi variété (*Citrullus edulis*) qui a le même principe de fonctionnement que la décortiqueuse à meules. Cet équipement présente un taux de décortilage de 96 % et un taux de brisure des cotylédons égale à 8,9 % (Okokon et al., 2007 ; Odigboh, 1979). Les performances de la décortiqueuse à meules sont, à l'état actuel, loin d'être satisfaisantes. Des améliorations de performances sont nécessaires et peuvent concerner l'utilisation des meules d'un plus grand diamètre. Aussi, une cuisson plus prolongée (12-16 h) de la graine, comparativement à celle de la méthode traditionnelle, peut contribuer à l'amélioration de ses performances techniques.

L'efficacité de la décortiqueuse de néré, évaluée à travers les paramètres classiques (indice, taux et rendement de décortilage, taux de brisure des cotylédons), a été analysée en utilisant les graines prétraitées par la cuisson, le trempage et le séchage. Cette étude a révélé que, des trois (3) équipements testés, la décortiqueuse à grilles est la plus performante. Aussi, la cuisson est-elle le prétraitement le mieux adapté aux graines de néré pour le décortilage. Ensuite, les meilleures performances de la décortiqueuse à grilles sont obtenues avec les graines cuites à ébullition pendant une durée allant de 4 h à 6 h. En-deçà de ces valeurs, soit moins de 4 h de cuisson, l'efficacité de la machine au décortilage n'est pas adéquate, car elle demeure inférieure à celle fournie par le procédé traditionnel. Le test a révélé certaines imperfections sur la décortiqueuse à grilles, imperfections qui seront abordées dans le chapitre consacré à son optimisation

3.3.2. Effets des traitements mixtes sur l'efficacité de la décortiqueuse à grilles

Le tableau 3-2 présente les données relatives aux performances fournies par la décortiqueuse à grilles alimentées par des graines soumises aux prétraitements mixtes décrits plus haut. Rappelons que les résultats du tableau 3-1 avaient montré que la cuisson de la graine à l'ébullition, pendant 4 à 6 h, permettait d'obtenir les meilleures performances avec la décortiqueuse à grilles. Les données acquises sur les paramètres techniques, en utilisant les graines séchées en 2 h et 3 h, sont également intéressantes. On accédait là aussi à des Taux de décortiquage relativement élevés : $89,50 \pm 2,88$ et $98,02 \pm 0,02$. Toutefois, ces valeurs sont contrariées par les faibles indices ($I_D=0,72$) correspondants.

Tableau 3-2: Valeurs des performances techniques de la décortiqueuse à grilles et de la méthode traditionnelle au décortiquage avec les graines ayant subi un traitement mixte

Equipement	Traitement	Indice de décortiquage	Taux de décortiquage (%)	Taux de brisure des cotylédons (%)	Rendement (%)
Décortiqueuse à grilles	Sans traitement	$-0,69 \pm 0,06$	$41,46 \pm 11,19$	$39,86 \pm 22,06$	$13,26 \pm 1,66$
	Séchage (3h)	$0,72 \pm 0,06$	$98,02 \pm 0,02$	$31,92 \pm 3,48$	$33,76 \pm 2,91$
	Cuisson (4h)	$0,95 \pm 0,01$	$98,64 \pm 0,56$	0 ± 0	$45,73 \pm 3,12$
	Séchage 1h + trempage 24h	$0,52 \pm 0,03$	$81,33 \pm 1,26$	$24,17 \pm 3,71$	$42,83 \pm 1,26$
	Séchage 2h + trempage 24h	$0,87 \pm 0,02$	$97,83 \pm 0,98$	$15,05 \pm 4,65$	$43,5 \pm 2,42$
	Séchage 3h + trempage 24h	$0,51 \pm 0,12$	$80 \pm 6,13$	$28,45 \pm 7,16$	$27,83 \pm 4,30$
	Séchage 3h + cuisson 1h	$0,62 \pm 0,06$	$85,33 \pm 2,58$	$21,51 \pm 5,10$	$38,16 \pm 3,48$
	Séchage 3h + cuisson 2h	$0,70 \pm 0,04$	$88,66 \pm 1,21$	$17,15 \pm 5,22$	$37,5 \pm 1,64$
	Séchage 2h + cuisson 1h	$0,69 \pm 0,11$	$88,23 \pm 2,48$	$22,51 \pm 5,10$	$39,16 \pm 2,23$
	Séchage 2h + cuisson 2h	$0,89 \pm 0,02$	$98,66 \pm 1,10$	$14,25 \pm 3,51$	$44,16 \pm 1,21$
	Séchage 1h +	$0,57 \pm 0,06$	$75,33 \pm 2,51$	$19,22 \pm 4,10$	$39,26 \pm 1,65$

	cuisson 1h				
	Séchage 1h + cuisson 2h	0,71±0,11	87,24±2,23	25,57±4,15	40,16±2,54
Méthode traditionnelle	Cuisson (12h)	0,931± 0,02	96,59 ± 1,02	0 ± 0,01	48,41±4,38
Probabilité		0,001	0,000	0,002	0,000

La série d'essais dont les résultats sont consignés dans le tableau 3-2 vise à explorer les traitements complémentaires à assurer aux graines séchées en vue d'améliorer les performances techniques de la décortiqueuse à grilles. Effectivement, ces résultats confirment le fait que tous les traitements appliqués dans cette investigation permettent d'améliorer les performances techniques du décortiquage mécanique par rapport à celles obtenues avec les graines crues non traitées. De plus, ces résultats prouvent également que la cuisson, pendant 4 à 6 h, demeure le meilleur prétraitement au bon décortiquage des graines de néré. Aussi, les traitements complémentaires de la cuisson et de trempage des graines préalablement séchées contribuent-ils à l'amélioration de l'efficacité technique de la décortiqueuse. En effet, le séchage des graines pendant deux (2) heures suivi du trempage durant 24 h conduisent à un accroissement de l'Indice de décortiquage (I_d) d'environ 21 % et une réduction du taux de brisure de 50 %, par rapport au simple séchage des graines de néré. Le trempage après le séchage rend la graine plus ductile et moins cassable. Ce prétraitement mixte favorise le passage de la graine, du type de produit 1 (figure 1-3) au produit 2. La graine préalablement dur, résistante et fragile, dévient dure, résistante et ductile (Loncin and Merson, 1979). La cuisson pendant 2 h précédée d'un séchage durant 2 h permet aussi d'améliorer les performances techniques du décortiquage. Par rapport au séchage simple, l'indice de décortiquage a augmenté de 0,72 à 0,89 tandis que le taux de brisure des cotylédons est réduit de 31,92 % à 17,15 %. Cette amélioration est due au fait que, les traitements combinés de séchage suivi de la cuisson facilitent, dans un premier temps, la fragilisation de la coque et la réduction de l'adhérence entre coque et cotylédons, et dans un second temps, rendent le cotylédon ductile et moins cassable.

3.4. Conclusion

L'efficacité de la décortiqueuse de néré, évaluée à travers les paramètres : indice, taux et rendement de décortiquage, taux de brisure des cotylédons, a été testée sur des graines de néré soumises aux prétraitements de cuisson, de trempage et de séchage. Les résultats expérimentaux ont révélé que la

cuisson est le traitement le mieux adapté aux graines de néré avant leur décortilage. Les meilleures performances de la décortiqueuse ont été obtenues avec les graines cuites à ébullition pendant 4h à 6h. En-deçà de cette plage de durées (moins de 4 h) de cuisson, la valeur de l'efficacité délivrée par la machine au décortilage est inférieure à celle issue du procédé traditionnel. Les traitements combinés, de séchage (2 h) et de trempage (24 h) ou de séchage (2 h) suivi de la cuisson en 1 h, ont favorisé l'amélioration de l'efficacité au décortilage. A cet effet, ces combinaisons de traitements peuvent être fortement recommandées dans la transformation de la graine de néré en afitin.

Les perspectives à cette recherche s'orientent vers les effets de l'ajout des cendres à l'eau de cuisson, une pratique ancienne des femmes transformatrices de graines de néré. On soupçonne que l'utilisation de cette substance ait certains effets bénéfiques sur la durée de cuisson des graines mais aussi sur leur décortilage. La prise en compte de la nature du bois ayant permis d'obtenir la cendre est à envisager. Cependant, une étude d'optimisation des performances de la décortiqueuse retenue s'avère indispensable sur les graines cuites en 4 h comme cela vient d'être révélé dans les résultats présentés dans ce chapitre./

CHAPITRE 4

OPTIMISATION DES PERFORMANCES TECHNIQUES DE LA DECORTIQUEUSE

4.1. Introduction

L'*afitin* diversement connu sous le nom de *Soumbala* (Burkina-Faso), *Dawadawa* (Nigéria, Ghana) ; *Iru*, *Sonru* (Bénin) ou *Netetu* (Sénégal) est obtenu après une fermentation naturelle ou spontanée des graines de néré (*Parkia biglobosa*) décortiquées et traitées. Il est largement consommé au Bénin et constitue un important supplément de protéines animales dans la ration alimentaire des familles à bas revenus. Utilisé régulièrement comme condiment dans la préparation de divers mets et sauces, l'*afitin* est un produit de large consommation. Il joue un rôle important dans l'équilibre nutritionnel des populations et constitue une importante source de protéines, d'acides aminés essentiels, d'acides gras ; de riboflavine, de thiamine et de niacine (Campbell-Platt, 1980 ; Odunfa, 1985). Il renferme environ 30 à 40 % de protéines, 10 à 15 % de lipides, 4 % de sels minéraux, des vitamines essentiellement celle du groupe B et environ 500 kcal pour 100 g de parties comestibles (Hounhouigan et al., 2001 ; Odigboh, 1979).

La chaîne de transformation traditionnelle des graines de néré en *afitin* est un processus comportant plusieurs opérations manuelles que sont : le nettoyage des graines, le triage, le lavage, la pré-cuisson des graines, le décortilage séparant le tégument des cotylédons, le rinçage, le triage, la cuisson des cotylédons, et la fermentation alcaline (Guttierrez et al., 2000). Le décortilage demeure l'opération la plus fastidieuse et la moins hygiénique (Hounhouigan et al., 2001_a ; Diawara, 1993). Il constitue la principale cause de contamination du produit fini par des impuretés d'origine minérale, ce qui favorise l'altération du produit et constitue un des facteurs limitant la consommation de l'*afitin* (Lingani-Sawadogo et al., 2003). Au Burkina Faso, parmi les procédés artisanaux de transformation des produits locaux, la chaîne de transformation des graines de néré en *afitin* est l'une des plus importantes consommatrices d'énergie ou de bois de chauffe et d'eau (Lingani-Sawadogo et al., 2003). En effet, la durée de la cuisson varie entre 15 et 25 h suivant les zones (Odigboh, 1979). Dans la sous région ouest africaine, diverses investigations sont menées ou en cours dans le souci de lever ou tout au moins d'amoindrir les contraintes liées à la transformation du néré (Marouzé, 2004 ; Traoré et al., 2004 ; Guttierrez et al., 2000 ; Adewumi and Igbeka, 1993 ; Ajayi, 1991).

Les résultats des travaux réalisés dans les chapitres 2 et 3 de ce mémoire ont permis de dégager la décortiqueuse à grilles UAC-INRAB comme la plus performante. Il y a été évalué les effets des différents types de prétraitements sur l'efficacité du décortilage mécanisé. La décortiqueuse présente les meilleures performances avec les graines cuites pendant 4 h à 6 h de temps. L'évaluation des performances de la décortiqueuse a été faite à une vitesse de rotation de la grille égale à 535 tours/mn

et un diamètre inférieur de la trémie égal à 60 mm. L'écoulement normal des graines de la trémie vers la chambre de décortilage dépend de diamètre inférieur de la trémie influençant l'alimentation régulière de la chambre de décortilage. Pendant ces essais, il est noté un mauvais écoulement des graines de la trémie vers la chambre de décortilage avec pour conséquence, une faible capacité horaire estimée à 60 kg/h. Pendant les essais, il s'était révélé nécessaire d'assurer la poussée manuelle des graines afin qu'elles puissent migrer vers la chambre de décortilage. La capacité horaire dépend aussi bien de la vitesse de rotation de la grille que du diamètre de l'ouverture inférieure de la trémie. Le présent chapitre est essentiellement consacré à l'étude des influences de deux variables opératoires révélées pertinentes, diamètre de la trémie et vitesse de la grille motrice, sur les paramètres caractérisant l'efficacité de la décortiqueuse en vue de l'optimisation de son exploitation. Il s'agit plus spécifiquement de déterminer les valeurs optimales de la vitesse de rotation de la grille et du diamètre de la trémie qui permettent d'obtenir les meilleures performances techniques de la décortiqueuse.

4.2. Matériel et Méthodes

4.2.1. Matériel

4.2.1.1. Sites de l'étude et provenance des graines

Les sites d'études et la provenance des graines décrites dans ce chapitre sont identiques à ceux décrits dans les paragraphes 3-2-1-1 et 3-2-2-2 du chapitre précédent.

4.2.1.2. Equipements d'expérimentation

❖ Brève description de la décortiqueuse

La décortiqueuse conçue, réalisée et utilisée est composée d'une partie thermomécanique et d'une partie mécanique. La première est un moteur thermique à essence de puissance 3,7 kW (5cv) avec une vitesse de rotation de l'axe du vilebrequin égale à 4000 tr/min. La partie purement mécanique est constituée d'une trémie, d'un ventilateur, de deux grilles ; l'une fixe et l'autre mobile, d'un capot, d'un cylindre, d'un bac de récupération, d'un renvoi d'angle et d'un système de transmission.

Description de ses différents organes constitutifs

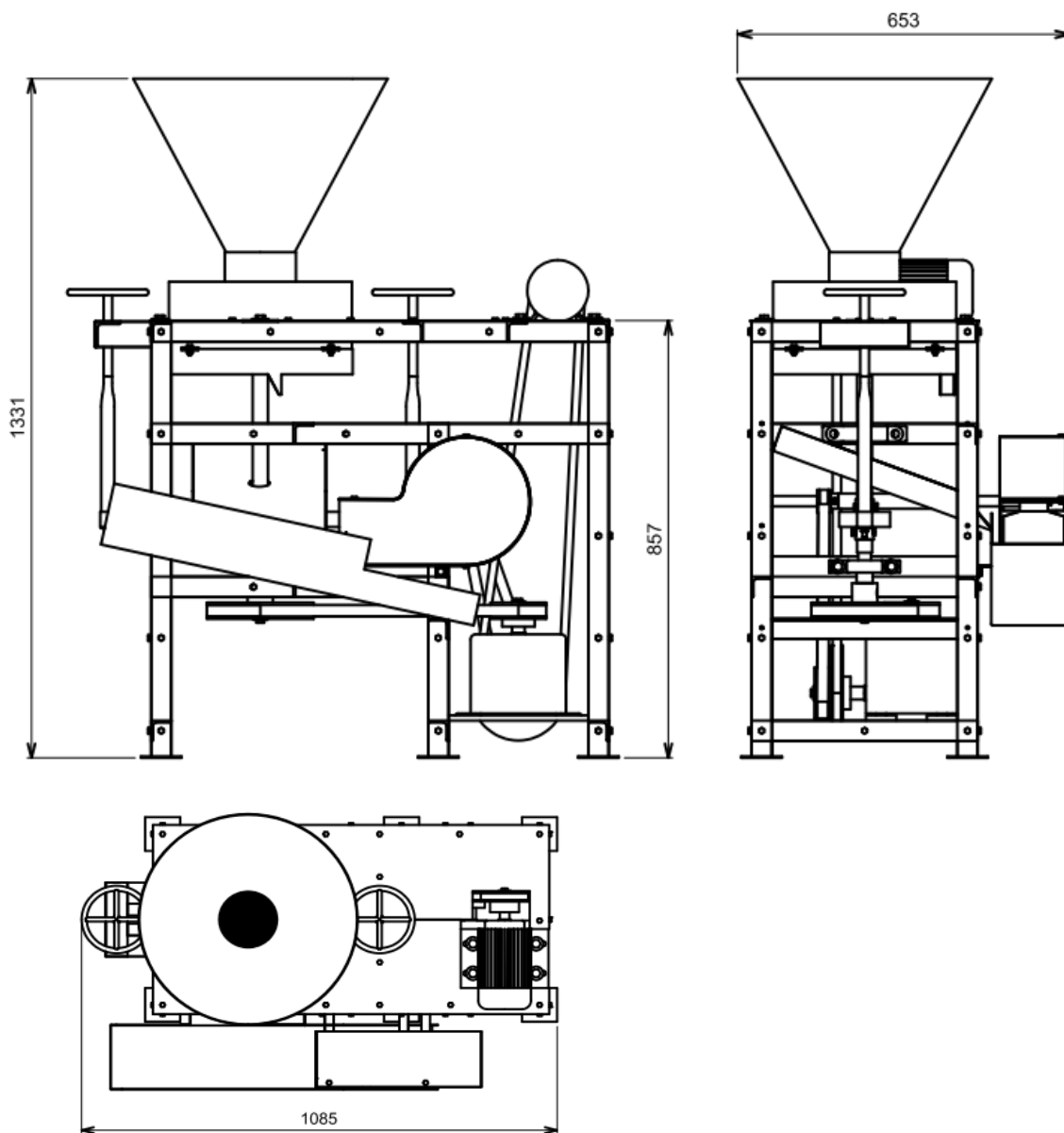
- Le bâti : il est de construction mécano-soudée réalisée à partir de cornières 40×40×3. Il supporte la machine et en assure la stabilité.
- La trémie : elle est également de construction mécano-soudée obtenue à partir de la tôle d'épaisseur 25/10. Elle reçoit les graines de néré destinées au décortilage.

- Le capot : il est de construction mécano-soudée en tôle d'épaisseur 3mm et reçoit la trémie.
- Les grilles : elles sont constituées de deux cymbales de diamètre 360 mm, en tôle d'épaisseur 1mm perforées à la pointe ; l'une statique, l'autre en rotation. Cet état leur confère un caractère abrasif propice pour assurer le décortilage.
- La chambre de décortilage : elle résulte de la construction mécano-soudée en tôle d'épaisseur 3 mm. Elle a un diamètre de 370 mm. Contenant les cymbales, elle est le siège du décortilage.
- Le bac de récupération : il est de construction mécano-soudée en tôle d'épaisseur 3 mm. Il permet aussi bien la récupération des graines que l'évacuation des déchets.
- Le ventilateur : il est réalisé en construction mécano-soudée en tôle d'épaisseur 3mm et de fers plats. Il souffle le mélange coques – cotylédons provenant du bac et, par effet de la différence de densités, provoque la séparation en éliminant ainsi les coques des cotylédons.
- Le renvoi : il est fait d'un bloc contenant un engrenage conique de rapport 1/5,25 permettant la transmission de la rotation continue entre deux arbres, d'axes concourants, dont l'un est dit arbre d'entrée et l'autre arbre de sortie.
- Le système de transmission : il est de type poulies-courroie ; il transmet et régule le mouvement issu du moteur tant, vers les disques dentés, que vers le ventilateur.
- Le système de réglage de jeux: il est constitué de deux volants solidaires chacun d'un système vis-écrou. Il permet de calibrer le jeu entre la grille fixe et la grille mobile.

Tous les organes ainsi décrits sont adéquatement et techniquement agencés à travers le plan d'assemblage de la décortiqueuse proposée et présenté à la figure 4.1.

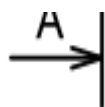
La chaîne cinématique de l'équipement résultant est présentée à la figure 4.2.

❖ Plan d'assemblage de la décortiqueuse de néré proposée



ÉCHELLE	DECORTIQUEUSE DE NERE	Roger AHOUANSOU		
9:100		DATE 15/12/2010		
	UAC/INRAB			
A4	00			00

1-2- Equipement



25	1	Courroie motrice	-	-
24	1	Moteur	acier	-
23	1	Courroie rotor	-	-
22	1	Poulie 1 réducteur	acier	-
21	1	Poulie 2 réducteur	acier	-
20	1	Réducteur	acier	-
19	1	Pales ventilateur	acier	-
18	1	Axe ventilateur	acier	-
17	1	Courroie axe ventilateur	-	-
16	1	Poulie axe ventilateur	acier	-
15	2	Palier axe ventilateur	acier	-
13	1	Poulie rotor	acier	-
12	1	Grille rotor	acier	-
11	2	Système de blocage du rotor	acier	-
10	1	Rotor	acier	-
9	2	Rit à une rangée de billes, à contact radial 30×72×19 - 6306	acier	-
8	1	Axe de réglage	acier	-
7	2	Système de réglage	acier	-
6	1	Trémie	acier	-
5	1	Grille stator	acier	-
4	1	Plateau stator	acier	-
3	1	Sortie graines	acier	-
2	1	Cage de décortiquage	acier	-
1	3	Chassis	acier	-
REPERE	NB.	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATIONS
ÉCHELLE	DECORTIQUEUSE DE NERE		Roger AHOUANSON	
8:100			DATE	
			15/12/2010	
	UAC/INRAB			
A4	00			00

Figure 4-1 : Plan d'ensemble de la décortiqueuse à grilles conçue et réalisée

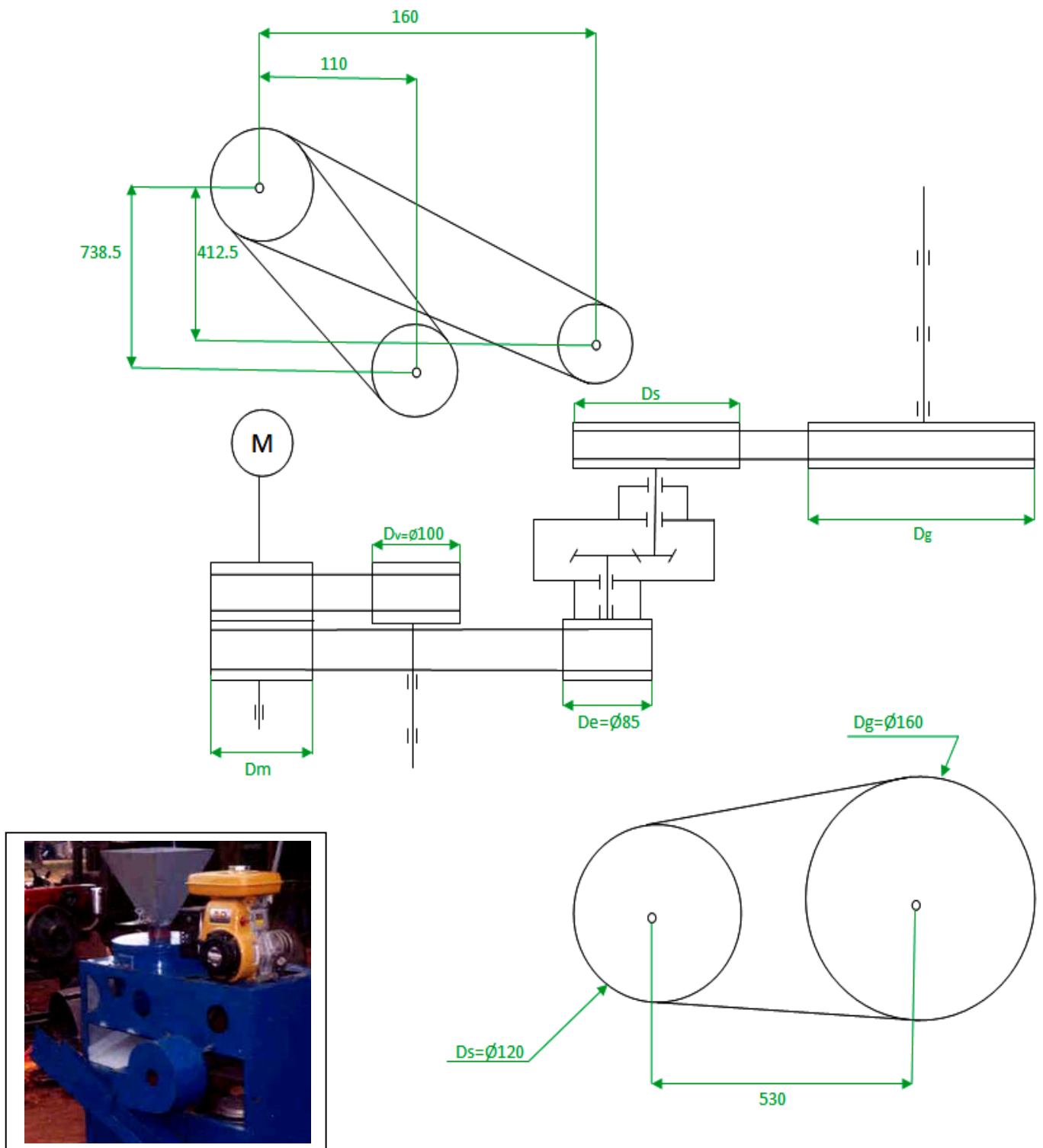


Figure 4-2: Chaîne cinématique de la décortiqueuse à grilles conçue et réalisée

4.2.2. Méthodes

4.2.2.1. Cuisson de graines à l'eau simple

Les graines trempées dans l'eau ionisée à la température de 30°C à raison de 2,5 litres d'eau par kilogramme sont chauffées au bois. La température de chauffage est portée à 100°C environ après 15 minutes et maintenue à cette température durant la cuisson. Douze lots C₁, C₂... C₁₂ de 3 kg chacun sont constitués à partir du stock. Les graines sont cuites pendant 4 h. La durée de la cuisson étant comptée à partir de l'ébullition. Chaque lot correspond à un point d'expérience donné.

4.2.2.2. Influences du jeu entre les grilles sur les valeurs théorique des Taux de décortilage et de brisure

La détermination des valeurs théoriques du Taux de décortilage et du Taux de brisure, sur les graines cuites pendant 4 heures, est basée sur les données issues des mesures de l'épaisseur de graines et des cotylédons au chapitre 2. En effet, la valeur théorique du Taux de décortilage découle de l'hypothèse selon laquelle, lorsque le jeu entre les grilles est réglé à une valeur 'a', toutes les graines (x) ayant une moitié de l'épaisseur 'μ' inférieure à 'a' seront décortiquées. Par contre, les graines (y) ayant une moitié de l'épaisseur supérieure à la valeur 'a' ne seront pas décortiquées puisqu'elles ne pourront rentrer dans l'espace entre les deux grilles. De la même façon, la valeur théorique du Taux de brisure est basée sur l'hypothèse selon laquelle, tous les cotylédons (w) ayant une moitié de l'épaisseur 'μ' supérieure à 'a' seront brisés. Par contre, les cotylédons (v), ayant la moitié de l'épaisseur inférieure à la valeur 'a', ne seront pas brisés. Un cotylédon n'est pas brisé lorsqu'il est entier ou normalement scindé en ses deux (2) demi-cotylédons. Les valeurs théoriques du Taux de décortilage (T_{dt}) et du Taux de brisure (T_{br}) sont calculées par les formules de fréquence suivantes :

$$T_{dt} = 100 [x / (x+y)] (\%) \quad (4-1)$$

$$T_{br} = 100 [v / (w+v)] (\%) \quad (4-2)$$

4.2.2.3. Effets de la vitesse de rotation de la grille motrice et du diamètre de la trémie sur les performances techniques

L'étude de l'effet de la vitesse de rotation de la grille motrice et du diamètre inférieur de la trémie sur les performances techniques de la décortiqueuse est réalisée avec les graines cuites à l'eau simple pendant 4 h. La plage des données du diamètre de la trémie sont respectivement de 60 mm, 130 mm et 200 mm et des vitesses de 535 tr/mn ; 600 tr/mn ; 756 tr/mn et 882 tr/mn. La variation de vitesses est obtenue au moyen de jeux de poulies de différents diamètres calées sur l'axe du moteur. Cette expérimentation a été

réalisée en fixant le jeu entre les grilles fixe et mobile à 4 mm. Ce jeu est fixé à partir de la détermination théorique des indicateurs de performance à partir de l'analyse des dimensions des graines. Le diamètre de la poulie, correspondant à une vitesse donnée, est calé par la formule (Sanya et al., 2009 ; Campbell-Platt, 1980 ; Ajayi, 1991):

$$D_m = (N_g D_e D_g) / (N_m R D_s) \quad (4-3)$$

avec :

- D_m : diamètre de la poulie de l'axe du moteur (mm) ;
- N_g : vitesse de rotation de l'axe de la grille mobile (tr/mn) ;
- D_e : diamètre de la poulie de l'axe d'entrée du renvoi d'angle (mm) ;
- D_g : diamètre de la poulie de l'axe de la grille mobile (mm) ;
- N_m : vitesse de rotation de l'axe du moteur (tr/mn) ;
- R : rapport de réduction du renvoi d'angle : 5,25 ;
- D_s : diamètre de la poulie de l'axe de sortie du renvoi d'angle.

La plage des diamètres de la trémie (figure 4-3) est faite par différentes trémies à base inférieure ayant le diamètre correspondant. Il en découle un plan d'expériences à douze (12) points. Chaque point expérimental est répété en six (6) fois. On utilise une prise d'échantillon de graines de masse égale à $m_e = 3$ kg par essai.

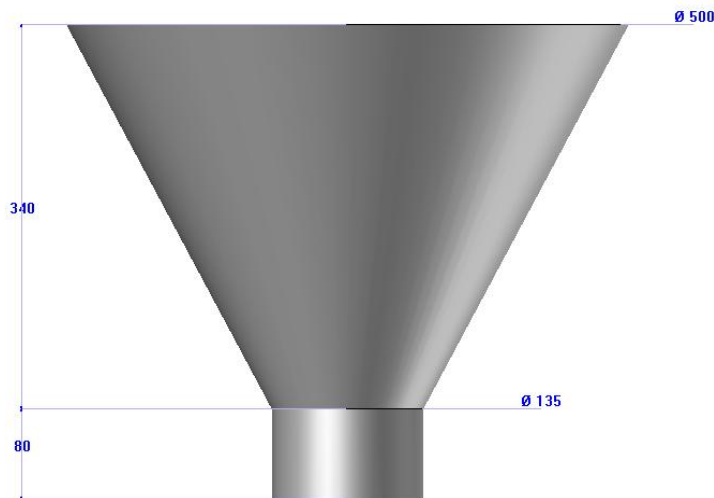


Figure 4-3 : Trémie de la décortiqueuse proposée en forme d'entonnoir

Pour chaque diamètre inférieur de la trémie (partie cylindrique), le débit d'écoulement des graines à travers cette dernière est évalué. Trois (3) kg de graines cuites à l'eau simple pendant quatre (4) heures sont versés dans chacune des trémies et le temps d'écoulement de cette quantité est mesuré. Le

débit est le rapport entre la masse (m) de graines utilisée et la durée d'écoulement (t).

$$d = m/t \text{ (kg/s)} \quad (4-4)$$

4.2.2.4. Influences du jeu entre les grilles sur les valeurs expérimentales des indicateurs de performance de la décortiqueuse

La détermination expérimentale des indicateurs de performance tels que le Taux de décortilage, le Taux de brisure, l'Indice d'efficacité et le Rendement a été effectuée sur l'équipement en utilisant des graines cuites pendant quatre (4) heures. Le jeu entre les deux grilles fixe et mobile a été varié de 2 à 25mm à intervalles de 0,5 mm. Les valeurs du diamètre de la trémie et de la vitesse de rotation sont celles obtenues à l'optimisation et fixées respectivement à 116 mm et 666 tr/mn. Les valeurs des indicateurs de performance sont calculées à l'aide des formules 4-3, 4-4, 4-5 et 4-6.

4.2.2.5. Méthode d'analyse technique

A chaque répétition, un prélèvement de $m_p=500$ grammes est réalisé. L'échantillon est séparé manuellement au laboratoire en quatre fractions qui sont pesées afin d'obtenir :

- la masse des cotylédons entiers ou éclatés en deux (m_c) ;
- la masse des graines non décortiquées ou partiellement décortiquées (m_u) ;
- la masse des cotylédons brisés (m_b) ;
- la masse des coques (m_h).

Une graine est considérée comme décortiquée si environ 90 % de la coque est enlevée (Thomson and Isaacs, 1967).

L'efficacité de la décortiqueuse est évaluée à partir des paramètres de performance suivants : Indice de décortilage (I_d), Taux de décortilage (T_d), Taux de brisure des cotylédons (T_b), le rendement au décortilage (R_d), la Capacité horaire (C_H) et le facteur d'efficacité (F_E).

Les quatre premiers paramètres ont été exprimés respectivement à l'aide des formules 3-1; 3-2 ;3-3 et 3-4 du chapitre précédent. La Capacité horaire est exprimée par la formule 4-7 (Azokpota et al., 2006_b).

la Capacité horaire (C_H) :

$$C_H = M_E / t_h \text{ (kg/h)}, \quad (4-5)$$

avec :

- M_E : masse de l'échantillon (kg) ;
- t_h : temps mis pour le décortilage (h)

L'indice de décortiquage permet de mesurer l'efficacité global de la décortiqueuse à travers la qualité du produit transformé.. Sa valeur théorique est comprise entre -1 et +1. Elle est égale à -1 dans le cas d'une brisure totale des graines et +1 dans celui où le décortiquage est parfait sans brisure et sans graines non décortiquées (Fliedel et al., 1989 ; Opoku et al., 2003). Mais elle ne prend pas en compte la rapidité du travail. Ceci est réalisé par le facteur d'efficacité. Le facteur d'efficiacité permet d'apprécier la performance totale de l'équipement. Il prend en compte les paramètres technologiques tels que le taux de brisure des amandes, le taux de concassage et le paramètre lié à la rapidité de l'équipement (capacité horaire) (Ahouansou et al., 2006_b). Il déterminé par la formule :

$$F_E = (I_c \times I_h) / 1000 \text{ (T/h)} \quad (4-6)$$

Avec I_c : l'Indice de décortiquage et C_h : la Capacité horaire (kg/h).

L'effet de la variation du diamètre de la trémie, qui n'est rien d'autre que le diamètre intérieur de la grille fixe sur les paramètres de cette dernière, est exprimé à travers celui du Diamètre utile D_u et celui de l'aire de décortiquage A_d (Figure 4-4).

$$D_u = D - d \quad (4-7)$$

$$S_u = \pi(D^2 - d^2) / 4 \quad (4-8)$$

$$= 101736 - 0,785 d^2$$

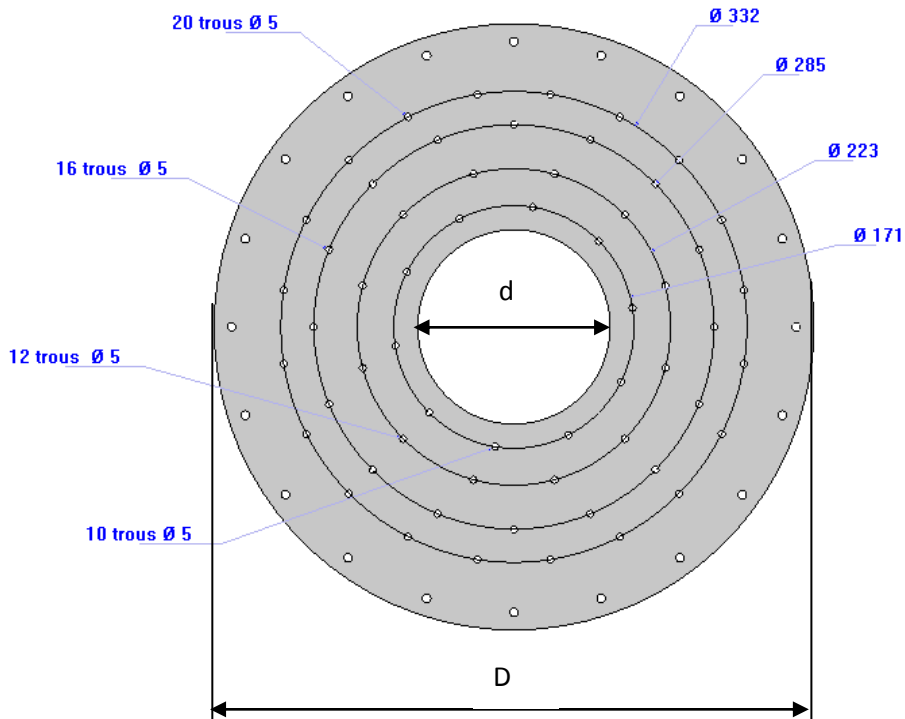


Figure 4-4 : Grille fixe de la décortiqueuse

4.2.2.6. Estimation des valeurs limites et de référence des paramètres de performances

Une enquête a été réalisée auprès de trente (30) productrices d'*afitin* choisies de façon aléatoire et réparties comme suit : 9 productrices résidant dans la ville de Porto-Novo, 5 à Avrankou, 2 à Banigbé, 2 à Sakété, 2 à Dangbo et 10 à Abomey. La production et la vente de l'*afitin* constituent l'activité principale de ces productrices enquêtées.

❖ Détermination de l'indicateur du taux de brisure

Des échantillons de cotylédons, ayant des Taux de brisure respectivement de 0 %, 5 %, 10 %, 20 % et 25%, ont été soumis à l'appréciation des personnes interrogées. Ces dernières ont chacune indiqué les échantillons acceptables par elles et les raisons de leur choix.

Pour constituer chaque échantillon, il a été ajouté, à 150 g de cotylédons entiers ou divisés en deux, des quantités déterminées d'amandes brisées de manière à obtenir les taux de brisure respectifs cités ci-dessus. La masse de cotylédons brisés, à ajouter pour obtenir le taux de brisure correspondant, est déterminée à partir de la formule (4-5).

❖ Détermination du taux de décortilage

Neuf (09) différents échantillons, de taux de décortilage respectifs de 100 %, 95 %, 90 %, 85 %, 80 %, 75 %, 70 %, 65 % et 60 %, ont été soumis à l'appréciation des personnes interrogées. Ces dernières ont indiqué les échantillons qui leur paraissent acceptables pour caractériser la bonne performance de la décortiqueuse motorisée. Pour constituer chacun de ces échantillons, il a été ajouté 65 g de coques et des quantités de graines non décortiquées à 150 g de cotylédons, de manière à obtenir les échantillons ayant les taux de décortilage cités. La masse de graines non décortiquées rajoutée à chaque fois est obtenue à partir de la formule (4-4).

❖ Détermination de l'indice de décortilage

Dix (10) différents échantillons, ayant chacun un Indice de décortilage respectivement de 1 ; 0,95 ; 0,90 ; 0,85 ; 0,80 ; 0,75 ; 0,70 ; 0,65 ; 0,60 et 0,55, ont été présentés à l'appréciation des personnes retenues pour le sondage.

Pour constituer chaque échantillon, il a été ajouté, à 150 g de cotylédons, 65 g de coques et des quantités déterminées de graines non décortiquées et de cotylédons brisés, de manière à former les échantillons ayant les Indices de décortilage cités.

En tenant compte de leurs expériences dans l'activité, les personnes interrogées ont indiqué les échantillons qui affichent les bons Indices de décortilage marquant ainsi une bonne performance de

la décortiqueuse motorisée. Les masses de graines non décortiquées et de cotylédons brisés rajoutées pour obtenir les Indices de décortilage correspondants sont calculées à partir de la formule (4-3).

❖ Détermination des valeurs du Rendement au décortilage

Cent cinquante (150) grammes de graines cuites, décortiquées manuellement, permettent d'obtenir une quantité déterminée de cotylédons. La quantité de cotylédons obtenue à partir de 150 g a été réduite progressivement de manière à constituer des échantillons donnant des rendements de valeurs respectives 70 %, 60 %, 50 %, 40 % et 30 %. Les personnes interrogées ont indiqué les échantillons qui affichent le bon Rendement au décortilage. La masse de cotylédons brisés rajoutée, pour aboutir à chacun des Rendements ainsi considérés, est déterminée à partir de la formule (3-4).

❖ Détermination de l'indicateur de la capacité horaire

La détermination de la capacité horaire a été effectuée sur la base d'un questionnaire dans lequel les personnes interrogées ont indiqué le nombre de bassines de 40 kg de graines cuites que l'équipement doit pouvoir décortiquer à l'heure afin que sa rapidité soit jugée satisfaisante en ce qui les concerne. Pour chaque paramètre, les échantillons ayant obtenu les scores les plus élevés déterminent les valeurs limites de cet indicateur. La valeur de référence est celle obtenue expérimentalement par la méthode traditionnelle du foulage aux pieds. Pour le paramètre de la Capacité horaire, la valeur de référence est celle utilisée dans les calculs de conception de l'équipement.

4.2.2.7. Analyse expérimentale des paramètres optimisés

L'optimisation permet d'obtenir les valeurs optimales des variables (vitesse et diamètre) et celles des paramètres de performance correspondants. Un test est réalisé en fixant les valeurs consignées au niveau de l'équipement sur les variables théoriques obtenus. Les paramètres de performance sont déterminés expérimentalement et ensuite comparés aux précédentes valeurs théoriques.

Les conditions expérimentales sont semblables à celles décrites au paragraphe 4-2-2-3.

4.3. Analyses statistiques

Le traitement des données est exécuté sous STATGRAPHICS Plus 5.1 et MINITAB, tous deux logiciels d'analyses statistiques adaptés à ce genre de problème. Leurs avantages résident dans le fait qu'ils permettent d'analyser aussi bien, l'influence isolée des variables étudiées (vitesse et diamètre), que celle émanant de leurs interactions, et en un nombre réduit d'essais, donc de coût. On peut y générer une procédure d'optimisation à variable multiple fournissant les valeurs optimisées, aussi

bien des paramètres opératoires (variables d'entrée), que celles des caractéristiques de performance recherchées (réponses).

La présentation des résultats et l'analyse des effets provoqués par les interactions entre les variables étudiées (Diamètre et Vitesse), sur l'évolution des paramètres retenus pour évaluer l'efficacité de la machine, sont faites au moyen des surfaces de réponse. Le niveau de confiance adopté est de 95 %, valeur classiquement adoptée dans les analyses statistiques des données et affichée avec délimitation en trait interrompu sur les graphiques d'effets isolés de PARETO. La comparaison des valeurs optimales théoriques aux valeurs expérimentales a été réalisée à l'aide du test de conformité d'une moyenne (Singbo and Ahouansou, 2005 ; Adégbola et al., 2003).

4.4. Résultats et discussion

4.4.1. Influences du diamètre inférieur sur le diamètre utile, l'aire de décortiquage et le débit

La figure 4.5 présente l'évolution du diamètre utile de la grille de décortiquage en fonction du diamètre de la base cylindrique de la trémie (Figure 4.3), l'un des facteurs d'optimisation.

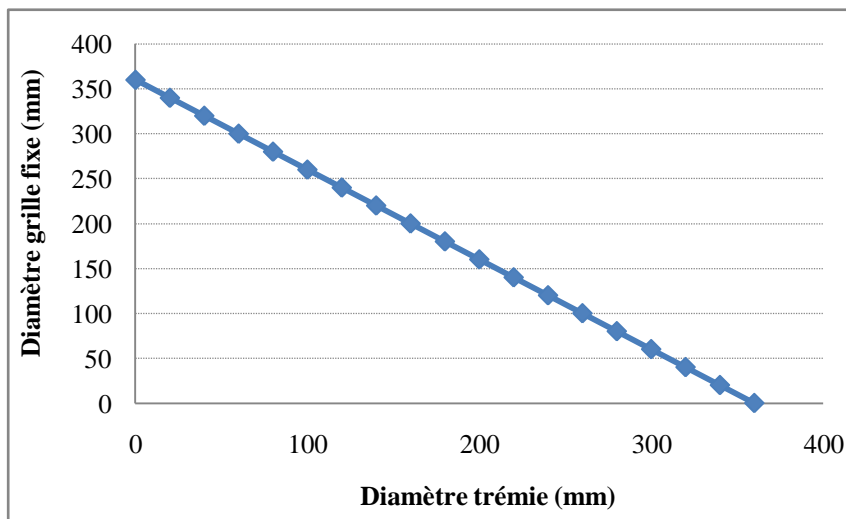


Figure 4-5. Evolution du diamètre de la grille fixe en fonction diamètre de l'ouverture inférieure de la trémie

Le système de décortiquage est composé de deux (2) grilles de forme circulaire : l'une fixe et l'autre mobile. La grille fixe est perforée, à son centre, d'une ouverture dont le diamètre est égal à celui inférieur de la trémie (Figure 4.3). C'est cette ouverture qui détermine le degré d'écoulement des graines de la trémie vers l'espace aménagé entre les deux (2) grilles, site effectif du décortiquage par abrasion. La variation du diamètre de la trémie entraîne alors le changement du diamètre intérieur de

la grille fixe et, par conséquent, celui de la partie active effectuant le décortiquage. L'augmentation du diamètre de la trémie, telle qu'elle est opérée dans le cadre de l'optimisation, entraîne la baisse du diamètre utile de la grille fixe, donc éventuellement, de l'efficacité du décortiquage. Cela est la conséquence de la baisse que subit la surface de décortiquage telle qu'illustrée par la représentation graphique de la figure 4-6.

La figure 4-6 montre l'évolution Aire de la grille fixe en fonction diamètre de la trémie. L'analyse des résultats de la figure 4-6 montre que lorsque le diamètre de la trémie, varie de 0 à 360 mm, le diamètre intérieur de la grille fixe change dans la même proportion et l'aire de la surface de décortiquage décroît de 101736 à 0 mm². Ces deux valeurs sont de ce fait des limites asymptotiques à ne pas atteindre dans le cadre du décortiquage. En effet, lorsque l'aire de la grille fixe est égale à 101736 mm², le diamètre inférieur de la trémie est théoriquement nul, c'est dire qu'aucune graine ne peut être introduite dans la chambre de décortiquage dans ce cas. Dans le second cas, le décortiquage est quasi impossible puisque la surface de décortiquage est nulle, donc inexistante. Il s'agira, à travers la procédure d'optimisation, de trouver la valeur moyenne du diamètre de la trémie qui favorise les meilleures performances techniques de l'équipement.

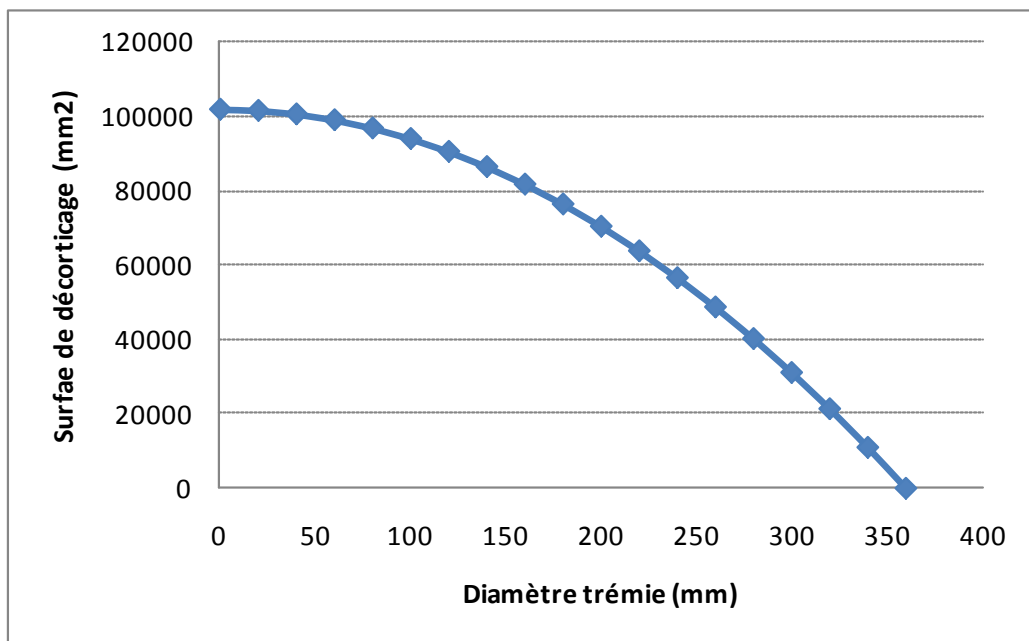


Figure 4-6. Evolution de l'aire de la grille fixe en fonction diamètre de la trémie

La figure 4-7 montre l'évolution du débit d'écoulement en fonction du diamètre inférieur de la trémie. Lorsque le diamètre de cette dernière croît de 0 à 200 mm, le débit d'écoulement de la graine croît de 0 à 114 kg/s, soit 6840 kg/h déterminant ainsi la variation de la capacité horaire de l'équipement.

Parallèlement, cette croissance de débit coïncide avec la baisse de la surface de décortiquage, donc certainement de l'efficacité technique. Le modèle mathématique, capable de décrire convenablement l'évolution du débit en fonction du diamètre de la trémie, est donné par l'équation de la tendance :

$$D_e = 0,0027d^2 - 0,0007d + 3,9523 \quad (4-9)$$

le coefficient de corrélation étant égal à $R^2 = 0,96$.

D_e le débit d'écoulement des graines dans la trémie (kg/s), d le diamètre inférieur de la trémie (mm).

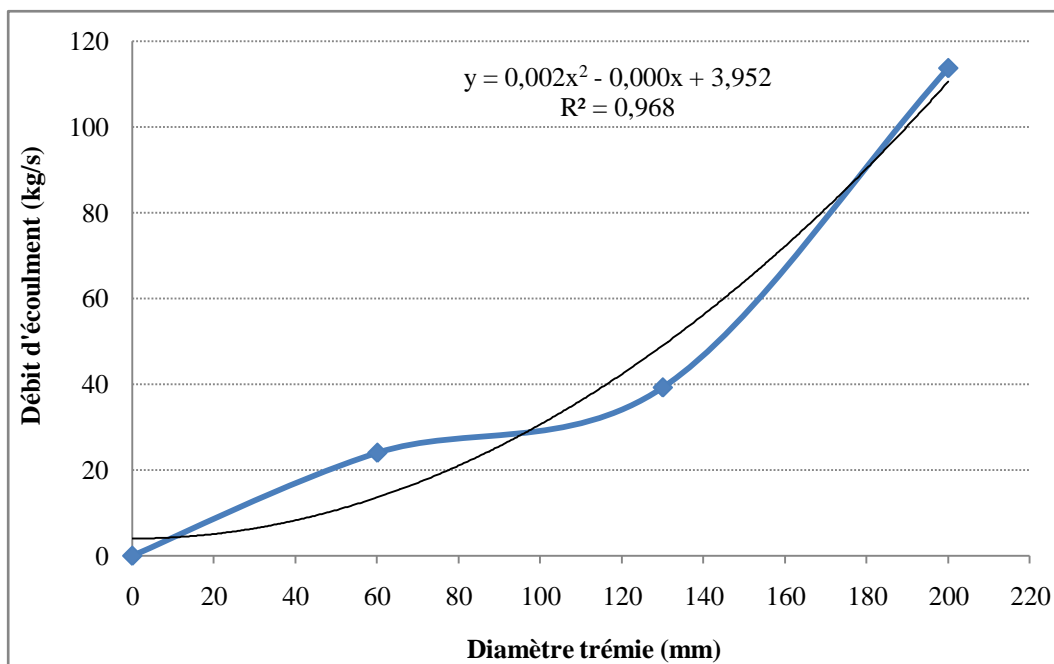


Figure 4-7. Effets du diamètre de la trémie sur le débit d'écoulement

4.4.2. Valeurs limites et celles de référence des paramètres de performance de la machine

Les résultats de l'enquête auprès des transformatrices, illustrés par les valeurs du tableau 4-1, ont montré que la valeur idéale pour l'Indice de décortiquage est de 1. A cette valeur, toutes les graines sont décortiquées et aucun cotylédon n'est brisé. Par contre, la valeur minimale acceptable de ce paramètre est 0,85.

La majorité des personnes interrogées estime que lorsque l'Indice de décortiquage est inférieur à cette valeur, alors le décortiquage délivre beaucoup de graines non décortiquées et de cotylédons brisés. Un équipement donnant ces caractéristiques n'est pas susceptible de lever les contraintes liées à

l'efficacité et à la pénibilité du décortilage. La valeur de référence est celle obtenue à partir du décortilage par foulage aux pieds. Un équipement donnant un Indice de décortilage proche de 0,93 sera accepté par les transformatrices interrogées.

Le Taux de décortilage demeure l'un des paramètres de référence de l'activité de décortilage. La majorité des transformatrices estiment que le décortilage est parfait lorsque la totalité des graines sont décortiquées (100 %). Pour elles, la valeur minimale du Taux de décortilage admissible est de 90 % : c'est la condition pour ne pas accumuler beaucoup de pertes mais plutôt de pouvoir rentabiliser l'activité. Dans la pratique, les graines non décortiquées par foulage sont recuites et foulées à nouveau.

Tableau 4.1. Valeurs limites et valeurs de références des paramètres de performance techniques de la décortiqueuse

Désignation	Valeur minimale admise	Valeur de référence	Valeur maximale admise	Score (%)
Indice décortilage	0,85	0,93	1	90,04
Taux décortilage (%)	90	95	100	91
Taux brisure (%)	0	5	10	89,4
Rendement décortilage (%)	40	48	60	78,6
Capacité horaire (kg/h)	500	800	1000	75
Facteur d'efficacité (kg/h)	425	744	1000	-----

Le Taux de brisure est un paramètre déterminant, caractéristique de l'activité de décortilage. De l'avis des transformatrices, sa particularité réside dans le fait qu'il occupe une place très importante dans les exigences du consommateur. En effet, le consommateur recherche dans l'afitin traditionnel des cotylédons entiers, soulignent-elles. Aussi, estiment-elles que lorsque le Taux de brisure est élevé, beaucoup de pertes sont enregistrées pendant la phase de triage dans le bain de terre de barre. Elles justifient ces pertes par le fait que les cotylédons brisés se mélangent à de la boue et à la coque et, par conséquent, sont difficiles à récupérer. Par contre, les cotylédons entiers surnagent le bain et sont facilement récupérés à l'aide d'un panier. Pour la majorité d'entre elles, un Taux de brisure compris entre 0 et 10 % est jugé acceptable. La valeur référence de ce paramètre est égale à 5 %.

Le rendement au décortilage est admis dans les limites de 40 à 60 % par la majorité des transformatrices (78,6 %). Elles estiment que si les exigences liées aux valeurs limites du Taux de décortilage et du Taux de brisure sont respectées, il est possible de rester dans ces limites. Un décortilage donnant un rendement inférieur à 40 % occasionne à la transformatrice beaucoup de manque à gagner.

Elles sont très exigeantes sur ce paramètre surtout en période de cherté des graines de néré (90000 F CFA le sac de 100 kg contre 45000 FCFA habituellement). La valeur de référence du décortilage traditionnel est de 48 %. L'introduction d'un équipement pour améliorer la méthode traditionnelle vise entre autre la réduction de la pénibilité du travail et l'augmentation de la productivité du travail. Tout comme les moulins à maïs et à condiment, une décortiqueuse de néré, pour être rentable doit être introduit en prestation de service. Elle doit avoir une capacité conséquente pour traite la production du groupement et du village. Ces considérations ont motivé les personnes interrogées à choisir les valeurs limites de la capacité entre 500 kg/h à 1200 kg/h soit 12,5 à 30 bassines de 40 kg.

4.4.3. Résultats d'analyse du jeu entre les grilles et les valeurs théoriques du Taux de décortilage et du Taux de brisure

La figure 4.8 présente les résultats d'étude de l'influence du jeu théorique entre les grilles mobile et fixe sur les taux de décortilage et de brisure.

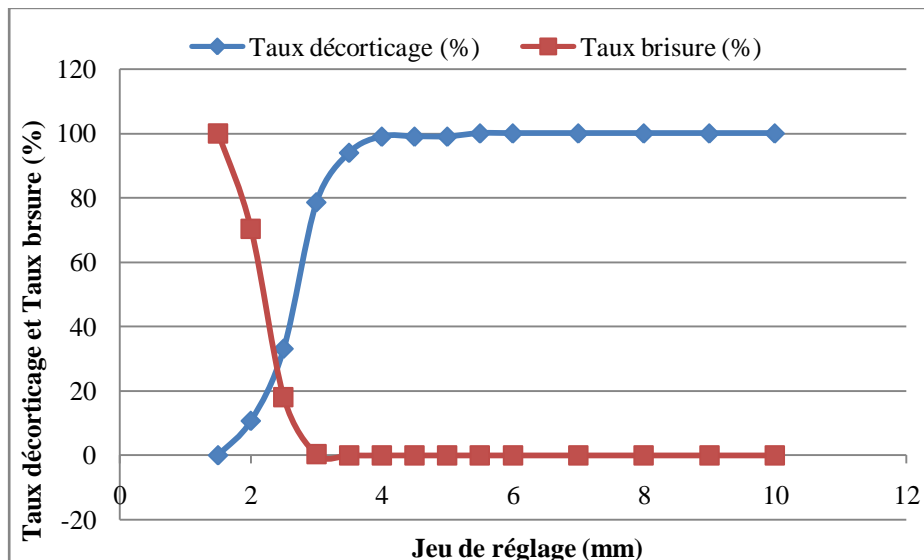


Figure 4-8. Effets du jeu entre les grilles sur les valeurs théoriques du Taux de décortilage et du Taux de brisure

L'analyse des résultats de la figure 4-8 montre que, lorsque le jeu de réglage entre les grilles croît de 1,5 à 11 mm, les valeurs théoriques du Taux de décortilage croissent de 0 à 100 %. Par contre, le Taux de brisure décroît de 100 % à 0 %. Les conditions technologiques imposent un Taux de décortilage compris entre 90 et 100 % et un Taux de brisure entre 0 et 10 % (tableau 4-1).

Un jeu entre les grilles compris entre 3,5 et 11 mm permet théoriquement d'obtenir les valeurs limites recommandées. Toutefois, ces valeurs sont déterminées à partir de la fréquence de l'épaisseur des graines. Elles ne tiennent pas compte de l'effet des frottements et des chocs subis par la graine au cours du décortilage. La prise en compte de ces facteurs pourrait entraîner les écarts entre les valeurs théoriques et les valeurs réelles. L'étude expérimentale permettra de déterminer l'étendue de cet écart. Aussi, le comportement technique de la décortiqueuse lorsque le jeu de réglage est supérieure à 11 mm n'est pas connu. L'expérimentation permettra d'obtenir des précisions sur cet aspect. L'analyse et l'optimisation des différents paramètres dans les paragraphes ci-dessous est fait avec un jeu de réglage fixé à 6 mm.

4.4.4. Analyse et optimisation de l'Indice d'efficacité

La figure 4-9 présente les résultats, en termes de surface de réponses, de l'indice de décortilage soumis aux actions conjuguées du diamètre de la trémie et de la vitesse de rotation de la grille.

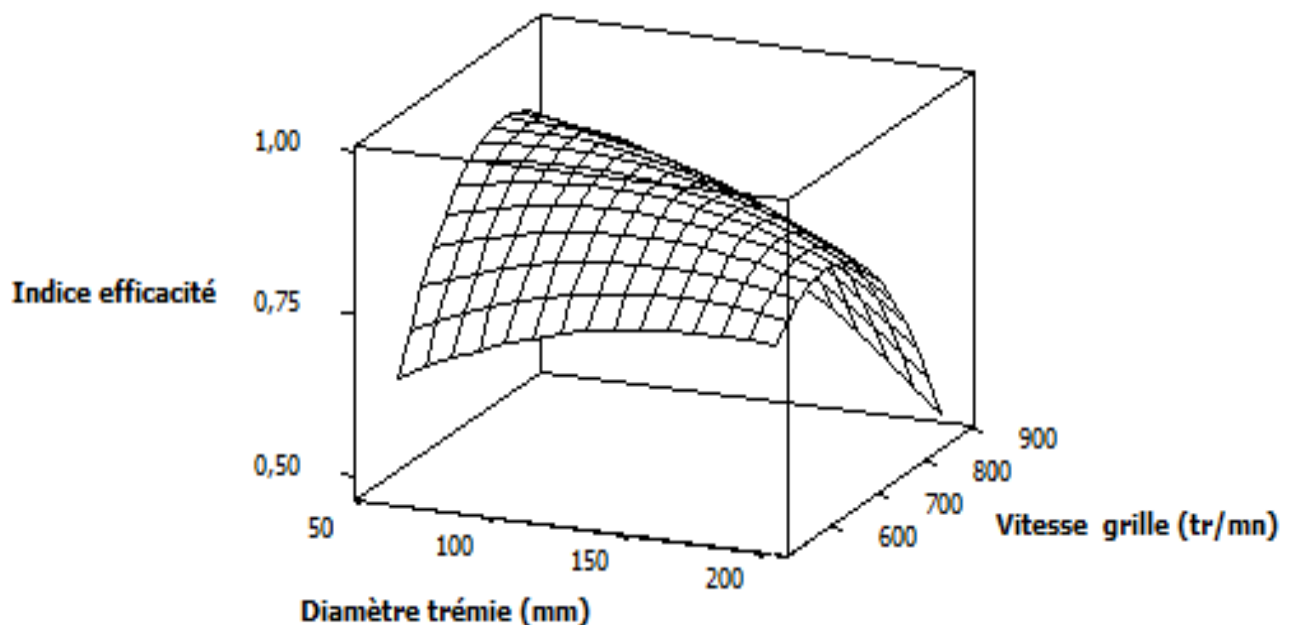


Figure 4-9. Surface de réponses des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur l'Indice de décortilage

L'analyse des effets des interactions entre le diamètre de la trémie de 60 à 200 mm et la vitesse de rotation de la grille de 535 à 855 tr/mn montre qu'elles entraînent une variation de l'indice de décortilage de 0,55 à 0,95. La valeur minimale de l'indice est obtenue lorsque le diamètre est égal à 200 mm et la vitesse égale à 855 tr/mn alors que celle maximale est atteinte lorsque ces facteurs prennent respectivement les valeurs 130 mm et 756 tr/mn. Ces résultats s'expliquent par le fait que lorsque le diamètre de la trémie augmente, la surface de décortilage diminue, réduisant ainsi l'efficacité du décortilage.

La valeur optimisée de l'Indice de décortilage, au détriment des autres paramètres, est égale à 0,93. A cette valeur, le diamètre de la trémie est égal à 60 mm et la vitesse de rotation égale à 783,8 tr/mn. L'indice optimal (0,93) ainsi obtenu reste néanmoins assez proche de celui exprimant le décortilage parfait (valeur +1). Les résultats des essais effectués (Figure 4-10) ont montré que l'augmentation de la vitesse de la grille décortiqueuse, quoique n'ayant pas d'effet statistiquement significatif (à 95 %), affecte néanmoins positivement (+) l'indice de décortilage.

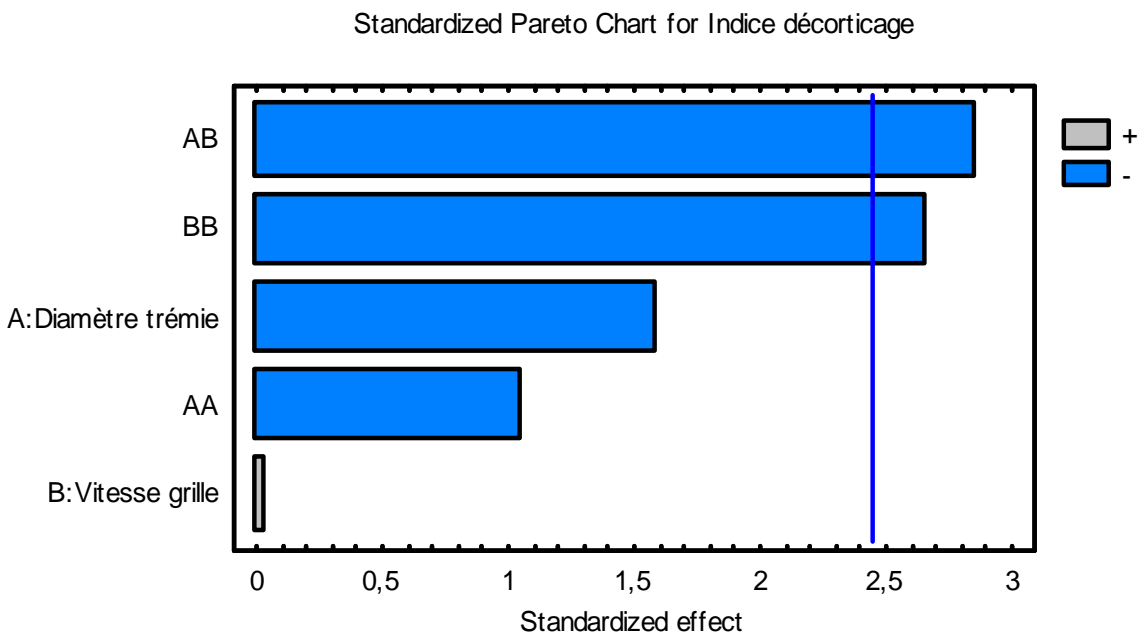


Figure 4-10. Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées sur l'indice de décortilage

Le diamètre de la trémie d'alimentation en graines a une influence appréciable sur l'indice bien que n'étant pas statistiquement significatif ; mais la tendance enregistrée pour ce facteur s'avère plutôt négative (-) donc réductrice de l'Indice de décortilage. Ceci s'explique par le fait l'augmentation du diamètre de la trémie entraîne la réduction de la surface de décortilage (Figure 4-6) et, par

conséquent, de l'efficacité du décortilage. Avec cet équipement, par contre, la variation simultanée des deux facteurs a un effet significatif au seuil de 5 % sur l'indice de décortilage. Ces mêmes résultats sont observés dans le cadre de la décortiqueuse à cylindre (Audu et al., 2004). Les auteurs indiquent que l'accroissement de la vitesse de rotation du tambour et de sa longueur entraîne l'augmentation de l'indice d'efficacité.

Le modèle de régression linéaire, fixant adéquatement les valeurs acquises, a pour équation :

$$I_d = 0,84819 - 0,00055d + 0,00001N \text{ avec ;} \quad (4-10)$$

- N : la vitesse de rotation de la grille (tr/mn) :
- d: le diamètre inférieur de la trémie (mm)

le coefficient de corrélation égal à $R^2 = 0,96$.

4.4.5. Analyse et optimisation du Taux de décortilage

La figure 4-11 affiche les réponses du paramètre caractéristique Taux de décortilage aux actions conjuguées du diamètre de la trémie et de la vitesse de rotation de la grille.

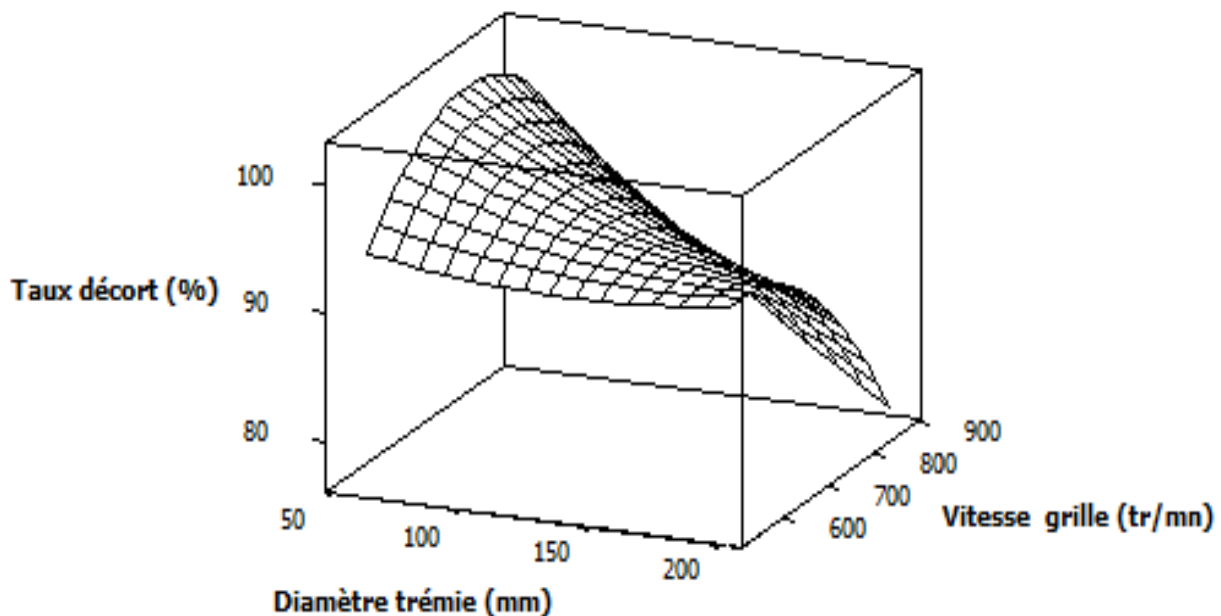


Figure 4-11. Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur le Taux de décortilage

On observe effectivement que lorsqu'on fait varier le diamètre de la trémie de 60 à 200 mm et la

vitesse de rotation de la grille de 535 à 855 tr/mn, le Taux de décortilage évolue entre 78,56 et 99,09 %. La valeur minimale du Taux de décortilage est obtenue lorsque le diamètre est égal à 200 mm et la vitesse égale à 855 tr/mn et celle maximale lorsque ces facteurs sont respectivement égaux à 200 mm et 534 tr/mn. La valeur optimisée du Taux de décortilage au détriment des autres paramètres est égale à 95 %. A cette valeur, le diamètre de la trémie est égal à 130 mm et la vitesse de rotation égale à 703,5 tr/mn. Le Taux optimal (95 %) ainsi obtenu reste néanmoins assez proche de celui exprimant le décortilage parfait égal à 100 %. Il importe de souligner que le même équipement testé avec les graines sèches présente les valeurs optimales du taux de décortilage égal à 70,30 % lorsque la vitesse de rotation est égale à 542 tr/mn (Sanya et al., 2009).

Les investigations relatives au décortilage du sorgho, ont montré des résultats analogues en relevant que les meilleurs taux provenaient des valeurs de vitesses de décortilage relativement comprises entre 600 et 1100 tr/min (Hucl et al., 2001).

L'analyse du graphique de la figure 4-12 ci-dessous montre en effet que le diamètre de la trémie a un effet significatif au seuil de 5 % sur le taux de décortilage. Mais son augmentation entraîne la diminution du Taux de décortilage. En effet, l'augmentation du diamètre de la trémie entraîne la baisse de la surface de décortilage. La même tendance est observée lors de la variation de la vitesse de rotation de la grille qui, par contre, n'a pas d'effet significatif sur le taux de décortilage. De même, les actions conjuguées des deux facteurs n'ont pas produit d'effets significatifs sur le taux de décortilage.

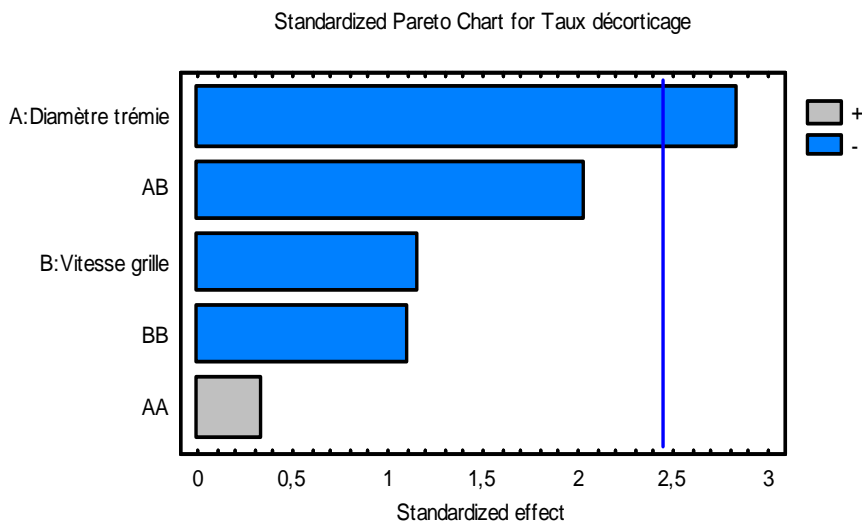


Figure 4-12. Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées sur le Taux de décortilage.

Un autre facteur, qui détermine la valeur du taux de décortage, reste la qualité du réglage du jeu entre les grilles, site effectif de décortage. Dans le cadre de la présente étude, ce jeu est fixé à 4,5 mm pour tenir compte de l'épaisseur moyenne des cotylédons qui vaut 4,89 mm. Si le jeu est trop grand i.e. plus élevé que cette valeur de l'épaisseur moyenne, le taux de décortage sera faible.

Le modèle de régression linéaire fixant adéquatement les données acquises concernant le Taux de décortage en fonction de la vitesse des grilles et le débit de graines a pour équation :

$$T_d = 111,2790 - 0,0069d - 0,0130N \quad (4-13)$$

Avec T_d : le Taux de décortage (%) et N : la vitesse de rotation (tr/mn).

Le coefficient de corrélation R^2 est égal à $R^2 = 43,12 \%$

4.4.6. Analyse et optimisation du Taux de brisure des cotylédons

Le taux de brisure des cotylédons est une caractéristique très importante utilisée dans l'appréciation de l'efficacité de la décortiqueuse. Plus ce taux est faible, meilleure est l'efficacité de la décortiqueuse, notamment à délivrer des cotylédons entiers. Car c'est là aussi, un aspect qui participe de la qualité du produit final, sous l'angle des modes de présentations de l'afitin. En effet, dans certaines régions consommatrices de ce produit, l'entièreté du cotylédon est préférée ou tout au moins la présence de cotylédons entiers, en bonne partie dans le produit, constitue un critère incontournable pour son acceptation. La figure 4-13 présente les réponses du paramètre de performance Taux de brisure sous les actions conjuguées du diamètre de la trémie et de la vitesse de rotation de la grille motrice.

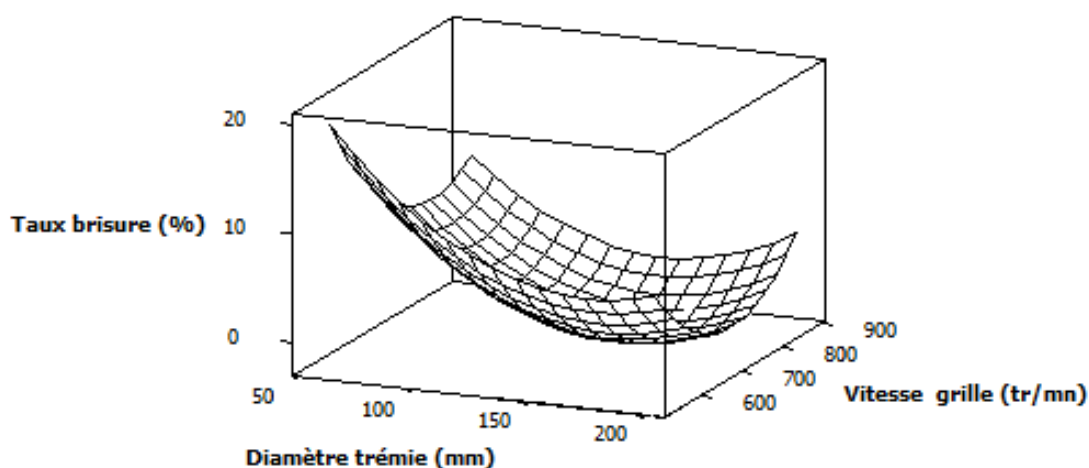


Figure 4-13. Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur le Taux de brisure des cotylédons

Lorsque le diamètre de la trémie et la vitesse de rotation de la grille varient simultanément de 60 à 200 mm et de 535 à 855 tr/mn respectivement, le Taux de brisure passe de 0,5 à 19,32 %. La valeur minimale du Taux de brisure est obtenue lorsque le diamètre est égal à 200 mm et la vitesse égale à 756 tr/mn et celle maximale lorsque ces facteurs sont respectivement de 60 mm et 607 tr/mn. La valeur optimisée du Taux de brisure, au détriment des autres paramètres, est égale à 5 %. A cette valeur, le diamètre de la trémie est égal à 104,4 mm et la vitesse de rotation égale à 618 tr/mn. Le Taux optimal (5 %) ainsi obtenu reste assez proche de celui de référence exprimant le taux de brisure parfait égal à 0 %.

L'analyse du graphique 4-14 permet de conclure que le diamètre de la trémie imprime un effet significatif au seuil de 5 % sur le taux de brisure des cotylédons, tout comme celui obtenu pour le Taux de décortiquage. On observe que l'augmentation du diamètre de la trémie entraîne la diminution du Taux de brisure. La même tendance est observée lors de la variation de la vitesse de rotation de la grille, sauf que l'effet provoqué par cette dernière sur le taux de brisure n'est pas statistiquement significatif au seuil de 5 %. Aussi, les interactions entre les deux facteurs n'ont-elles pas d'effet significatif sur le taux de brisure des cotylédons ! Néanmoins, une tendance à l'influence positive semble se dessiner sur ce paramètre.

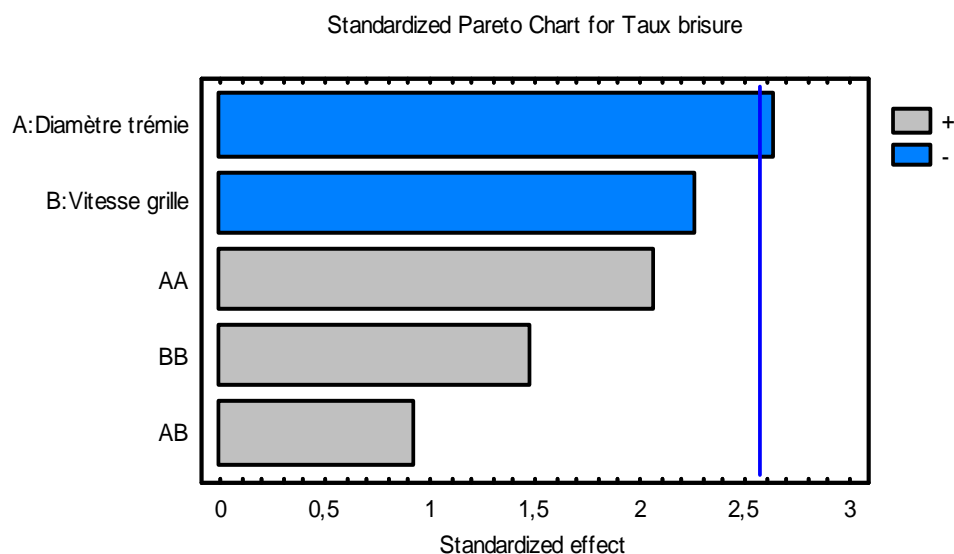


Figure 4-14. Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées sur le Taux de brisure des cotylédons

Un autre facteur qui détermine la valeur du taux de décortage demeure la qualité du réglage du jeu entre les grilles fixe et mobile. Dans le cadre de cette étude, ce jeu est fixé à 4,5 mm.

Le modèle de régression linéaire, fixant adéquatement les données acquises concernant le Taux de brisure (T_b), a pour équation :

$$T_b = 30,1613 - 0,0637d - 0,0227N \quad (4-14)$$

le coefficient de corrélation étant égal à $R^2 = 52,81\%$

4.4.7. Analyse et optimisation du Rendement au décortage

Les réponses du paramètre caractéristique Rendement au décortage à la variation simultanée du diamètre de la trémie et de la vitesse de rotation de la grille sont illustrées sur la figure 4-15.

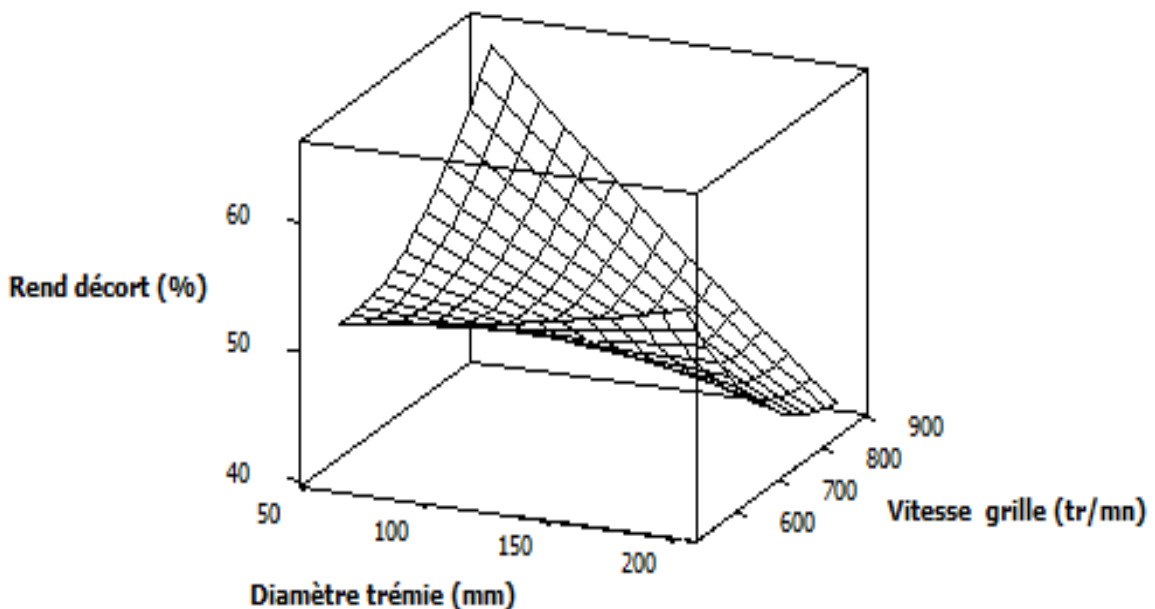


Figure 4-15. Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur le Rendement au décortage

On note que lorsque le diamètre de la trémie et la vitesse de rotation de la grille varient simultanément dans les proportions indiquées dans les paragraphes précédents, le Rendement au décortage obtenu avec l'équipement passe de 40,79 à 65 %. La valeur minimale du Rendement au décortage est obtenue lorsque le diamètre est égal à 200 mm et la vitesse égale à 855 tr/mn. Celle maximale est atteinte lorsque celles des variables étudiées sont respectivement égales à 60 mm et 855 tr/mn. La valeur optimisée du Rendement au décortage, au détriment des autres paramètres, est égale à 48 %. A cette valeur, le diamètre de la trémie est égal à 199 mm et la vitesse de rotation égale à 652 tr/mn.

Le Rendement au décortilage optimal (48 %) ainsi obtenu reste assez proche voire égal à celui de référence exprimé par le décortilage traditionnel qui est de 48 %.

L'analyse du graphique de PARETO illustré sur la figure 4-16 montre que le diamètre de la trémie exerce un effet statistiquement significatif au seuil de 5 % sur le rendement au décortilage. On doit toutefois souligner que l'augmentation de ce diamètre entraîne la réduction de ce rendement. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation de ce facteur entraîne la baisse du diamètre utile de la grille de décortilage (figure 4-5) et de la surface de décortilage (figure 4-6). Parallèlement, on assiste à l'augmentation du débit d'alimentation (figure 4-7).

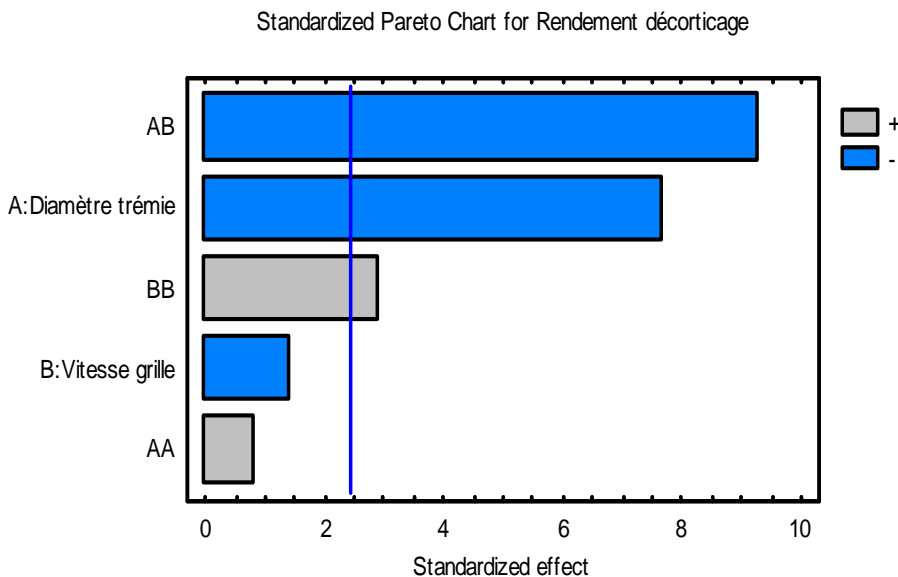


Figure 4-16. Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées (Vitesse et Débit) et leurs interactions sur le Rendement au décortilage

La vitesse de la grille, quant à elle, n'a pas d'effet significatif sur le Rendement au décortilage ; le graphique de PARETO indique que son augmentation entraîne la diminution des valeurs de ce paramètre. La variation simultanée du diamètre de la trémie et la vitesse de rotation de la grille a un effet significatif au seuil de 5% sur le rendement. Le modèle de régression linéaire, fixant adéquatement les données acquises concernant le Rendement au décortilage (R_d), a pour équation :

$$R_d = 63,8056 - 0,0601d - 0,0057N \quad (4-15)$$

avec un coefficient de corrélation égal à $R^2 = 34,5\%$

4.4.8. Analyse et optimisation de la Capacité horaire

La figure 4-17 présente les réponses du paramètre de performance Capacité horaire aux actions conjuguées du diamètre de la trémie et de la vitesse de rotation de la grille. Elle permet de retenir que lorsque le diamètre de la trémie et la vitesse de rotation de la grille varient simultanément de 60 à 200 mm et de 535 à 855 tr/mn respectivement, la capacité horaire de la décortiqueuse varie de 40 à 1172,6 kg/h. La valeur minimale de ce paramètre est obtenue lorsque le diamètre est égal à 60 mm et la vitesse égale à 535 tr/mn et celle maximale lorsque ces variables affichent les valeurs respectivement égales à 130 mm et 855 tr/mn.

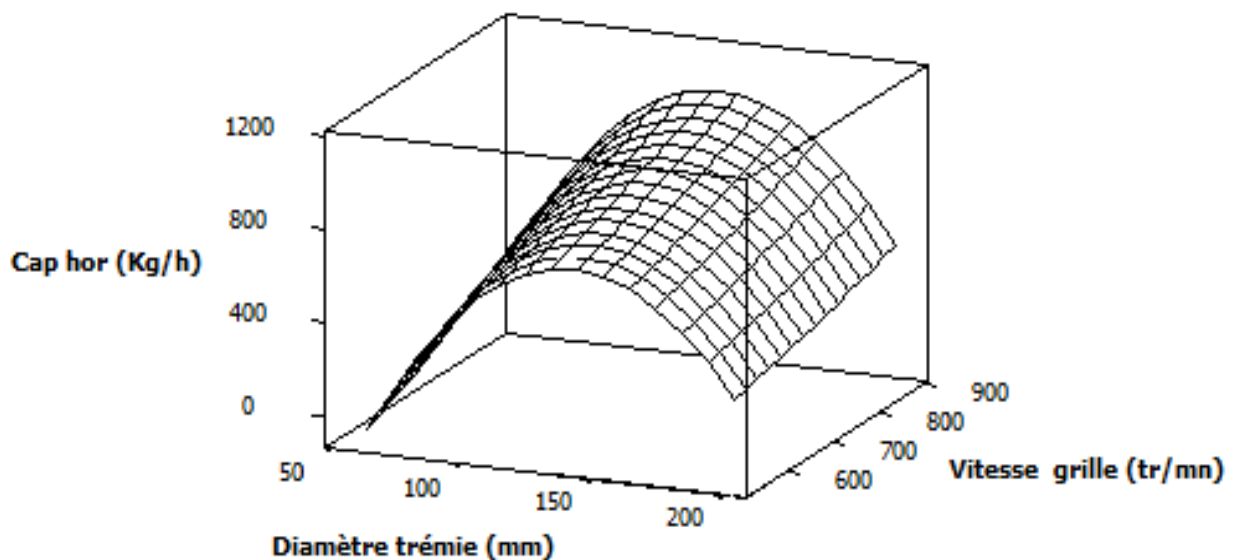


Figure 4-17. Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur la Capacité Horaire

La valeur optimisée de la Capacité horaire au détriment des autres paramètres est égale à 850 kg/h. A cette valeur, le diamètre de la trémie est égal à 130 mm et la vitesse de rotation égale à 694,7 tr/mn. Le même équipement, testé en utilisant les graines sèches, présente une valeur optimale de la Capacité horaire égale à 208 kg/h sous une vitesse de rotation est égale à 542 tr/mn (Sanya et al., 2009).

Les valeurs affichées pour la Capacité horaire (C_H), montrent que la vitesse de la grille imprime un effet éleveur assez significatif au seuil de 5 % sur la capacité horaire. On remarque que l'accroissement de la vitesse de la grille provoque l'augmentation de la Capacité horaire.

Le diamètre de la trémie n'a quant à lui pas d'effet statistiquement significatif sur la capacité horaire au même seuil. Toutefois, son effet reste non négligeable car son accroissement a tendance à entraîner

une augmentation de la Capacité horaire (Fig. 4.18). Cela pourrait s'expliquer par le fait que l'augmentation du diamètre de la trémie s'accompagne de la diminution de la surface de décortiquage entraînant ainsi la réduction de la capacité de décortiquage. De même, on peut noter que les actions combinées des deux facteurs n'ont pas eu d'effet significatif sur la capacité horaire de la machine.

Le modèle de régression linéaire, fixant adéquatement les données acquises pour la Capacité horaire (C_h), a pour équation :

$$C_h = - 425,647 + 1,537d + 0,962N \quad (4-16)$$

avec le coefficient de régression égal à $R^2 = 68,36\%$

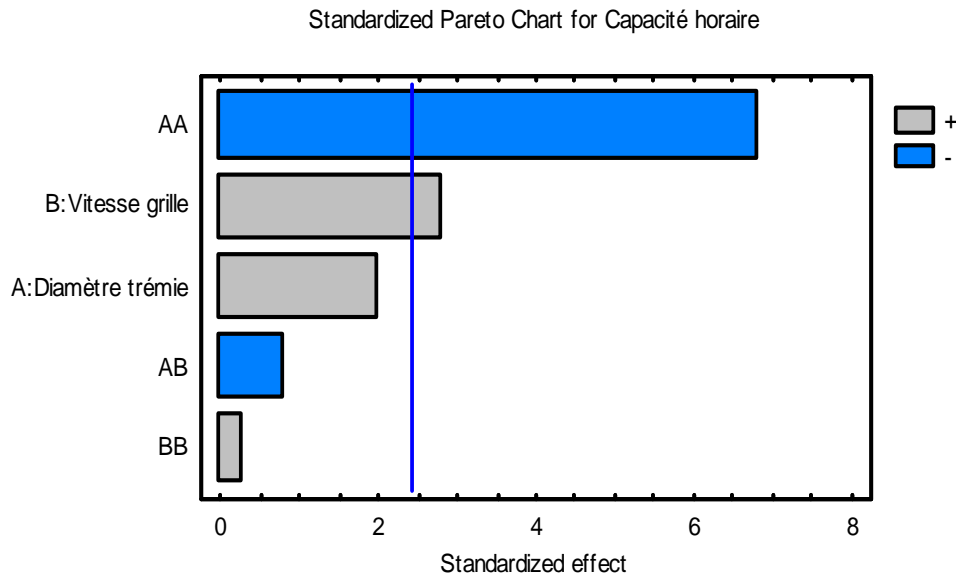


Figure 4-18. Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées (Vitesse et Débit) et leurs interactions sur la Capacité horaire

4.4.9. Analyse et optimisation du facteur d'efficacité de la décortiqueuse

La figure 4-19 présente les variations du paramètre Facteur d'efficacité en fonction de la variation simultanée du diamètre de la trémie et de la vitesse de rotation de la grille.

L'exploitation des résultats portés par cette figure révèle que la valeur minimale du Facteur d'efficacité est égale 209,7 kg/h et sa valeur maximale est égale à 959 kg/h. La valeur minimale est obtenue lorsque la vitesse de rotation de la grille est égale à 855 tr/mn et le diamètre de la trémie égal à 200 mm. Par contre, la valeur maximale de ce paramètre est observée quand le diamètre de la trémie est égal à 130 mm et la vitesse de rotation égale à 756 tr/mn.

La valeur optimisée du Facteur d'efficacité, au détriment des autres paramètres, est égale à 790 kg/h. A cette valeur, le diamètre de la trémie est égal à 130 mm et la vitesse de rotation égale à 741tr/mn.

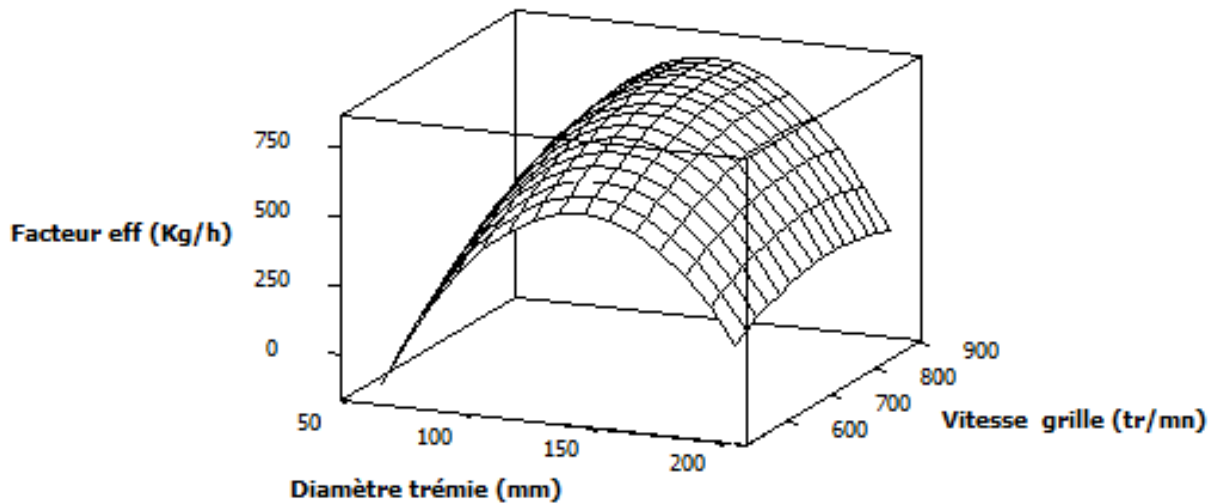


Figure 4-19 : Surface de réponse des interactions de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie sur le Facteur d'efficacité

La figure 4-20 montre que la vitesse de la grille et le diamètre de la trémie n'ont pas un effet significatif au seuil de 5 % sur le Facteur d'efficacité. Toutefois, l'accroissement de la vitesse de la grille et du diamètre de la trémie entraîne l'augmentation de ce paramètre. La variation simultanée des deux facteurs n'a d'effet significatif sur le paramètre étudié.

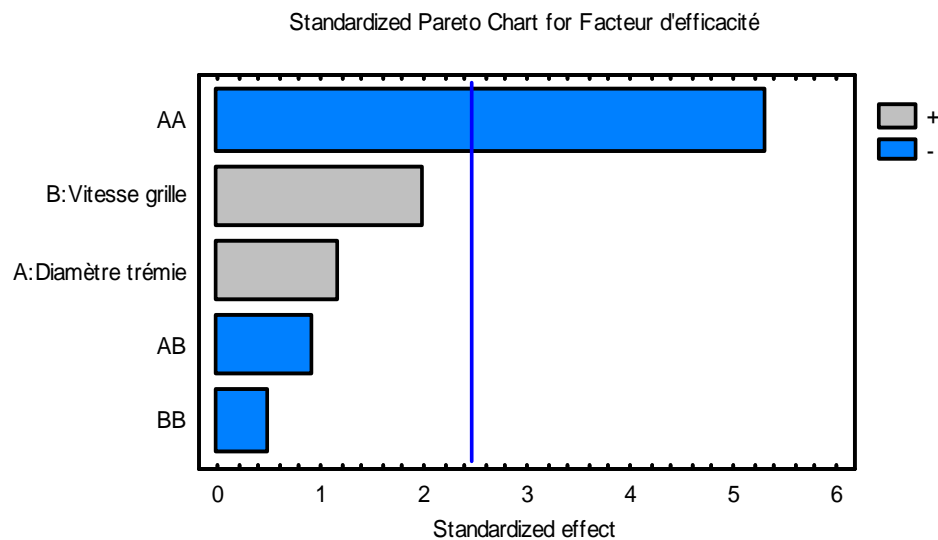


Figure 4-20 : Graphique standardisée de PARETO pour l'influence des variables étudiées (Vitesse et Débit) et leurs interactions sur le Facteur d'efficacité

Le modèle de régression linéaire, fixant adéquatement les valeurs acquises pour la Capacité horaire (F_c), a pour équation :

$$F_e = -304,077 + 1,0296d + 0,7607N \quad (4-17)$$

avec le coefficient de régression égal à $R^2 = 75,9$

4.4.10. Analyse d'optimisation multiple critères

Le tableau 4-2 indique les valeurs optimales respectivement des variables étudiées et des paramètres réponses obtenus. La valeur moyenne de référence est celle obtenue du décortilage traditionnel : elle est égale à 0,93. Lorsque la valeur optimale de la vitesse de la grille (666 tr/mn) et celle du diamètre de la trémie (116 mm) sont atteintes, on enregistre que la valeur optimale de l'indice de décortilage est égale à 0,91. Bien que légèrement inférieure à la valeur de référence, cette valeur optimale de l'Indice de décortilage est supérieure de 29 % à celle affichée par la décortiqueuse du Nigéria (Audu et al., 2004) et de 28 % à celle du CIRAD (Traoré et al., 2004).

Les valeurs admises en ce qui concerne le taux de décortilage de la graine de néré sont comprises entre 90 à 100 %. L'enquête auprès des transformatrices a révélé qu'un taux de décortilage supérieur ou égal à de 95 % est souhaité. La valeur optimisée du Taux de décortilage est égale à 96,27 %. Elle est obtenue lorsque les vitesses de la grille et le diamètre sont respectivement égale à 666 tr/mn et 116 mm. Avec ces valeurs, le Taux de brisure des cotylédons est égale à 1,47 %. Cette valeur est de 70 % inférieure à la valeur de référence. Ce qui satisfait à l'une des exigences capitales des transformatrices.

Tableau 4-2. Valeurs optimisées des paramètres de performance

Valeurs optimales des variables		Paramètres	
		Désignation	Valeurs optimales
Vitesse grille (tr/mn)	Diamètre trémie (mm)	Indice décortilage	0,91
		Taux décortilage (%)	96,27
		Taux brisure (%)	1,47
		Rendement décortilage (%)	50,35
666	116	Capacité horaire (kg/h)	773
		Facteur d'efficacité (kg/h)	697

La valeur optimale du rendement au décortilage est supérieure de 4,16 % à la valeur de référence. Il en découle que l'optimisation induit une amélioration du rendement au décortilage et, par conséquent, une certaine augmentation du produit final à obtenir. Toute chose susceptible de favoriser l'acceptation de l'équipement par les transformatrices.

La valeur optimale de la capacité horaire est de 773 kg/h de graines cuites, soit environ 17 marmites ou bassines de 40 kg. Avec cette performance, cet équipement, tout en réduisant de façon substantielle la pénibilité du travail, favorisera une utilisation communautaire. Cette capacité dépasse en effet le niveau de production d'une seule transformatrice qui a été estimée en moyenne à deux (02) marmites par jour.

4.4.11. Analyse expérimentale des valeurs optimales des paramètres de performance

Le tableau 4.3 présente les valeurs des paramètres de performance obtenues à l'issue des tests expérimentaux. Elles y sont mises en regard de celles résultant de l'analyse d'optimisation.

Les probabilités des tests de conformité des moyennes entre les valeurs expérimentales et les valeurs optimales des paramètres de performances sont comprises entre 0,104 et 0,47 (Tableau 4.3). Elles sont toutes supérieures à 0,05.

Tableau 4-3. Valeurs expérimentales des paramètres de performance et comparaison avec les valeurs optimales

Valeurs optimales des variables étudiées		Paramètres de performance			
Vitesse grille (tr/mn)	Diamètre trémie (mm)	Désignation	Valeurs optimales	Valeurs expérimentales	Probabilité (p)
666	116	Indice décortilage	0,91	0,92 ± 0,01	0,144
		Taux décortilage (%)	96,27	94,95 ± 1,72	0,120
		Taux brisure (%)	1,47	1,58 ± 0,35	0,472
		Rendement au décortilage (%)	50,35	48,45 ± 2,34	0,104
		Capacité horaire (kg/h)	773	780,53 ± 23	0,47
		Facteur d'efficacité (kg/h)	697	702,16 ± 8,8	0,213

Pour tous ces paramètres, on accepte l'hypothèse nulle et on conclut statistiquement que les deux valeurs de chaque paramètre ne sont pas différentes au seuil de 5 %.

Ces résultats confirment les performances techniques de l'équipement et offrent de réelles perspectives pour son adoption par les groupes cibles que sont les productrices d'afitin.

4.4.12. Effets du jeu inter grilles sur les indicateurs de performance de la décortiqueuse

L'influence du jeu entre les grilles fixe et mobile sur les performances techniques de la décortiqueuse est illustrée sur les figures 4-21, 4-22 et 4-23.

4.4.12.1. Effets du réglage du jeu sur le Taux de décortilage et le Taux de brisure

La figure 4-21 présente les influences de la variation du jeu entre les grilles fixe et mobile respectivement sur les taux de décortilage et de brisure. L'analyse des résultats présentés sur la figure 4-22 montre que lorsque le jeu de réglage entre les grilles varie entre 0 et 25 mm, le Taux de décortilage des graines décroît de 100 à 0 % et le Taux de brisure de 50,83 % à 0 %. Le jeu de réglage compris entre 5 et 15 mm permet d'obtenir les valeurs des deux. Les conditions technologiques imposent un Taux de décortilage compris entre 90 et 100 % et un Taux de brisure entre 0 et 10 % (tableau 4-1). Un jeu de réglage compris entre 5 et 15 mm permet à l'équipement de respecter ces conditions. Toutefois, le jeu de réglage de 9 mm donne les meilleures performances avec des valeurs respectives du Taux de décortilage et du Taux de brisure égales respectivement à 99,1 % et 1,33 %. Ces résultats sont proches de celles obtenues théoriquement (paragraphe 4-4-3) qui recommande un jeu compris entre 3,5 et 11 mm.

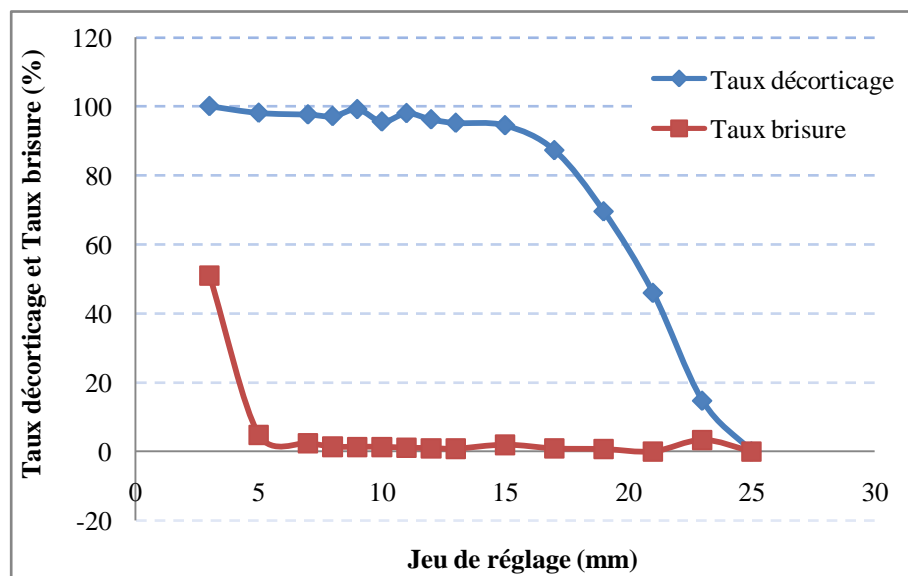


Figure 4-21. Variation du Taux de décortilage et Taux de brisure en fonction du réglage du jeu

4.4.12.2. Effets du jeu de réglage sur l'indice d'efficacité

La figure 4-22 illustre l'effet du jeu de réglage des grilles sur l'indice d'efficacité de la décortiqueuse. Les résultats expérimentaux de la figure 4-22 montrent que lorsque le jeu inter grilles varie entre 3 et 25 mm, l'Indice d'efficacité passe de -0,7 à 0,97. Si la valeur de référence varie entre, 0,85 et 1, alors le jeu inter grilles permettant d'avoir ces valeurs varie entre 5 et 15mm. La valeur la plus élevée de l'indice égale à 0,97 est obtenue lorsque le jeu est de 9 mm.

Les mouvements chaotiques des graines sur les grilles fixes favorisent le décortilage efficace des graines en dépit du fait que la valeur de réglage du jeu soit supérieure à l'épaisseur moyenne des graines évaluée à 5,6 mm. Lorsque le jeu est supérieur à 15 mm, l'espace entre les deux grilles est devenu plus grand. Il ne peut donc plus assurer la pression et la friction nécessaires à un décortilage efficace entraînant progressivement la baisse de l'Indice d'efficacité.

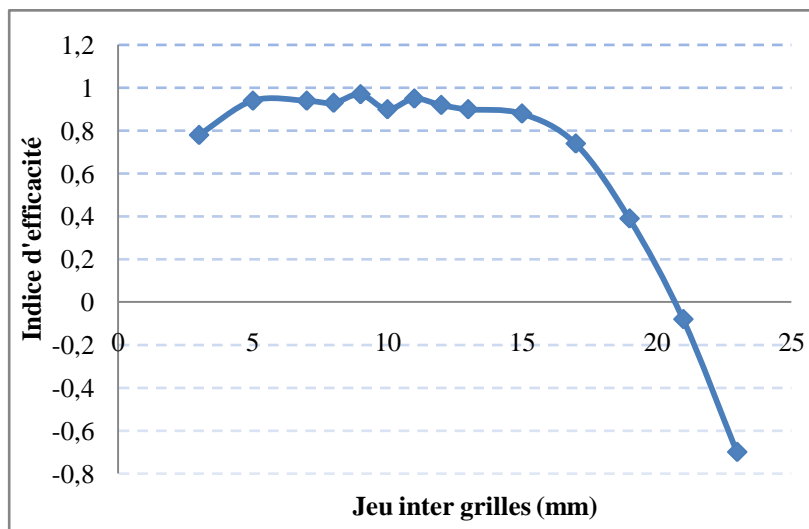


Figure 4-22. Variation de l'Indice d'efficacité en fonction de la valeur du jeu inter grilles

4.4.12.3. Effets du réglage du jeu inter grilles sur le Rendement au décortilage

L'influence du jeu entre les grilles de la décortiqueuse sur le rendement est illustrée par la figure 4-23. L'analyse des résultats confirme les tendances obtenues dans les deux paragraphes précédents. Les valeurs de jeu comprises entre 5 et 15 mm permettent d'obtenir les valeurs du Rendement au décortilage recommandées qui doivent être situées entre 40 % et 60 %. En outre, un jeu de 9 mm permet d'atteindre la valeur maximale du rendement au décortilage. Un jeu supérieur à 15 mm,

n'assure plus un bon décortilage, à cause de la faiblesse des forces de friction, entraînant la baisse progressive du rendement.

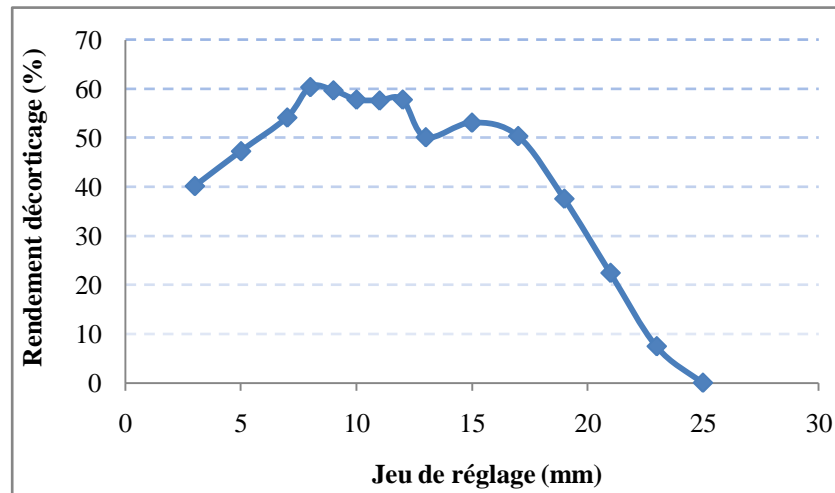


Figure 4-23. Evolution du Rendement au décortilage en fonction du réglage de jeu inter grilles

4.5. Conclusion

Les expériences rapportés dans ce chapitre ont permis de déterminer les valeurs optimales des variables opératoires que sont la vitesse de la grille et le diamètre de la trémie, ainsi que celles de paramètres techniques de performance de la décortiqueuse. Lorsque l'équipement est câblé sur une vitesse de rotation de la grille de 666 tr/mn et un diamètre de la trémie égal à 116 mm, les valeurs optimales des paramètres réponses sont de 0,91 % pour l'Indice de décortilage, 96,27 % pour le Taux de décortilage, 1,47 % pour le Taux de brisure, 50,35 % pour le Rendement au décortilage, 773 kg/h pour la Capacité horaire et 702,16 kg/h pour le facteur d'efficacité. Les tests expérimentaux ont confirmé les valeurs optimales théoriques.

A cette performance technique enregistrée avec la machine, doit être associée l'efficacité économique. Pour ce faire, des tests en milieu réel sur les sites de production d'afitin et des analyses économiques doivent être réalisés afin d'évaluer l'acceptabilité de l'équipement par les transformatrices et d'en donner des indications sur les paramètres économiques. Ce sont ces aspects de nos travaux qui font l'objet essentiel du contenu développé dans le chapitre 5.

CHAPITRE 5

EVALUATION DES PERFORMANCES TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DE LA DECORTIQUEUSE A GRAINES DE NERE

5.1. Introduction

Les condiments issus de la fermentation des graines légumineuses sont largement prisés dans l'alimentation en Afrique de l'Ouest et particulièrement au Bénin. Parmi ces condiments, figurent en bonne place, *l'afitin* (Bénin), le *soumbala* (*Burkina-Faso*), le *dawadawa* (*Nigéria et Ghana*), le *Nététu* (*Sénégal*), etc. Ces produits d'assaisonnement sont généralement obtenus par la fermentation spontanée des graines de néré (*Parkia biglobosa*) (Azokpota et al., 2006_a ; Azokpota et al., 2006_b, Azokpota, 2005 ; Azokpota et al., 2001). Ils jouent un important rôle dans l'équilibre nutritionnel des populations, en raison de leurs fortes teneurs en protéines (30 à 40 %), en lipides (15 à 25 %), en substances minérales (4 %) et en vitamines (essentiellement celles du groupe B) (Diawara et Diasso, 2004). Au Bénin, *l'afitin* est consommé comme un substitut à la viande, notamment par les populations à faibles revenus (Gutierrez et al., 2000, Azokpota et al., 2006_a). *L'afitin*, de par ses vertus thérapeutiques, serait un régulateur de tension artérielle ; ce qui favorise sa consommation de plus en plus croissante (Gutierrez et al., 2000). L'engouement à la consommation d'*afitin* entraîne une augmentation annuelle significative de sa production (Azokpota et al., 2006_a).

Cependant, la production de *l'afitin*, restée jusque-là traditionnelle, comporte les opérations de transformation telles que : le triage, le nettoyage des graines, la cuisson, le décortilage manuel et la fermentation (Azokpota et al., 2006_a). Le décortilage et la fermentation constituent les principales opérations au cours desquelles sont encore enregistrées les contraintes majeures de la production de *l'afitin* (Gutierrez et al., 2000 ; Azokpota et al., 2006_a). La fermentation a déjà fait l'objet de plusieurs travaux antérieurs (Azokpota et al., 2006_a ; Azokpota et al., 2006_b ; Parkouda et al., 2009).

A notre connaissance, très peu de recherches ont été effectuées sur le décortilage des graines de néré qui demeure présentement une problématique majeure des chercheurs et transformateurs. En effet, le décortilage mécanique des graines de néré, au cours de la production d'*afitin*, a fait l'objet de quelques tentatives de recherche (Hounhouigan et al., 2004 ; Alihonou, 2006). Mais ces travaux n'ont pas pris en compte l'effet des différents prétraitements auxquels les graines de néré sont préalablement soumises avant la fermentation par le procédé traditionnel. La conséquence de cette situation est la non adoption des équipements mis au point et, la plupart du temps, les femmes continuent de pratiquer le décortilage, soit par foulage aux pieds, soit par pilage au mortier.

Dans le cadre de notre étude, les travaux exposés dans les chapitres précédents permettent de proposer, aux transformatrices des graines de néré en *afitin*, un équipement performant répondant à leur besoin. Il n'est pas exagéré de présager d'une forte adoption de l'équipement par ces femmes.

Toutefois, pour bien s'en convaincre, les tests en milieu réel, sous gestion paysanne, s'avéraient nécessaires voire indispensables. La partie de notre étude rapportée dans le présent chapitre concerne la réalisation effective des tests en milieu réel. Conduits sous la gestion des transformatrices elles-mêmes, ces tests ont donné aux utilisatrices l'opportunité d'apprécier les performances de la décortiqueuse. Elles ont expérimenté directement la production de l'*afitin* avec les graines décortiquées de façon mécanique.

Les données relatives aux performances techniques et économiques de cette nouvelle technologie utilisant la décortiqueuse mécanique sont collectées. Une comparaison a alors été effectuée avec celles obtenues de la méthode traditionnelle de foulage aux pieds retenue en référence et les appréciations des transformatrices recueillies.

5.2. Matériel et Méthodes

5.2.1. Matériel

5.2.1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal de cette étude est constitué des graines de néré fournies par les transformatrices elles-mêmes. Ces graines, également acquises par les transformatrices au marché de Dantokpa, ont subi l'étape de triage préalable avant d'être cuites à l'eau.

5.2.1.2. Sites d'étude

L'évaluation des performances de l'équipement en milieu réel a été faite auprès des transformatrices des graines de néré en *afitin* de la ville d'Adjarra pour. La production du *afitin* est régulière et les transformatrices ont activement participé aux différentes phases de de cette étude. L'équipement est mis à la disposition des femmes sur une période de six (06) mois au cours desquels les données techniques et économiques sont périodiquement collectées. La périodicité retenue est de deux (02) semaines. Les transformatrices disposent d'une expérience d'au moins vingt (20) ans dans l'activité de la production d'*afitin*.

5.2.1.3. Equipement et autres matériels

Le principal équipement utilisé pour les tests en milieu réel est la décortiqueuse mise au point (prototype). La cuisson des graines et des cotylédons est réalisée avec les marmites en aluminium (Photo 5.1). Les bassines en aluminium et en plastic sont utilisées respectivement pour le foulage aux pieds et le stockage de l'eau. La bassine et la passoire sont utilisées pour le triage et le rinçage des

graines décortiquées alors que les paniers et sacs de jutes ont servi durant la phase de fermentation (Photos 5.2 à 5.5).



Photo 5-1. Cuisson graines à la marmite en aluminium



Photo 5-2. Décorticage des graines par foulage aux pieds dans les bassines en plastic et en aluminium



Photo 5-3. Triage des graines à l'eau additionnée de boue de sable



Photo 5-4. Rinçage des cotylédons



Photo 5-5. Mise en fermentation des cotylédons bien nettoyés

5.2.2. Méthodes

5.2.2.1. Tests de la décortiqueuse

L'évaluation des performances techniques et économiques de la décortiqueuse en milieu réel a consisté à comparer ses performances avec celles de la méthode traditionnelle.

Pour les tests de l'équipement, trente (30) kg de graines de néré nettoyées, sont cuites à l'eau pendant quatre (04) heures comptées à partir de l'ébullition. Les graines sont ensuite essorées et progressivement déversées dans la trémie de la machine pour être décortiquées mécaniquement.

Les graines ainsi décortiquées sont alors rincées et triées manuellement. Les cotylédons sont ensuite portés à une cuisson qui dure environ 1h après laquelle ils sont soumis à la fermentation pendant 48 h. Le dispositif utilisé pour la fermentation est celui décrit par Azokpota (Azokpota et al., 2006_b) relatif à la méthode traditionnelle.

5.2.2.2. Méthode traditionnelle

Les graines sont cuites dans de l'eau additionnée d'une solution de potasse, à feu intense pendant 4 h, et à feu doux pendant 8 h. Après un refroidissement, les graines sont saupoudrées de sable, puis foulées aux pieds. L'ajout de sable serait nécessaire pour séparer aisément les coques des cotylédons.

Les graines décortiquées par le foulage subissent ensuite les mêmes traitements (rinçage, triage, cuisson et fermentation) que celles issues du décortilage mécanique.

Pour ces deux (02) méthodes de traitements, neuf (09) répétitions sont réalisées par traitement, à raison de 30 kg de graines par répétition. Trois (03) répétitions sont réalisées à intervalles réguliers de deux (02) mois.

A chaque répétition expérimentale, les données suivantes sont collectées : masse des graines avant et après la cuisson (kg), masse des cotylédons au décortilage, au triage, à la cuisson et à la fermentation. Les durées de cuisson, de décortilage, de triage, de cuisson et de fermentation sont aussi collectées. De même, la quantité de carburant utilisée à chaque répétition est mesurée. Des prélèvements de graines et cotylédons à chaque opération sont réalisés pour les analyses au laboratoire. Après une première phase de suivi pendant deux (02) mois, l'équipement est laissé à la disposition des transformatrices. Celles-ci l'ont exploité pendant une période de six (06) mois à la fin de laquelle, nous avons convenu de recueillir leurs appréciations.

Pour réaliser l'analyse économique, les données suivantes sont collectées : les quantités et les valeurs des consommations intermédiaires (graines de néré, bois, eau, main d'œuvre, carburant) et les données

relatives à l'investissement (coût, prix d'achat de l'équipement et des petits matériels, durée de vie) avec enfin, le prix de vente de l'*afitin*.

5.2.2.3. Collecte des appréciations des transformatrices

Un focus groupe a permis la collecte des appréciations des transformatrices juste à la fin du premier essai. La bonne impression manifestée par les femmes transformatrices a incité à leur laisser l'équipement pour son utilisation et surtout à les former à son exploitation. Six (06) mois après, les appréciations des transformatrices ayant utilisé l'équipement, ont été recueillies à travers une enquête semi-structurée. Les données de l'enquête sont collectées à l'aide d'une fiche de questionnaire administrée à chaque productrice. L'échantillon est constitué de quarante (40) femmes sélectionnées, de façon aléatoire, parmi les personnes ont utilisé régulièrement cet équipement de décortication mécanique mis à leur disposition.

5.2.2.4. Expression des résultats sur les performances techniques et économiques

L'efficacité et la fiabilité de chaque technologie sont estimées à partir des paramètres que sont l'Indice de décortication, le Taux de décortication (%), le Rendement au décortication (%), le Taux de brisure (%), le Rendement en *afitin* (%), la Capacité horaire (kg/h).

Les performances économiques des deux (02) modes de traitements sont évaluées à travers les marges brutes (FCFA), les marges nettes (FCFA) et le seuil de rentabilité (kg/an).

❖ Méthode d'analyse technique

A chaque répétition expérimentale, un prélèvement d'échantillon de masse $m_p=500$ g est effectué. L'échantillon est séparé manuellement au laboratoire en quatre (04) fractions qui sont pesées afin d'en obtenir :

- la masse des cotylédons entiers ou éclatés en deux (m_c) ;
- la masse des graines non décortiquées ou partiellement décortiquées (m_u) ;
- la masse des cotylédons brisés (m_b) ;
- la masse des coques (m_h).

L'efficacité de la décortiqueuse est évaluée à partir des paramètres de performance suivants : Indice de décortication (I_d), Taux de décortication (T_d), Taux de brisure des cotylédons (T_b), la Capacité horaire (C_h) et le facteur d'efficacité (F_E), le rendement au décortication (R_d). Les quatre (04) premiers paramètres sont exprimés respectivement à l'aide des formules 3-1 ; 3-2 ; 3-3 et 3-4 du chapitre 3 (page 113) . La Capacité horaire est exprimée par la formule 4-5 du chapitre 4 (page 135).

Les rendements des différentes opérations du processus de transformation sont calculés par la formule :

$$R_o = m_1/m_2 \times 100 (\%) \text{ avec ;} \quad (5-1)$$

- m_1 : masse produit obtenue à la fin de l'opération (kg) ;
- m_2 : masse matière transformée (kg).

Le rendement total en afitin est le rapport entre la masse d'afitin obtenue et celle de graines de néré transformée.

❖ **Expression des résultats sur les performances économiques**

L'analyse des performances économiques des deux technologies (équipement mécanique, méthode du foulage aux pieds) a porté sur les indicateurs tels que les temps des travaux, les marges brutes et nettes, et le seuil de rentabilité. Ainsi, les coûts variables, le revenu et les coûts fixes liés à chaque technologie sont estimés. La méthode d'analyse financière développée par l'ONUDI a été empruntée (Ahouansou et al., 2006c, Singbo and Ahouansou, 2005 ; Adégbola et al., 2003 ; Wiemer, 1995). Le traitement des données collectées est effectué sous le logiciel Excel 2007.

Coûts variables

Les coûts variables sont constitués des coûts de la matière première, de la main-d'œuvre, de l'eau, du sel, du ferment, de la potasse, du carburant et des frais de réparation.

Coût des intrants et de la consommation intermédiaire

Le coût d'un kilogramme de graines de néré est évalué à 585 FCFA. Le prix de 30 litres d'eau est estimé en moyenne à 25 FCFA et celui d'un kilogramme de bois égal à 31 FCFA. Il faut environ 6,5 mesures (togolo) de sel de "Djèbadji" pour traiter 100 kg d'afitin. Sachant qu'un togolo pèse en moyenne 1472 g, il s'en déduit alors que 95 g de sel sont utilisés par kg de graines transformées. Le prix d'un kilogramme de sel est évalué à 350 FCFA. Le coût du sel pour 100 kg de graines transformées est de ce fait estimé à 3325 FCFA. La potasse entre dans l'opération de la cuisson des graines de néré. Environ 334 g de potasse sont utilisés pour la cuisson de 100 kg, soit 3,34 g par kg de graines cuites. Un sachet de 100 g de potasse coûte 25 F. Ainsi, le coût de la potasse pour la cuisson de 100 kg de graines est estimé à 83,5 FCFA. La fermentation des cotylédons est réalisée avec introduction d'un ferment localement appelé "Koulou". Les productrices ajoutent environ 120 g de ferment par 30 kg de graines transformées, soit 4 g par kg de graines de néré. Un sachet de 60 g de cet

ingrédient coûte 200 FCFA. Le coût de ferment indispensable au traitement de 100 kg de graines est alors estimé à 1334 FCFA.

Coûts de la main-d'œuvre

Les coûts, de la première cuisson, de la deuxième cuisson, du décorticage, du triage, de la fermentation, du broyage et du salage, sont intégrés dans le calcul des coûts liés à la main-d'œuvre. Toutes ces opérations sont rémunérées à 150 FCFA par homme-heure.

Frais de réparation et d'entretien

Les frais de réparation et d'entretien des équipements sont pris en compte dans les coûts variables. En effet, au niveau actuel des essais, nous ne disposons que des pourcentages annuels représentés par ces frais dans les coûts de cession des équipements. Les frais d'entretien et de réparation représentent alors 10 % du coût annuel de l'équipement. Ainsi, sur la base de la capacité technique de la décortiqueuse, une estimation été faite des frais de réparation et d'entretien pour 100 kg de graines de néré transformées.

Temps de travail

Les temps mis par opération, sont enregistrés et convertis en homme-heures. Ces temps de travaux sont calculés en intégrant les durées des première et deuxième cuissons, du décorticage, du triage et du rinçage, de la fermentation, du broyage et du salage du *afitin*. Le nombre de personnes, par opération, est pris en compte dans les calculs.

Le temps consacré par la transformatrice à la cuisson représente 30 % de la durée totale de l'opération, tandis le temps consacré par la transformatrice à la fermentation représente environ 10 % de la durée totale de la fermentation. Pour chacune des opérations restantes, le temps consacré représente effectivement les 100 % du temps réel de l'opération.

*Prix de revient du *afitin**

Le prix de revient de l'*afitin* est calculé en intégrant les coûts variables et les coûts fixes ramenés à un kilogramme du produit fini.

Revenu

Le revenu a été calculé sur la base du prix de vente du *afitin* sur le marché d'Adjara

Coûts fixes

Les coûts fixes représentent les prix de la décortiqueuse, des ustensiles et du petit matériel. Ces coûts fixes sont ramenés aux coûts annuels par l'amortissement linéaire.

Marges

La marge brute calculée est la différence entre le revenu obtenu et le total des coûts variables. Quant à la marge brute unitaire, elle est calculée par rapport à la quantité de produit transformé. La marge nette est calculée par déduction des coûts fixes de la marge brute.

Rentabilité

Le seuil de rentabilité a été déterminé à partir de la méthode développée par l'Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel (ONUDI) en 1998. D'après cette méthode, le seuil de rentabilité en chiffre d'affaires (SR_{CA}) est calculé par la formule suivante:

$$SR_{CA} = \frac{\text{Coûts fixes annuels} \times \text{Revenu}}{\text{Marge brute}} \quad (5-2)$$

Le pourcentage, de la capacité de l'équipement utilisée, indique le pourcentage de la production pour lequel la marge brute couvre les coûts fixes. Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\% \text{Capacité utilisée} = \frac{SR_{CA}}{\text{Chiffre..d'affaire (annuel)}} \times 100 \quad (5-3)$$

Pour évaluer la quantité seuil de feuilles à traiter par an, la formule employée est :

$$\text{Quantité Seuil} = \% \text{Capacité utilisée} \times \text{Capacité Technique} / 100 \quad (5-4)$$

Pour l'évaluation de la capacité technique, certaines hypothèses ont été émises. On suppose que la décortiqueuse fonctionne pendant six (06) jours par semaine et ceci, pendant neuf (09) mois. Ce qui équivaut à deux cents seize (216) jours/an, à raison de trois (03) heures de travail par jour. Le reste du temps est consacré aux autres opérations. Ainsi, la capacité technique de l'extracteur est déterminée à partir de la formule:

$$K = C_h \times N \times m \times n \quad (\text{kg/an}) \quad (5-5)$$

avec C_h : la capacité horaire de la machine ;

N : le nombre de jours de travail dans le mois (24 jours) ;

m : le nombre de mois de travail ;

n : le nombre d'heures de travail par jour.

5.2.2.5. Analyses statistiques

Le logiciel MINITAB 14 est utilisé pour l'analyse statistique des données et des paramètres. Le test t d'égalité de deux moyennes est employé pour comparer les performances techniques de la décortiqueuse à celles de la méthode traditionnelle. Ce test est utilisé pour les paramètres que sont la Capacité horaire, le Temps des travaux, le Rendement d'extraction, le Taux de matière sèche. Les données collectées durant l'enquête sont traitées à travers les étapes de dépouillement, de codification et d'enregistrement au moyen du logiciel ACCESS pour enfin être analysées.

5.3. Résultats et discussion

5.3.1. Performances techniques des technologies en milieu réel

5.3.1.1. Paramètres de performance de la décortiqueuse

Le tableau 5-1 présente les performances techniques de la décortiqueuse en milieu réel en comparaison avec la méthode traditionnelle (Fouillage aux pieds).

Tableau 5-1 : Performances techniques comparées des deux méthodes de décortilage

Désignation	Décortiqueuse	Fouillage aux pieds	Probabilité
Indice de décortilage (%)	0,91 ± 0,03	0,93 ± 0,02	0,212
Taux de décortilage (%)	96,25 ± 2,15	97,14 ± 1,33	0,326
Taux de brisure (%)	2,21 ± 1,28	1,41 ± 0,32	0,00
Rendement décortilage (%)	54,42 ± 1,2	53,62 ± 0,9	0,354
Capacité horaire (kg/h)	551,25±6,23	38,69±2,81	0,00

L'analyse des résultats du tableau 5-1 montre que l'Indice de décortilage de l'équipement est inférieur de 2,15 % à celle de la méthode du fouillage aux pieds tandis que son Taux de décortilage l'est de 0,6 %. Ces légères différences ne sont pas statistiquement significatives au seuil de 5 % avec des probabilités égales respectivement à 0,212 et 0,326. Ces valeurs obtenues sont proches de celle optimisées présentées au tableau 4-2 du chapitre 4 de ce mémoire où les valeurs de l'Indice de décortilage et du Taux de décortilage sont respectivement égales à 0,91 et 96,27 %. L'intérêt de ces résultats réside dans le fait qu'ils sont obtenus en milieu réel avec un équipement utilisé par les

bénéficiaires qui n'en ont pas encore la maîtrise. Il est alors permis d'espérer une amélioration de ces résultats avec une appropriation progressive de l'équipement par les transformatrices.

Le Rendement au décortilage de la machine est supérieur de 1,5 % à celui fourni par la méthode traditionnelle. Les tests statistiques indiquent que ces deux valeurs ne sont pas significativement différents. L'amélioration des conditions de décortilage pourrait bien expliquer ce résultat. En effet, le décortilage traditionnel s'effectue au foulage aux pieds après un ajout du sable aux graines. Cette pratique entraîne des pertes de cotylédons dans le sable lors du rinçage. Ce qui n'est nullement le cas avec le décortilage des graines au moyen de l'équipement proposé réalisé sans aucun additif.

Aussi, le rendement obtenu en milieu réel avec l'équipement ($54,42 \pm 1,2$ %) est-il supérieur à la valeur optimisée (50,35 %). Ceci témoigne de la bonne tenue de l'équipement en milieu réel. En plus des bonnes performances de l'équipement, l'origine et les caractéristiques physiques des graines pourraient aussi expliquer cet intéressant résultat.

L'analyse montre que les Taux de brisure des cotylédons obtenus avec les deux méthodes de décortilage sont statistiquement différents au seuil de 5 %. De plus, la valeur enregistrée avec l'exploitation de l'équipement ($2,21 \pm 1,28$ %) est supérieure à celle optimisée (1,47 %). Toutefois, elle est inférieure à la valeur de référence : 5 % (Tableau 4-1 ; page 142). Une maîtrise progressive de l'utilisation de l'équipement permettra sans doute d'améliorer cet important indicateur.

L'efficacité de la décortiqueuse est illustrée aussi par la Capacité horaire affichée. Elle est de 14 à 15 fois supérieure à celle de la méthode traditionnelle. En une heure, la machine traite 551,25 kg de graines cuites, soit environ 225 kg de graines non traitées contre 13 à 15 kg pour la méthode traditionnelle.

L'introduction et l'adoption de cet équipement permettront de réduire la pénibilité, le temps de travail, d'augmenter les quantités de graines transformées, tout en favorisant une certaine assurance de la qualité physique de l'afitin.

5.3.1.2. Temps des travaux comparés des deux technologies

Les temps des travaux relatifs aux opérations de transformation des graines de néré en afitin, évalués en homme – heures (HH) sur la base de 100 kg de graines traitées, sont présentés dans le tableau 5-2. Le temps des travaux est la somme des temps mis pour réaliser les différentes opérations liées aux deux technologies objets de la présente étude. La première utilise le décortilage mécanique des graines et la seconde, le foulage aux pieds.

Les résultats consignés dans le tableau 5-2 montrent clairement que l'introduction de la décortiqueuse permet de réduire considérablement la durée du processus de transformation des graines de néré en *afitin*. En effet, l'exploitation de la décortiqueuse diminue la durée du processus de transformation de 14 HH et celle du temps consacré par la transformatrice de 7,81 HH, soit une journée de travail. L'introduction de cet équipement induit alors un double gain : celui de la réduction de la pénibilité du travail et du temps. A cela, on peut ajouter l'amélioration probable de la qualité hygiénique du produit. En effet, le décortilage mécanique se fait sans addition du sable ou de la sciure à la graine, sources de contamination en microorganismes indésirables tels que les germes coliformes, les levures et moisissures (Azokpota et al., 2001). Aussi, la méthode de foulage aux pieds est-elle parfois source de rejet de l'*afitin* par certains consommateurs ! Ceux-ci estiment que le produit n'est pas propre et la méthode d'obtention répugnante.

Tableau 5-2 : Temps des travaux (HH) pour transformer 100 kg de graines

Opérations	Technologie mécanisée		Technologie traditionnelle	
	Durée opération (HH)	Temps consacré par l'opératrice (HH)	Durée opération (HH)	Temps consacré par l'opératrice (HH)
Lavage graines	0	0	0	0
Première cuisson	4	1,20	13	3,90
Premier décortilage	0,60	0,60	3,16	3,16
Premier rinçage	2,80	2,80	2,77	2,77
Deuxième décortilage	0,25	0,25	2,77	2,77
Deuxième rinçage	2,10	2,10	2,05	2,05
Triage à la boue	2,76	2,76	3	3
Troisième rinçage	0,66	0,66	0,55	0,55
Deuxième cuisson	1,05	0,42	1	0,40
Fermentation	43	4,30	43	4,30
Salage et broyage	0,30	0,30	0,30	0,30
Total (HH)	57,52	15,39	71,6	23,2

Si la mécanisation du décortilage favorise une réduction substantielle du temps de travail, certaines opérations liées au processus de travail restent encore consommatrices de temps. Il s'agit des opérations de triage et de rinçage qui occupent encore près de 50 % du temps de travail. Il en découle de facto qu'une future amélioration de la technologie puisse obligatoirement transiter alors par la mécanisation des opérations de triage et de rinçage. La réduction du temps de travail devra également

viser l'usage de foyers améliorés avec, pour avantage, la diminution de la consommation en bois-énergie.

5.3.1.3. Rendement des différentes opérations

Le tableau 5-3 présente les rendements des différentes opérations du processus de transformation des graines de néré en *afitin*.

Tableau 5-3 : Rendement d'extraction des différentes technologies

Opérations	Mécanisée	Traditionnelle	Probabilité
Première cuisson	236,7 ±2,4	249,2 ±5,1	0,011
Décortilage	98,9 ±3,3	99,9 ±4,1	0,101
Rinçage et triage	39,8 ± 1,1	37,5 ±2,3	0,03
Deuxième cuisson	114,2 ± 4,9	110,3 ±5,1	0,054
Fermentation	94,42 ± 3,5	93,9 ±4,9	0,155
Rendement en <i>afitin</i>	100 ± 2,9	96,66 ±4,5	0,022

L'analyse des résultats du tableau 5-3 montre que le rendement total en *afitin*, varie entre 96,66 % et 100 %. Ce rendement paraît très élevé. Il s'explique par le fait que le produit *afitin* est très humide (forte teneur en eau). Les valeurs sont proches de celles obtenues avec le soumbala frais. En effet, au Burkina-Faso, le rendement du soumbala frais varie de 84,6 % à 111 %, selon les sites de production caractéristiques des régions du pays (Diawara and Diasso, 2004) . Ce rendement final est le résultat des rendements partiels obtenus à l'issue de chaque opération. Les opérations de première et deuxième cuisson sont multiplicatrices de rendement avec une forte augmentation à l'issue de la première cuisson. Par contre, les opérations de décortilage, de fermentation et de rinçage-triage sont réductrices de valeur du rendement. On note une forte réduction au rinçage-triage. Cette opération conduit à débarrasser les graines décortiquées des coques et autres impuretés.

Le rendement en *afitin* de la méthode de décortilage mécanisée (100 %) est légèrement supérieur à celui de la méthode traditionnelle (96,66 %). Ces deux valeurs sont significativement différentes au seuil de 5 %. L'efficacité du décortilage mécanique et l'amélioration des conditions du rinçage expliquent cet intéressant résultat enregistré. Les graines décortiquées mécaniquement, sans ajout de sable, sont plus faciles à rincer, induisant moins de perte de cotylédons.

5.3.1.4. Consommation en carburant de la décortiqueuse

Le tableau 5-4 présente les consommations horaires et spécifiques du moteur ROBIN EY20 qui actionne la décortiqueuse.

Tableau 5-4. Consommation en carburant du moteur

Paramètres	Unités	Valeurs
Consommation horaire	L/h	0,3
Consommation spécifique	L/T	0,6

L'utilisation de la machine induit un surplus de coût lié à la consommation en carburant. Ce coût est de 330 F par tonne de graines cuites décortiquées, correspondant à environ 400 kg de graines non traitées, soit 0,8 FCFA par kg.

5.3.2. Résultats économiques

L'analyse des performances économiques des différentes technologies est faite sur la base du calcul du prix de revient d'un kilogramme d'afitin, de la comparaison des marges brutes, des marges nettes et du seuil de rentabilité induit.

5.3.2.1. Coûts de production

Les coûts de production sont constitués des coûts variables et des coûts fixes liés à l'amortissement de la décortiqueuse et des petits matériels qui l'accompagnent.

❖ Coûts variables

Le tableau 5-5 présente les éléments des coûts des intrants et des consommations intermédiaires entrant dans le calcul des coûts variables pour la production d'afitin avec les technologies traditionnelles et améliorées sur la base de 100 kg de graines de néré. Ce tableau montre que la technologie utilisant la décortiqueuse présente les coûts variables les plus faibles par rapport à la méthode traditionnelle du foulage aux pieds. La transformation des graines de néré en *afitin* entraîne la consommation d'eau et de bois. La transformation d'un kilogramme de graines nécessite environ entre 15 à 16 litres d'eau. Cette valeur est proche de celle de la production de l'afitin dans la région d'Abomey où la consommation d'eau par kilogramme de graines est d'environ 12 à 16 litres (Guttierez et al., 2000).

Au Burkina Faso, la consommation d'eau pour la transformation d'un kilogramme de graines de néré varie entre 10,5 litres et 29,5 litres (Diawara and Diasso, 2004). Les opérations de triage et de rinçage sont les plus consommatrices d'eau : environ 66 %.

Tableau 5-5 : Consommations intermédiaires et intrants

Libellé	Unités	Technologies	
		Mécanisée	Traditionnelle
Quantité de graines de néré	kg	100	100
Prix unitaire de graines de néré	FCFA/kg	585	585
A. Coût total de graines de néré	FCFA	58500	58500
Quantité d'eau	L	1520	1577
Prix unitaire de l'eau	FCFA/j	0,84	0,84
B. Coût de l'eau	FCFA	1276,8	1324,68
Quantité de bois en première cuisson	kg	148	184
Quantité de bois en deuxième cuisson	kg	52	47
Prix unitaire du bois	FCFA/kg	25	25
C. Cout du bois 1ère cuisson	FCFA	4580	5695
D. Cout du bois 2ème cuisson	FCFA	1610	1459,38
Quantité de potasse	g	334	334
Prix unitaire de potasse	FCFA/g	0,25	0,25
E. Coût de potasse	FCFA	83,5	83,5
Quantité de ferment	g	400	400
Prix unitaire de ferment	FCFA/g	3,33	3,33
F. Coût de ferment	FCFA	1334	1334
Quantité de sel	kg	9,5	9,5
Prix unitaire de sel	FCFA/kg	350	350
G. Coût du sel	FCFA	3325	3325
Coût total: (A+B+C+D+E+F+G)	FCFA	70709,3	71721,56

Ce tableau montre que la technologie utilisant la décortiqueuse présente les coûts variables les plus faibles par rapport à la méthode traditionnelle du foulage aux pieds. La transformation des graines de néré en *afitin* entraîne la consommation d'eau et de bois. La transformation d'un kilogramme de graines nécessite environ entre 15 à 16 litres d'eau. Cette valeur est proche de celle de la production de l'*afitin* dans la région d'Abomey où la consommation d'eau par kilogramme de graines est d'environ 12 à 16 litres (Guttierez et al., 2000). Au Burkina Faso, la consommation d'eau pour la transformation d'un kilogramme de graines de néré varie entre 10,5 litres et 29,5 litres (Diawara and Diasso, 2004). Les opérations de triage et de rinçage sont les plus consommatrices d'eau : environ 66 %.

L'optimisation de la technologie de transformation, dans l'avenir, passe par l'amélioration des conditions de rinçage et de triage, de manière à réduire la consommation en eau.

Dans cette perspective, et en marge de cette étude, la conception d'une trieuse a été faite. L'équipement est présenté en annexe 5 du présent document. Les opérations de première et deuxième cuissons sont les principales sources de consommation du bois dans le processus de transformation des graines de néré en *afitin*. La première cuisson consomme à elle seule 74 à 80 % du bois. La consommation en bois, par kg de graines de néré transformé, est égale environ à 2 kg pour la méthode utilisant l'équipement et 2,3 kg pour la méthode traditionnelle. La réduction du temps de cuisson, de 13 à 4 h, due à l'introduction de l'équipement, explique cette diminution. L'utilisation des foyers améliorés, d'autocuiseurs, dans le processus de transformation sont des pistes d'amélioration et d'optimisation de la technologie. L'utilisation du sel est une technologie récente introduite dans la transformation des graines de néré en *afitin*. Elle facilite la conservation de ce produit humide. Les transformatrices préfèrent le sel de 'Djègbadji', produit à Ouidah, au sel importé parce que, selon elles, il est de meilleure qualité. Le prix du kg de ce sel varie de 450 FCFA à 600 FCFA, selon les périodes. Il est plus élevé en période de pluie.

Le point total des coûts variables est présenté au tableau 5-6. Les résultats montrent que les coûts variables de la transformation de 100 kg de graines de néré, par la méthode mécanisée, est inférieur de 2107,72 FCFA à ceux de la méthode traditionnelle du foulage aux pieds. Ce résultat offre des éléments de base pour l'adoption de la nouvelle technologie par les femmes.

Tableau 5-6. Coûts variables pour 100 kg de graines transformées

Libellé	Technologies	
	Mécanisée	Traditionnelle
A. Consommation intermédiaires et intrants	70709,3	71721,26
B. Main d'œuvre	2308,5	3480
C. Entretien et réparation	4,8	2,46
D. Coût carburant	74	0
Coût total (A+B+C+D):	73096,6	75203,72

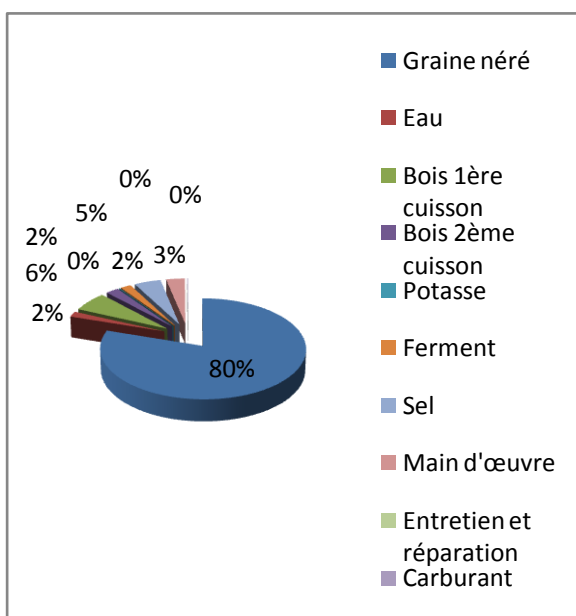


Figure 5-1. Structure des couts variables de la méthode mécanisée

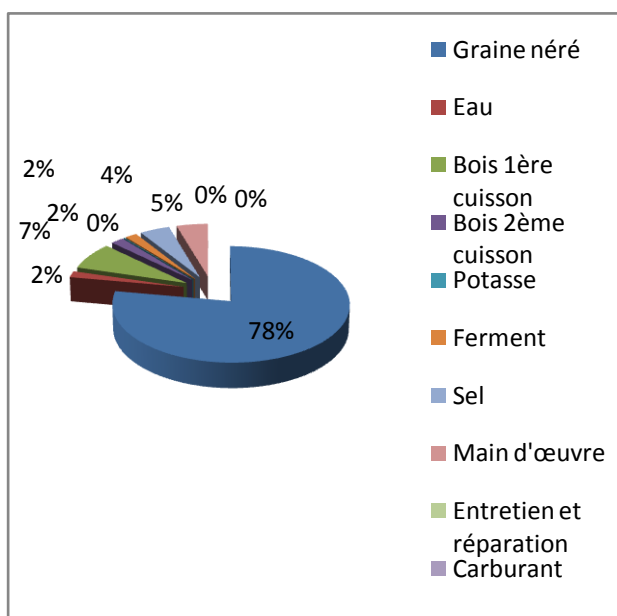


Figure 5-2. Structure des coûts variables de la méthode traditionnelle

Les figures 5-1 et 5-2 montrent les structures des coûts variables pour les deux technologies. L'analyse de ces figures montre que le coût des graines de néré constitue plus de 78 % des charges variables. C'est dire que le prix de vente de l'afitin en dépend largement. L'amélioration de la compétitivité de l'afitin, par rapport aux autres exhausteurs de goûts importés, passe par la diminution substantielle du prix d'achat des graines. Pour y parvenir, il faut surtout une volonté politique dans un contexte où on assiste à une compression des parcs à néré du Bénin (Gnanglè, 2005). Il est de plus en plus difficile de trouver les graines de néré sur les plateaux du sud du Bénin (Abomey, Kétou, ..., etc.). L'approvisionnement des grandes zones de transformation du néré au sud se fait à partir de la zone nord. Quand on sait que les parcs à néré du nord aussi sont constamment sous la menace de la

production des cultures de rente telle que celle du coton, il est d'une impérieuse nécessité de lancer des programmes de plantation des vergers de néré, à l'instar de ce qui se fait au Burkina Faso. Le prix d'un sac de 100 kg de néré coûte deux fois plus cher au marché de Dantokpa qu'au marché de Ouagadougou selon une étude menée en Aout 2011. C'est à la période de rareté et de cherté de la graine. A cette période, un kg de graines coûte entre 500 à 600 F (Gutierrez and June-Beaulaton, 2002). Les coûts du bois représentent 9 à 10 % de la structure des coûts variables. Cette forte consommation du bois, essentielle source d'énergie, n'est pas favorable à la promotion de la filière. L'impact négatif de l'abattage des arbres en vue de la collecte du bois de chauffe sur l'environnement pourrait constituer un frein au développement de la filière. Pour surmonter ces contraintes, des technologies simples et innovantes doivent intégrer le processus afin de réduire le coût du bois et la durée de la cuisson.

La technologie utilisant la décortiqueuse présente les coûts variables inférieurs de 2107 FCFA à ceux de la méthode traditionnelle. L'introduction de l'équipement, tout en réduisant la durée du travail, favorise la diminution des coûts de production, toutes choses favorables à l'amélioration de la compétitivité du *afitin* par rapport aux 'cubes Maggi' qui inondent nos marchés.

❖ Coûts fixes annuels

Le tableau 5-7 présente les coûts des différents équipements et les amortissements correspondants. La technologie mécanisée, en plus du petit matériel, utilise la décortiqueuse dont le coût constitue un sérieux investissement. L'amortissement annuel de la technologie mécanisée est cinq fois plus élevé que celui de la technologie traditionnelle.

Tableau 5-7. Coûts annuels des différents équipements (FCFA)

Equipements	Coût d'acquisition	Durée de vie	Annuité
Décortiqueuse	500 000	5	100 000
Petits matériel	50 000	2	25 000
Amortissement technologie traditionnelle			25 000
Amortissement technologie mécanisée			125 000

Le tableau 5-8 présente les capacités techniques de l'équipement et de la méthode traditionnelle. La capacité technique de la méthode mécanisée est 13,5 fois supérieure à celle de la méthode traditionnelle. Ce rapport justifie l'investissement à mettre en œuvre. Les coûts fixes sont constitués de l'amortissement de la décortiqueuse et des ustensiles utilisés pour la cuisson, le décortilage, le rinçage, le triage, la fermentation (tableau 5-7). L'amortissement annuel de la technologie mécanisée est 5 fois supérieure à celle de la technologie traditionnelle, mais rapporté à la quantité de graine transformée, il devient 2,7 fois inférieur.

Tableau 5-8. Coûts fixes pour 100 kg de graines (FCFA)

Libellé	Technologie	
	Mécanisée	Traditionnelle
Capacité technique (kg)	137288	10149
Annuité (FCFA)	125000	25000
Amortissement sur la base de 100 kg graines (FCFA)	91	246,32

❖ Coût de production

Le tableau 5-9 présente les coûts de production d'*afitin* à partir de 100 kg de graines et le prix de revient d'un kilogramme d'*afitin* pour les deux technologies.

Tableau 5-9 : Coût de production pour 100 kg de graines de néré transformés (FCFA)

Libellé	Technologies	
	Mécanisée	Traditionnelle
Coûts variables (A)	0	0
Amortissement sur la base de 100 kg de graines (FCFA) (B)	91	246,32
Coût de production (FCFA) (A+B)	91	246,32
Quantité d' <i>afitin</i> (kg)	100	96,66
Prix revient d'un kg (FCFA)	731,8	780,5

Le prix de revient d'un kilogramme d'*afitin* produit par la technologie mécanisée est inférieur environ de 49 FCFA par rapport à celui de la méthode traditionnelle. L'introduction de l'équipement permet

de réduire les coûts de production, à travers la baisse de coûts variables et de l'amortissements. Ceci assure les conditions favorables pour une adoption de la technologie utilisant la décortiqueuse.

5.3.2. Marge brute, marge nette et seuil de rentabilité

5.3.2.1. Marge brute et marge nette

Le tableau 5-10 présente les marges brutes et nettes de la nouvelle technologie en comparaison avec celle de la pratique traditionnelle du foulage aux pieds. Le prix de vente d'un kilogramme d'afitin est fixé à 860 FCFA. L'analyse des résultats de ce tableau montre que la technologie améliorée présente les marges brutes et nettes les plus élevées par rapport à la méthode traditionnelle. Le gain financier de l'utilisation de l'équipement par rapport à la méthode traditionnelle est estimé à 4919,5 FCFA. La caractérisation des transformatrices de graines de néré en *afitin* les classe en trois (3) catégories : les petites, les moyennes et les grandes. Les petites transforment 120 kg par mois, les moyennes 400 kg/mois et les grandes environ 800 kg/mois (Guttierez et al., 2000). Les résultats de la présente étude montrent que les marges brutes mensuelles avec l'équipement est évalué à 15420 FCFA, 51600 FCFA et 103200 FCFA respectivement pour les petites, moyennes et grandes transformatrices. Par contre, avec la méthode traditionnelle, elle est égales respectivement à 12283,2 FCFA, 40944 FCFA et 81888 FCFA. Les marges nettes obtenues avec l'utilisation de la technologie mécanisée sont estimées à 18076,8 FCFA, 60256 FCFA 120512 FCA respectivement pour les petites, moyennes et grandes classes. Avec la technologie traditionnelle, cette marge nette est évaluée à 9576 FCFA, 31920 FCFA et 63360 pour les différents groupes de transformatrices. L'évaluation économique de la technologie de transformation des graines de néré en *afitin* dans la région d'Abomey en 2000 rapporte une marge nette mensuelle égale respectivement à 16540 FCFA, 52703 FCFA et 94952 FCFA pour les trois catégories de transformatrices ci-dessus citées (Guttierez et al., 2000). La différence des marges par rapport à la présente étude est due au coût élevé de la graine de néré utilisé dans notre étude. Le prix de 100 kg de graines dans la région d'Abomey est de 35000 FCFA contre 58500 FCFA dans la présente. Dans le même temps, le prix de vente du *afitin* est 550 FCFA dans la régions d'Abomey contre 860 FCFA dans la zone d'Adjarra. Malgré ce fait, en considérant la marge nette, la technologie mécanisée est toujours plus rentable par rapport à la technologie traditionnelle dans la zone d'Abomey. En définitive, l'utilisation de la technologie améliorée permet d'augmenter le revenu, quelle que soit la catégorie de la transformatrice. Les grandes transformatrices sont susceptibles de tirer le meilleur profit de cette technologie mécanisée.

Tableau 5-10. Calcul de la marge brute sur la base de 100 kg de graines

Libellé	Unité	Technologies	
		Décortiqueuse	Traditionnelle
A. Quantité afitin de 100 kg de graines	kg	100	96,66
B. Prix de vente d'un kg d'afitin	FCFA	860	860
C. Revenus (AxB)	FCFA	86000	83187,6
D. Coûts variables	FCFA	86960	84144,26
E. Amortissement sur la base de 100 kg graines (FCFA)	FCFA	91	246,32
F. Marges brutes (C-D)	FCFA	12903,4	7983,88
G. Marge nette (F-E)	FCFA	12818,4	7737,56
Marge brute unitaire (F/A)	FCFA/kg	129	79,8
Marge nette unitaire (G/A)	FCFA/kg	128,2	77,4

Seuil de rentabilité

Dans le tableau 5-11, sont résumés les résultats des calculs menés en vue de l'obtention des seuils de rentabilité aussi bien, pour la technologie mécanisée, que pour celle traditionnelle prise en référence. Le seuil de rentabilité, en chiffre d'affaires, est élevé avec la technologie mécanisée (tableau 5-11). Ceci se justifie par le coût d'acquisition élevé de l'équipement. Pour rentabiliser les investissements pendant cinq (05) ans, il faut traiter, avec cet équipement, au minimum 968,73 kg de graines de néré par an, soit 81 kg par mois. Les trois catégories de transformatrices peuvent rentabiliser l'acquisition de l'équipement. Mais une utilisation communautaire de l'équipement est souhaitable. Ceci offrira de meilleures conditions pour la rentabilisation des investissements pour l'acquisition de l'équipement. En outre, l'utilisation de la décortiqueuse en mode de prestations de services devra favoriser une rapide rentabilisation.

Tableau 5-11. Détermination du seuil de rentabilité de la technologie proposée – comparaison avec celui de la méthode traditionnelle

Libellé	Unité	Technologie	
		Mécanisée	Traditionnelle
A. Quantité de matière première	kg	100	100
B. Revenu pour 100 kg	FCFA	86000	83187,6
C. Coûts fixes annuels	FCFA	125000	25000
D. Capacité technique	kg/an	137288	10149,4
E. Chiffre d'affaires (B*D)/A	FCFA/an	118067680	8443042
F. Marge brute pour 100 kg	FCFA	12903,4	7983,88
G. Seuil de rentabilité en chiffre d'affaires (B*C)/F	FCFA/an	833113,4	260486,12
H. Pourcentage de la capacité utilisée (G/E)*100	%	0,7	3,08
I. Quantité seuil (kg) (H*D)/100	kg	968,73	312,60

5.4 . Appréciations des transformatrices

5.4.1. Appréciations sur les performances techniques de la décortiqueuse

L'enquête sur l'efficacité de la technologie mécanisée de transformation des graines de néré en afitin a porté sur 99 % de femmes et un 1 % d'hommes. L'activité est essentiellement féminine et ces femmes s'adonnent à la production et à la vente d'afitin. Les hommes interviennent en appoint durant la phase de décortilage.

La majorité des personnes enquêtées (98 %) sont des sans instruction et celles de niveau de cours primaire. La population des transformatrices exploitées dans cette étude, à l'image de toutes celles qui se consacrent à l'activité, est globalement vieillissante. En effet, 73 % des femmes ont entre 40 et 70 ans. La pénibilité des opérations et les conditions peu attractives de production, n'incitent pas les jeunes, surtout celles scolarisés, à s'investir dans l'activité de production d'afitin.

Tableau 5-12. Appréciations des productrices sur les performances techniques de la décortiqueuse

Caractéristiques	Modalité	Fréquence	Pourcentage
Qualité du décorticage	Bonne	38	95
	Mauvaise	2	7,5
Rapidité du travail de la décortiqueuse	Rapide	40	100
	Lent	0	0
Qualité du moteur	Bonne	39	97,5
	Mauvaise	1	2,5
Mise en marche du moteur	Facile	31	77,5
	Difficile	9	22,5
Alimentation en graines	Facile	39	97,3
	Difficile	1	1,82
Entretien décortiqueuse après usage	Facile	36	90
	Difficile	4	10
Entretien périodique du moteur	Facile	25	62,5
	Difficile	15	27,5
Dimension et taille de la décortiqueuse	Adéquat	28	70
	Trop petit	2	5
	Trop grand	10	25
Résistance de la décortiqueuse	Bonne	40	100
Matériaux utilisés	Adéquat	40	100

Les résultats consignés au tableau 5-12 montrent que la majorité des transformatrices interrogées ont merveilleusement apprécié les performances techniques de la décortiqueuse. En analysant ces résultats, on retient que 95 % d'entre elles ont jugé bonne, la qualité du décorticage. Elles ont jugé facile l'alimentation en graines et l'entretien de la décortiqueuse. Dans leurs appréciations, 30 % des femmes affirment que, grâce à l'équipement, leur production a doublé, passant de 60 kg à 120 kg de graines transformées, tous les trois jours. Aussi, 100 % des transformatrices estiment-elles que l'équipement est très rapide, a une bonne résistance et les matériaux utilisés pour sa fabrication semblent bien adéquats. Certaines transformatrices (9 %) estiment que la mise en marche du moteur est difficile et 30 % ont jugé les dimensions du broyeur non adéquates. Ce groupe propose que

l'équipement soit rendu mobile pour faciliter son déplacement. Le moteur à essence type ROBIN EY20, utilisé sur la décortiqueuse, est très bien apprécié par la majorité des transformatrices. En effet, 97,5 % des utilisatrices estiment que sa qualité est bonne. Par contre, 2,5 % d'entre elles estiment que le démarrage est difficile. Evidemment, une telle remarque n'est pas surprenante. Cette réaction est justifiée par le fait que le démarrage manuel d'un moteur nécessite une technicité et un savoir faire que l'on ne retrouve pas systématiquement chez les femmes. Le tirage de la corde de démarrage manuel nécessite un effort pour surmonter la résistance de la phase de compression. Cet effort n'est pas toujours aisé surtout pour certaines femmes. L'utilisation du moteur électrique peut permettre de surmonter cette difficulté. Toutefois, cette solution ne met pas à l'abri des arrêts de travail qu'occasionneraient les coupures ou la non disponibilité de courant électrique. L'entretien de la décortiqueuse après son utilisation est jugé difficile par 10 % de personnes interrogées. L'utilisation des équipements de transformation agroalimentaire exige le respect des normes d'hygiène dont le simple lavage avant et après le travail. Ces conditions sont déjà contraignantes pour certaines femmes. Il va sans dire que ces dernières soient désormais obligées de s'en accommoder dans la perspective de modernisation progressive de la filière.

Les photos 5-7 et 5-8 sont deux images prises durant les séances de tests effectués en milieu réel de production. On y voit les femmes transformatrices de graines de néré en afitin en pleine activité aidées par un homme (photo 5-8) et en séance de collecte des appréciations à l'issue des tests (photo 5-7). Tout en appréciant les bonnes performances de l'équipement testé, les transformatrices ont souhaité qu'il soit rendu portatif afin de faciliter son déplacement pour des prestations de service.



Photo 5-6. Séance de collecte des appréciations des transformatrices



Photo 5-7. Test en milieu réel de la décortiqueuse

5.6. Conclusion et recommandations

L'étude rapportée dans ce chapitre est consacrée à l'évaluation des performances technique et économique de la technologie mécanisée de production d'*afitin*. Elle a permis d'éprouver la nouvelle technologie mise au point, de confirmer et consolider les résultats obtenus précédemment, afin d'ouvrir la voie à une large diffusion de la technologie. L'étude a été réalisée en milieu réel sous la gestion des transformatrices. Les résultats ont confirmé les bonnes performances obtenues précédemment en station sous gestion chercheur. La technologie mécanisée, utilisant la décortiqueuse proposée, augmente la capacité horaire au décorticage et le rendement en *afitin*. Elle diminue le temps des travaux, par la réduction de la main-d'œuvre. Les performances techniques de la décortiqueuse ont été bien approuvées par les transformatrices qui, à la suite des tests effectués par leurs soins, se sont déclarées prêtes à adopter cette nouvelle technologie. Une formation des transformatrices, de même que celle des potentiels fabricants l'auteur du présent mémoire, est nécessaire pour la vulgarisation de la technologie.

En perspective, il est envisagé la réalisation de la trieuse-rinceuse mise au point. Celle-ci permettra d'optimiser les performances de la chaîne de production par la technologie mécanisée. Au vu des résultats satisfaisants ainsi obtenus, il est permis d'affirmer que la technologie mécanisée est améliorée.

La conservation du produit final est la seconde contrainte à lever en vue d'impulser un souffle vital à la filière *afitin* au Bénin. Les analyses menées ont permis d'aboutir à la conclusion que la mise en cubes de l'*afitin* constitue une sérieuse option pour réussir une conservation durable de ce produit. La présentation de la presse à cubes d'*afitin* conçue, réalisée puis expérimentée et dont les performances techniques sont évaluées, fait l'objet du dernier chapitre./.

CHAPITRE 6

MISE AU POINT ET EVALUATION TECHNIQUE DE LA PRESSE A CUBES D'AFITIN

6.1. Introduction

Le néré (*Parkia biglobosa*) appelé *ahwatin* en fon est un arbre caractéristique des zones guinéennes et soudaniennes d'Afrique occidentale. C'est un arbre répandu en Afrique de l'Ouest qui s'adapte aux sols pauvres tels que des sols ferrugineux, ainsi qu'aux zones climatiques à faible pluviométrie. Cet arbre est principalement conservé pour ses fruits dont les graines, riches en protéines, occupent une place importante dans l'alimentation et la vie économique des populations locales. Toutes les parties de l'arbre, des feuilles jusqu'aux racines, sont employées dans la pharmacopée. La consommation annuelle de graines de néré au Sénégal, au Mali, en Guinée, au Bénin et au Nigéria est évaluée à plusieurs centaines de tonnes (Nago et Hounhouigan, 1997).

Les graines de néré sont utilisées dans la confection d'un condiment, appelé *afitin* au sud Bénin et *sonru* au nord. L'*afitin* présente un avantage considérable sur le plan nutritif : l'apport en protéines dans une alimentation essentiellement basée sur la consommation des céréales, des racines et tubercules (Dededji et al., 2008 ; Bell et al., 2000 ; Hounhouigan et al., 1999). Il est commercialisé non seulement sur les marchés locaux, mais aussi dans les grands centres urbains et même à l'étranger. Ce condiment est vendu sur nos marchés sous forme de boulettes. La conservation durable de ce condiment constitue, après le décorticage des graines, la seconde grande contrainte aussi bien, pour les femmes transformatrices, que les consommateurs.

L'*afitin*, l'*iru* et le *sonru* traditionnels sont des produits humides ou à humidité intermédiaire, et riches en éléments nutritifs. Ils constituent, pour ce faire, une source privilégiée de nutriments et un milieu favorable à la croissance des microorganismes responsables de la putréfaction. Celle-ci est liée à une activité de l'eau relativement élevée, une condition propice aux changements physico-chimiques se réalisant dans ces produits et rendant difficile leur conservation (Ahouansou, 2011). De plus, la présentation de ces condiments, habituellement emballés dans des feuilles végétales ou dans des papiers de ciment (sources secondaires de contamination), constitue un autre facteur de leur rejet de la part de certains consommateurs. En effet, les difficultés liées à la fabrication de l'*afitin* d'une part, et les contraintes relatives à sa conservation associées à sa mauvaise présentation de l'autre, entraînent le détournement d'une frange des consommateurs vers les releveurs de goût importés. Nul n'ignore qu'une telle importation entraîne une importante perte de devises pour le pays. Au Burkina Faso, cette perte est estimée à plus de 5 millions de dollars par an (Diawara and Jakobsen, 2004).

La conservation de l'*afitin*, de l'*iru* ou du *sonru*, sous une forme physiquement et chimiquement stabilisée de type «*afitin-cube*», peut être une alternative technologique pour lever cette contrainte.

La présente étude s'est fixée pour objectif de mettre au point et d'évaluer les performances techniques d'une presse à poudre d'afitin. De façon spécifique, il s'agit de :

- Caractériser physiquement et mécaniquement la poudre d'afitin ;
- Mettre au point et évaluer les performances techniques de la presse à afitin.

6-2. Matériel et méthodes

6-2-1. Matériel

6-2-1-1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé pour produire la poudre d'afitin est la graine de néré (*Parkia biglobosa*). Les graines tout venant sont acquises au marché de Dantokpa à Cotonou. Elles ont été récoltées à N'Dali dans le département du Borgou au nord du Bénin. Environ 100 kg de graines sont nettoyées, triées et stockées dans un sac en polyéthylène conservé au laboratoire à la température de $25\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Les analyses physico-mécaniques sont réalisées au Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA) de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) d'une part, et dans celui du Programme Technologie Agricole Alimentaire (PTAA), d'autre part.

6-2-1-2. Presse à cubes d'afitin

La presse à cubes de néré est conçue, fabriquée et testée dans le cadre de cette étude. La fabrication de la presse a été précédée de calculs de résistance des matériaux. Ces calculs ont alors permis de faire le choix rationnel des matériaux de fabrication. Les matériels utilisés sont les barres de fer cornier, les feuilles de tôle inoxydable, de vérin hydraulique et de bloc piston. Les dimensions exactes des matériaux utilisés aux niveaux du paragraphe 6-2-2-5 consacrée au dimensionnement de la presse

6-2-2. Méthodes

6-2-2-1. Préparation de l'afitin

La préparation du afitin est faite suivant le schéma technologique décrit au paragraphe 1.2 (Hounhouigan et al, 2001_b). Les graines sont cuites pendant 4 heures puis débarrassées de leurs coques avec la décortiqueuse mise au point. Les cotylédons, obtenus après le triage manuel à la terre de barre, subissent une cuisson pendant 2 h, la deuxième donc après celle appliquée aux graines entières. Les cotylédons ainsi cuits sont soumis à une fermentation anaérobie pour une

durée de 18 h. L'afitin utilisé n'est pas salé contrairement à la pratique chez les transformateurs qui font le salage pour mieux le conserver.

Un lot fait de 4 kg d'afitin est mis en séchage à l'étuve à une température de 70° C pendant 24 h. Le produit ainsi séché a été broyé et réduit en poudre à l'aide d'une meule (photographie 6.1).



Photo 6-1. : Poudre d'afitin obtenue par broyage sur une meule

La conception de la presse est effectuée à partir de la caractérisation physique et mécanique de la poudre d'afitin obtenue plus haut d'une part, mais aussi et surtout, en prenant référence sur les produits communément désignés sous le vocable de « cubes » allusion faite aux produits « Maggi ou Jumbo » de NESTLE vendus sur le marché, d'autre part.

6.2.2.2. Caractérisation physique et mécanique des 'cubes du marché'

La caractérisation physique est faite sur les cubes acquis au marché de Ouando (Porto-Novo) et sur la poudre d'afitin obtenue suivant la méthode décrite au paragraphe 6.2.2.1. Elle a porté sur les cubes de différentes marques suivantes : Maggi chicken, maggi shrimp, Jumbo poulet, Maggi cube, Maggi poulet, Jumbo crevette, Maggi crevette et Cookzen.

Cette caractérisation est effectuée à travers la détermination de la teneur en eau, des dimensions moyennes, de la masse et du volume, des masses volumiques réelle et apparente des cubes.

Pour obtenir des produits semblables aux cubes du marché, il faut compacter la poudre d'afitin. Cela requiert la détermination de la valeur de la pression à appliquer à la poudre. Pour y parvenir, la méthodologie empruntée a été celle consistant à soumettre les cubes du marché à des essais de brisure. Les valeurs des charges appliquées durant la brisure des cubes acquis sur le marché nous ont alors permis d'appréhender les ordres de grandeur de la valeur de la pression requise pour le compactage de la poudre d'afitin.

La mesure de la charge à la brisure est réalisée à partir de l'évaluation de la résistance de ces cubes aux tests de compression. Pour ce faire, nous avons utilisé un dynamomètre à ressort de marque AMANDUS KHAL de précision 0,1N dont la plage de mesures s'étale de 0 à 1500 N. Dans la

procédure de cette investigation, chaque cube est individuellement pincé entre deux plaques parallèles jusqu'à son écrasement.

La teneur en eau est évaluée en suivant les prescriptions de la norme ISO-662-1998. Un échantillon de 100 g de chacun de ces produits acquis sur le marché est moulu à l'aide du moulin RETCH. Trois (03) échantillons de 5 g chacun sont prélevés pour un séchage différentiel à l'étuve HOH-EXPRESS HE50 PFEUFFER (GERMANY) à la température de $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durant huit (08) heures. L'échantillon est pesé chaque heure, après un refroidissement de 10 à 15 mn dans un dessiccateur ISO9001, jusqu'à l'obtention de la masse constante attestée par trois (3) mesures consécutives.

La valeur de la teneur en eau, en base sèche (%), est calculée à l'aide de la formule :

$$B_{(bs)} = \frac{(m_0 - m)}{m} * 100 \quad (\%) \quad (6-1)$$

avec : - m_0 : masse initiale de l'échantillon humide (g) ;
 - m : masse de l'échantillon après évaporation d'eau (g)

Les dimensions moyennes (longueur, largeur, épaisseur) des cubes sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse FACOM de précision 0,01 mm. La connaissance des dimensions des cubes a permis d'évaluer les paramètres caractéristiques du moule à cubes, partie principale de la presse à concevoir. En effet, la presse porte une matrice constituée d'un ensemble de moules (matrice multi moules) dont le nombre est prédéfini. Chaque moule délivre un seul "cube" à chaque fin de son cycle opératoire.

6.2.2.3. Effets de la teneur en eau et de la pression sur la résistance à la brisure du cube afitin

La pression de compactage du produit est indispensable non seulement, pour l'obtention d'un produit de qualité, mais aussi pour le dimensionnement des différents éléments de la machine. Les essais ont consisté à compacter la poudre d'afitin de différentes teneurs en eau et à différentes pressions. Les essais réalisés à cet effet ont consisté à appliquer différentes charges (40 ; 60 ; 80 et 100 kg correspondant respectivement aux pressions 4,76 bars ; 7,13 bars ; 9,51 bars ; 11,89 bars) à des échantillons de poudre d'afitin de masse 8,7 g chacun avec des taux d'humidité différents dans un moule. La résistance du produit obtenu après la compression de chaque échantillon de poudre est appréciée au touché par tactile aux doigts et par sa chute d'une hauteur de 2 m. L'hypothèse de base est que le bon compactage est obtenu lorsque le produit est alors peut être manipulé sans s'effriter à la main et récupérable même après avoir subi une chute de 2 m.

Les dimensions d'un moule sont : $L \times l \times h = 33 \times 25 \times 21 \text{ mm}^3$. La longueur et la largeur de ce moule sont les dimensions correspondant à celles obtenues sur les cubes de marque Cookzen du acquises sur le marché local.

Pour faire varier la teneur en eau de la poudre d'afitin, il est ajouté aux échantillons de poudre initiale (de teneur en eau 3 %) des volumes d'eau prélevée à l'aide d'une éprouvette graduée. Ainsi, pour obtenir des taux d'humidité de 9 %, 15 % et 21 %, nous ajoutons à l'échantillon de poudre initiale, respectivement 0,57 ml, 1,2 ml et 2 ml d'eau.

6.2.2.4. Effet de la teneur en eau et de la pression sur la compressibilité de la poudre d'afitin

Les opérations effectuées dans ce cadre sont destinées à évaluer la hauteur de déplacement de piston à sa descente (ou hauteur de compression) en fonction de la pression et de la teneur en eau de la poudre d'afitin. Les résultats de ces essais ont permis d'opérer le choix de la hauteur du moule à utiliser à une teneur en eau de la poudre et une pression de compactage considérées. Les teneurs en eau expérimentées pour ces opérations sont de 7, 10, 13, 16,18 et 21% et les pressions définies de 3, 6, 9, 12, 15 et 18 bars.

La masse d'eau, à ajouter à la poudre initiale pour avoir les valeurs définies, est obtenue à partir de la formule ci-après (Parkouda et al., 2009, Diawara and Diasso, 2004) :

$$Q_e = m (H_f - H_i) / (100 - H_f) \quad (6-2)$$

avec : Q_e : la quantité d'eau à ajouter à la farine (l) ;

m : la masse de la farine initiale (g) ;

H_f : leur teneur en eau finale de la farine (%)

H_i : la teneur en eau initiale de la farine (%).

A chaque variation des facteurs liés à la teneur en eau de la poudre d'afitin et de la pression, le déplacement est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. La compressibilité de la poudre d'afitin, à une teneur en eau donnée, est évaluée au moyen de la formule :

$$\chi = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP} \quad (6-3)$$

avec V le volume du corps et P la pression appliquée.

Dans le cas de la présente étude où l'essai est effectué dans une boîte parallélépipédique à surface de base constante, la compressibilité se réduit à la formule :

$$\chi = -\frac{1}{(21-l)} \frac{dl}{dP} \quad (6-4)$$

avec l : le déplacement suivant le sens de la hauteurs (mm)

21 : la hauteur de la boite parallélépipédique.

6.2.2.5. Dimensionnement de la presse

Le dimensionnement de la presse est effectué à partir du calcul de la résistance des matériaux. Les données telles que la pression de compactage (P), les dimensions d'un lobe du moule, le nombre de lobes du moule, sont utilisées dans ces calculs. Ainsi, il a été réalisé le calcul de l'épaisseur du matériau de confection de la matrice, de la plaque de base et du bloc piston, des dimensions du support en fer cornière (Spénlé et Gourhant, 2003 ; Chevalier, 2004 ; Chevalier, 1999). Pour la fabrication, il est utilisé les matériaux et des organes tels que :

- des barres en fer cornière de 50 mm ;
- de la feuille de tôle inox de 15/10 mm ;
- de la feuille de tôle inox épaisseur 40/10 mm ;
- un vérin hydraulique de capacité 5 tonnes ;
- un bloc piston moulé, en aluminium.

Les calculs de résistance des matériaux sont présentés en synthèse en annexe 3 de mémoire.

6.2.2.6. Performances techniques de la presse

L'évaluation des performances de la presse est faite à travers les paramètres tels que la capacité horaire, la durée des opérations, la résistance à la brisure de même que la friabilité et la masse volumique des cubes. Ces paramètres de performances sont déterminés par les formules :

❖ Capacité horaire (C_H) :

Elle est calculée par :

$$C_H = M_E / t_h \text{ (kg/h)}, \quad (6-5)$$

- avec :
- M_s la masse de l'échantillon (kg) ;
 - t_h la durée du travail (h)

La durée de chaque opération est mesurée à l'aide d'un chronomètre de précision 0,1 s.

❖ Résistance à l'écrasement (N)

La mesure de la résistance à l'écrasement est effectuée à l'aide du dynamomètre AMANDUS KHAL de précision 0,001N. A cet effet, un prélèvement au hasard d'un échantillon de 20 cubes est

utilisé. Chaque cube est individuellement pincé entre les deux plateaux de l'appareil, dans la direction de l'épaisseur, jusqu'à son écrasement. La force appliquée pour l'écraser détermine alors la résistance à l'écrasement. La vitesse de la compression du cube d'afitin est constante et fixée à 5 mm/mn (Ahmadi et al., 2009_a ; Ahmadi et al., 2009_b).

❖ Dureté et friabilité (%)

La friabilité des cubes d'afitin est mesurée par la méthode Padkalzin (Zavrajnov and Nikolow, 1990). L'appareil est constitué d'une boîte métallique parallélépipédique de dimension 300 mm x 300 mm x 125 mm tournant autour d'un axe passant par une de ses diagonales. La boîte est remplie de 0,5 kg de cubes et ensuite fermée. L'axe de la boîte est tourné à la vitesse de 50 tours/mn pendant 10 mn. Le produit est récupéré et tamisé à l'aide d'une passoire de maille 0,8 mm.

La dureté des cubes est alors calculée à partir de la formule :

$$D_k = [(M - m)/M] * 100 \quad (\%), \quad (6-6)$$

avec :

- D_k : dureté (%) ;
- M : masse des cubes avant l'essai (kg) ;
- m : masse du reste des cubes après le tamisage ou refus (kg).

La friabilité (effritement) des cubes est calculée par la formule :

$$E_f = 100 - D_u \quad (\%) \quad (6-7)$$

6.2.2.7. Analyses statistiques des données et paramètres

Toutes les données sont collectées en trois (3) répétitions. Les valeurs acquises pour les différents paramètres mesurés ont été ensuite traitées, à travers les calculs des valeurs moyennes, d'écart types et de fréquences, avec les logiciels MINITAB14.

Les paramètres liés aux caractéristiques des cubes ont fait l'objet des tests de normalité (Kolgorov-Smirnov) et des tests d'homogénéité de variance (Test de Levene). Ceux qui vérifient ces deux tests ont été soumis à une analyse de variance. Dans ce cas, le test de Student Newman et Keuls est utilisé pour structurer les moyennes. Les paramètres qui n'ont pas vérifié les conditions de normalité et d'homogénéité sont soumis aux tests non paramétriques de Kruskal-Wallis.

Pour les paramètres de performances de la presse, un test de comparaison de moyennes est réalisé entre les paramètres du cube d'afitin et le cube crevette (Capéraà and van Cutsem, 1988 ; Singbo and Ahouansou, 2005 ; Adégbola et al., 2003).

6.3. Résultats et discussions

6.3.1. Caractérisation physique de "cubes du marché"

Les caractéristiques physiques et mécaniques des cubes sont illustrées par les valeurs consignées dans le tableau 6-1. L'analyse des résultats présentés au tableau 6-1 montre l'existence d'une diversité de marques d'exhausteurs de goût solides communément appelés "cubes". De par leurs formes, elles se classent en deux (02) grands groupes : cubique et parallélépipédique. On note toutefois une prédominance des cubes de marques à forme parallélépipédique sur le marché : ils constituent de 70 à 75 % des cubes vendus. Pour les exhausteurs solides de forme parallélépipédique, les longueurs varient entre 29,6 et 33,72 mm, les largeurs entre 23,15 et 25,02 mm et les épaisseurs entre 8,93 et 10,12 mm. Les exhausteurs de goût solides de forme cubique ont affiché une arête égale à 14 mm environ.

De l'avis des commerçants, il ressort que les exhausteurs de goût de forme parallélépipédiques sont beaucoup plus préférés par les clientes. Ces produits sont plus récents et leurs masses varient entre 10,13 et 10,73 g. Les exhausteurs de goût de forme cubique sont environ 2,5 fois moins lourds que les premiers. C'est la raison pour laquelle, dans le cadre de la présente étude, le choix est porté sur la forme parallélépipédique.

Les dimensions retenues pour le "cube d'afitin" sont alors de 30 mm de longueur, 24 mm de largeur et 9,5 mm d'épaisseur. Le "cube" de type "Jumbo poulet" présente la masse volumique la plus élevée 1473,32 kg/m³ contre 1314,39 kg/m³ à celui de marque "Maggi Shrimp" qui en détient la valeur la plus faible. Cette différence de valeurs entre les masses volumiques est fonction non seulement, de l'intensité de la pression, mais aussi des matières utilisées dans la fabrication du produit. La caractérisation des matières utilisées dans la fabrication des ces différents exhausteurs de goûts n'est pas abordée dans la présente étude.

Il est important de réaliser par la suite une telle étude visant à cerner tous les contours de ces produits qui s'imposent comme une partie incontournable de l'alimentation des populations rurales et urbaines de notre pays.

Ces matières constituantes déterminent aussi les pressions à la rupture des cubes. Les valeurs de la pression à la rupture des exhausteurs de goût, de forme parallélépipédique, varient entre 1,92 bars et 13,94 bars tandis qu'elles s'étalent entre 1,35 et 1,63 bars pour ceux de forme cubique.

Tableau 6-1. Caractéristiques physiques et mécaniques des "cubes" de différentes marques

Marque de «cubes »	Dimension (mm)			Masse (g)	Masse volumique (kg/m ³)	Charge à la rupture (kg)	Pression à la rupture (bars)	Teneur en eau % (bh)
	Longueur	Largeur	Epaisseur					
Cookzen	33,12±0,27	24,8±0,04	8,94±0,22	10,73±0,44	1398,33±44	119,9±7,8	13,94±0,93	11,36
Maggi Crevette	31,86±0,07	23,64±0,07	9,46±0,07	10,41±0,10	1390,32±35	28±14	3,68±1,86	8,97
Jumbo crevette	29,38±0,13	24,36±0,13	9,84±0,09	11,46±0,19	1417,13±20	14,4±3,13	1,92±0,42	7,53
Maggi Chikken (plat)	32,31±0,23	23,75±0,16	9,57±0,38	10,38±0,32	1413,91±38	25,2±3,71	3,19±0,48	9,92
Maggi poulet	32,86±0,28	24,17±0,09	8,93±0,21	10,13±0,49	1402±38	29,3±9	3,69±1,97	8,56
Jumbo poulet	29,97±0,11	24,46±0,33	9,64±0,41	10,41±0,29	1473,32±39	30±2,5	4,24±1,86	9,06
Limra	29,63±0,09	24,54±0,42	10,12±0,31	10,29±0,41	1376,03±20	15,40±2,13	2,09±0,22	7,44
Maggi Shrimp	14,83±0,18	14,33±0,37	14,68±0,42	4,10±0,05	1314,39±16	3±0,81	1,38±0,36	8,26
Maggi chicken cubique	14,27±0,36	14,17±0,10	14,51±0,39	4,08±0,07	1393±43	3,37±0,48	1,63±0,23	9,48
Maggi cube (petit)	13,73±0,52	14,11±0,55	14,32±0,42	3,98±0,11	1430,58±13	2,66±0,47	1,35±0,25	9,48

6.3.2. Caractéristiques physiques de la poudre d'afitin

6.3.2.1. Détermination de la teneur en eau et de la pression nécessaire pour le compactage de la poudre d'afitin

Le tableau 6-2 présente l'état des cubes d'afitin en fonction des valeurs respectivement de la teneur en eau et de la pression de compactage de la poudre d'afitin.

Tableau 6-2. Etat des "cubes" d'afitin en fonction de la teneur en eau et de la pression

Teneur en eau (%)	Charge appliquée (kg)	Pression correspondante (bars)	Epaisseur (mm)	Etat après la chute	Friabilité	Observation
3	40	4,76	10,5	brisé	très friable	
	60	7,13	10,2	brisé	très friable	
	80	9,51	10,1	brisé	très friable	
	100	11,89	10	brisé	très friable	
9	40	4,76	10,3	brisé	moins friable	
	60	7,13	9,7	brisé	moins friable	
	80	9,51	8,9	brisé	moins friable	
	100	11,89	8,8	entier	moins friable	
15	40	4,76	10,1	brisé	moyenne résistance	
	60	7,13	8,86	entier	moyenne résistance	
	80	9,51	8,8	entier	bonne résistance	Bonne qualité du produit
	100	11,89	8,6	entier	bonne résistance	Bonne qualité du produit
21	40	4,76	9	entier	moyenne résistance	
	60	7,13	8,5	entier	moyenne résistance	
	80	9,51	8,3	entier	bonne résistance	Sortie d'eau et d'huile
	100	11,89	8	entier	bonne résistance	Sortie d'eau et d'huile

De l'analyse de ces résultats, il ressort que la poudre d'afitin, ayant un taux d'humidité de 3 %, subit difficilement le compactage et les produits obtenus se brisent rapidement au touché. Ce taux d'humidité est donc insuffisant pour assurer la cohésion des granules de la poudre. Pour une teneur en eau de 9 %, à une charge de 100 kg, le produit obtenu est moins friable et récupérable après une chute d'une hauteur de 2 m.

La teneur en eau de 9 % s'est révélée comme la valeur minimale de la teneur en eau de la poudre permettant d'obtenir un bon cube d'afitin. La pression correspondante de 11,89 bars est la valeur maximale optimale de la pression pour la fabrication de "cube" à base de poudre d'afitin. Avec une teneur en eau de 15 %, et à partir d'une charge de 80 kg (9,5 bars), le produit obtenu résiste mieux au toucher et est récupérable à la suite d'une chute de 2 m. Cette résistance augmente au fur et à mesure que la charge augmente. C'est ainsi qu'il est constaté que le produit obtenu, sous une charge de 100 kg (11,89 bars), résiste mieux aux chocs que ceux précédemment testés sous une charge inférieure. A la pression de 15 bars et pour une teneur en eau supérieure à 15%, il est noté, lors du pressage, une certaine exsudation de l'eau et de l'huile contenues dans la poudre. Cela fait débarrasser certainement le produit de quelques éléments nutritifs. Cette teneur ne peut être retenue comme celle de référence pour effectuer le compactage de la poudre d'afitin. Il découle, de ce qui précède, que la teneur en eau de la poudre d'afitin permettant d'obtenir un bon produit doit être comprise entre 9 % et 15 %, les pressions correspondantes se situant entre 9,5 bars et 11,89 bars.

6.3.3. Effets de la teneur en eau et de la pression sur les caractéristiques physiques de la poudre d'afitin

Les paramètres physiques de la poudre les plus pertinents à considérer ici sont le tassement ou la déformation au compactage et la compressibilité,

6.3.3.1. Effets de la teneur en eau et de la pression sur la déformation de la poudre d'afitin

La figure 6-1 présente la variation du tassement de la poudre d'afitin en fonction de la teneur en eau et de la pression. Les résultats des deux paragraphes précédents ont permis de déterminer les dimensions de base du cube d'afitin et, par conséquent, celles du moule. La longueur est fixée à 30 mm, la largeur à 24 mm et la hauteur à 9,5 mm. La teneur en eau de la poudre pour un bon compactage doit être située entre 10 et 15% et la pression utile comprise entre 9,5 bars et 11,89 bars. Il s'agit à présent de déterminer la hauteur du moule de façon à ce que, après le compactage de la poudre d'afitin, la hauteur du "cube soit égale à 9,5 mm.

La figure 6-1 montre la variation de la déformation de la poudre d'afitin en fonction de la pression et de la teneur en eau.

Cette déformation croît avec l'augmentation de la pression. On note une forte ascendance quand la pression est inférieure à 3 bars. Pour les poudres à teneur en eau inférieure à 18 %, ce point détermine la limite d'élasticité. Pour la poudre de teneur en eau 18 %, ce point est égal à 1 bar. Ces points déterminant la limite d'élasticité seront, considérés par la suite dans la détermination de la compressibilité de la poudre. Dans la pratique, la teneur en eau de la poudre d'afitin à utiliser pour la production de cube sera comprise entre 10 et 13 %.

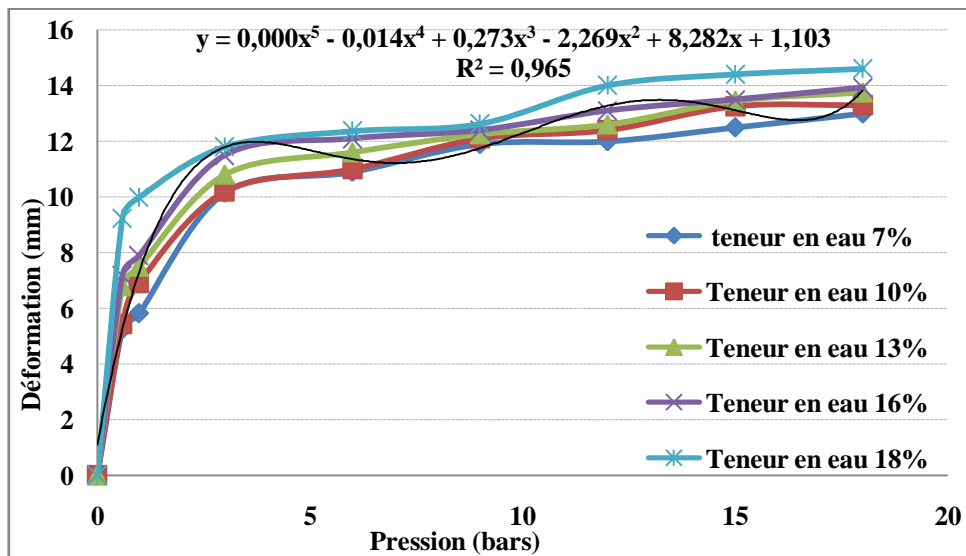


Figure 6-1. Effets de la teneur en eau et de la pression sur le tassement de la poudre d'afitin

Les équations des courbes de tendance exprimant la variation de la déformation de la poudre à teneur en eau respectives de 10 % et 13 % en fonction de la pression est déterminée par les formules :

$$y=0,0003x^5-0,0148x^4+0,2736x^3-2,2693x^2+8,2824x+1,1031 \quad (R^2 = 0,9651) \quad (6-7)$$

$$y=0,0003x^5-0,013x^4+0,243x^3-2,0335x^2+7,6333x+0,7557 \quad (R^2 = 0,9824) \quad (6-8)$$

En considérant une poudre d'afitin ayant une teneur en eau de 10 %, pour avoir un produit d'épaisseur 9,5 mm obtenu par compactage à une pression de 15 bars, il faut un moule de hauteur égale à 22,76 mm (9,5 mm + 13,2 mm). La valeur 13,26 mm étant la déformation. A la teneur en eau de 13 % et à une pression de 15 bars, la hauteur du moule est déterminée égale à 22,95 mm. Dans le cadre de la conception, la hauteur du moule est fixée à 23 mm.

6.3.3.2. Compressibilité de la poudre

La figure 6-2 présente les résultats de l'étude de la compressibilité de la poudre de néré en fonction de la pression et de la teneur en eau.

Ces résultats permettent de conclure que la compressibilité de la poudre augmente avec l'accroissement de sa teneur en eau. Elle décroît avec l'augmentation de la pression. Les équations des courbes de tendance de la compressibilité de la poudre aux teneurs en eau de 10 % et 13 % sont respectivement égales à :

$$Y = -0,0426x^2 - 0,1332x + 0,4915 \quad (R^2 = 0,999) \quad (6-9)$$

$$Y = -0,0482x^2 - 0,1507x + 0,5527 \quad (R^2 = 0,999) \quad (6-10)$$

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs au Burkina Faso ^[19] qui affirment que l'équation de compressibilité de la poudre du soumbala est de la forme $Y = ax^2 + bx + c$.

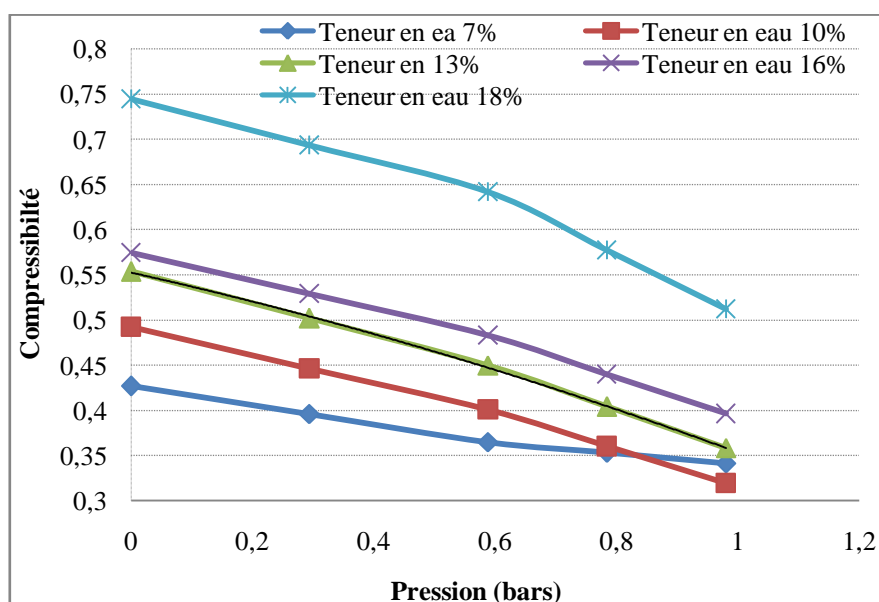


Figure 6-2. Effets de la teneur en eau et de la pression sur la compressibilité de la poudre d'afitin

La valeur moyenne de la compressibilité, à différentes pressions, détermine le coefficient de compressibilité. Les résultats de la figure 6-3 donnent l'évolution du coefficient de compressibilité de la poudre d'afitin en fonction de la teneur en eau.

Cette courbe est ascendante lorsque la teneur en eau croît. Ainsi, lorsque la teneur en eau de la poudre d'afitin augmente de 7 % à 18 % (b h), le coefficient de compressibilité croît de 0,37 à 0,48. Sa valeur est égale à 0,4 lorsque la teneur en eau est de 10 % et 0,45 lorsqu'elle est égale à 13 %.

L'équation de la courbe de tendance du coefficient de compressibilité en fonction de la teneur en eau est donnée par l'expression :

$$Y = 0,0127 X + 0,2795 \quad (R^2=0,989) \quad (6-11)$$

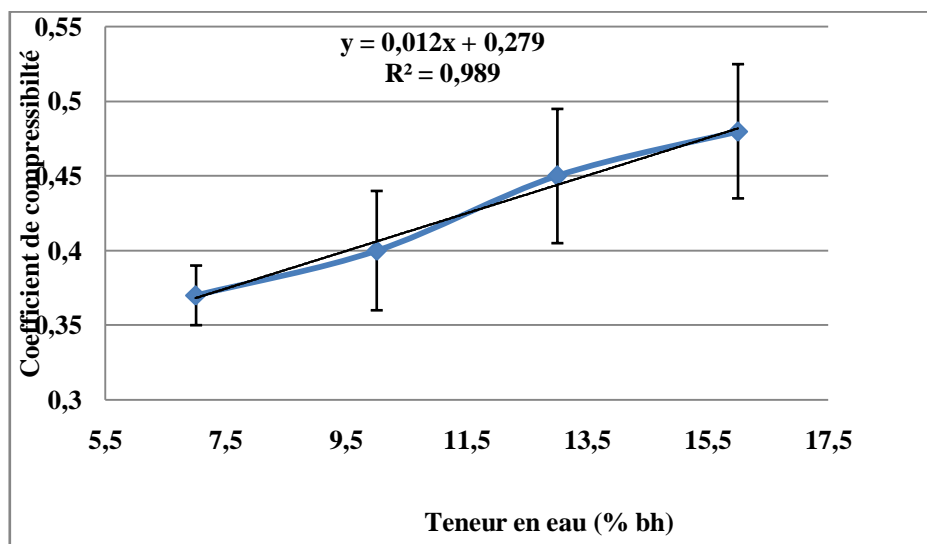


Figure 6-3. Effets de la teneur en eau sur le coefficient de compressibilité de la poudre d'afitin

6.3.4. Description de la presse

Les différentes études réalisées ont permis le dimensionnement et la mise au point de la presse manuelle à cubes d'afitin. En effet, les résultats présentés au paragraphe 6.3.1 ont permis de fixer la longueur d'un moule à 30 mm et la largeur à 24 mm. Les résultats présentés au paragraphe 6.3.2 montrent que la pression maximale pour obtenir un bon cube d'afitin est fixée à 11,89 bars. La pression de 20 bars est retenue pour le calcul de la résistance des matériaux dans le cadre de la conception des pièces de la presse et pour dimensionner ses différents éléments. Les résultats présentés au paragraphe 6.3.3.1 permettent de fixer la hauteur du moule à 23 mm. La matrice de la presse est un ensemble de moule. Dans le cadre de la conception de la presse manuelle, la matrice est composée de 100 moules.

Les résultats précédemment obtenus ont permis le calcul et le dimensionnement des différentes parties de la presse (annexe 6.1.).

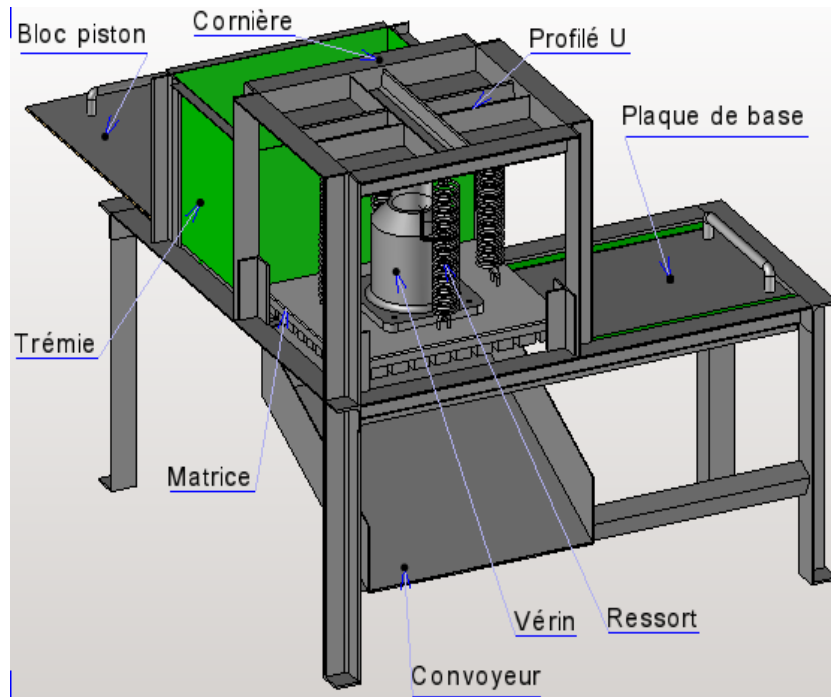


Figure 6-4. Maquette numérique de la presse à cubes d'afitin

Cette presse illustrée sur la figure 6-4 est composée des organes que sont : la matrice, le bloc piston, la plaque de base, la trémie ;le châssis, le vérin et le convoyeur.

6.3.4.1. Description des différentes parties de la presse

❖ Matrice

Elle comporte 100 moules (Figure 6-5). Les moules ont une longueur de 33 mm et une largeur de 25 mm. La hauteur de la matrice vaut 23 mm. Elle est d'une construction mécano-soudée obtenue à partir des barres en acier inoxydable de section $S = 10 \times 20 \text{ mm}^2$. Elle est en liaison glissière avec le bâti. Elle est munie d'une plaque permettant de retenir le produit dans la matrice, lorsque celle-ci est positionnée sous le bloc piston. Cette plaque est en tôle d'acier inoxydable de 4 mm.

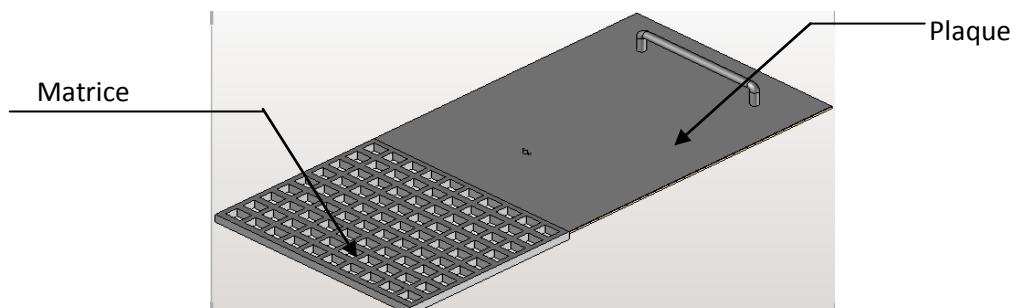


Figure 6-5. Matrice de la presse à cubes d'afitin

❖ Trémie

La trémie est en construction mécano-soudée en tôle d'acier inoxydable d'épaisseur 15/10 mm. Elle permet d'alimenter les moules en poudre.

❖ Plaque de base

La plaque de base permet de fermer les moules à leur base. Elle est faite en tôle inoxydable de 40/10 mm d'épaisseur. En liaison glissière avec le bâti, elle est munie d'une poignée permettant d'assurer son déplacement (Figure 6-6).

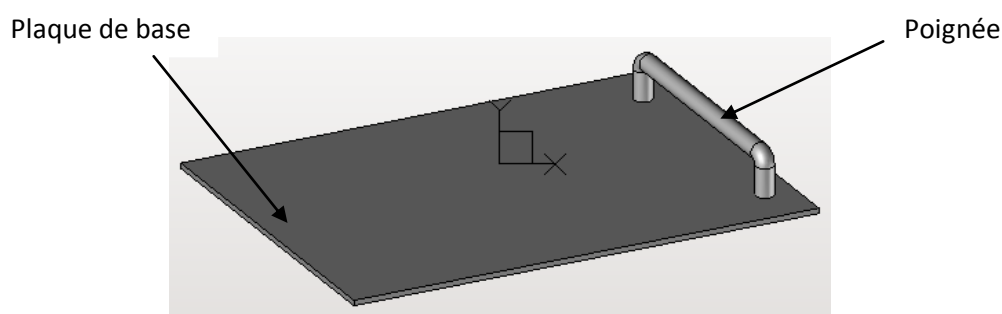


Figure 6-6. Plaque de base des moules

❖ Bloc piston et ressorts

Le bloc piston est réalisé en aluminium (Al) par le moulage. Il est renforcé par une tôle en acier de 40/10 mm. Les deux parties sont liées à l'aide de quatre (04) vis M6 comme indiqué à la figure 6-7. Quatre (04) ressorts supportent le bloc piston au repos et assurent la remontée facile de ce dernier après le pressage.

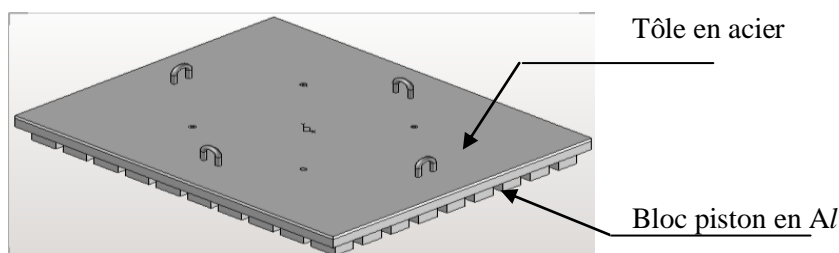


Figure 6-7 : Bloc piston

❖ Vérin hydraulique

Buté contre la partie haute du bâti, le vérin permet de déplacer facilement le bloc piston par action sur une manivelle, afin d'assurer le pressage de la poudre d'afitin pour son compactage dans les moules. Les résultats présentés en annexe nous permettent de choisir dans le catalogue du constructeur allemand de vérins hydrauliques HÄNCHEN, le vérin hydraulique "standard maison" présentant les caractéristiques techniques suivantes :

- Diamètre du piston : 100 mm,
- Diamètre de la tige : 45 mm,
- Course : 100 mm,
- Pression de service : 300 bars.

❖ **Châssis**

Le châssis est d'une construction mécano-soudée. Il est réalisé principalement avec des cornières en fer de 50x4 mm. Il sert à supporter toutes les autres composantes de la machine.

6.3.4.2. Principe de fonctionnement de la machine

Le fonctionnement de la machine est basé sur le principe illustré par la figure 6-8. En effet, la mise en forme de la poudre s'opère par l'application mécanique d'une force intensive de compression sur la masse de poudre introduite dans un moule.

Après l'alimentation de la trémie en poudre d'afitin, le cycle opératoire pour la mise en forme de la poudre en « cubes » s'effectue en suivant les six (06) étapes décrites ci-après :

- 1^{ère} étape : on réalise la fermeture de la base des moules par positionnement de la plaque de base sous la matrice ;
- 2^e étape : le positionnement de la matrice dans la trémie pour assurer le remplissage des moules ;

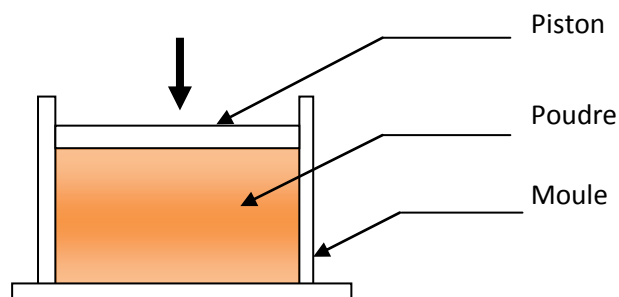


Figure 6-8. Schéma de principe du fonctionnement de la presse à cubes d'afitin

- 3^e étape : c'est celle du positionnement de la matrice sous le bloc piston ;
- 4^e étape : on effectue le pressage du produit par la descente du bloc piston au moyen du piston du vérin hydraulique ;
- 5^e étape : à la fin du pressage, on procède à la remontée de quelques millimètres du piston du vérin et à l'ouverture de la base de la matrice, par le déplacement de la plaque de base ;
- 6^e étape : on effectue la descente à nouveau du bloc piston pour assurer le démoulage. Le produit tombe dans le convoyeur et glisse vers l'extérieur.

Le cycle est terminé et peut recommencer par la fermeture de la base des moules tant que qu'il y a suffisamment de poudre d'afitin dans la trémie.

6.3.5. Performances techniques de la presse

Les résultats des études de performance technique de la presse conçue pour la mise en cubes de la poudre d'afitin sont consignés dans le tableau 6-3.

L'analyse des résultats consignés sur le tableau 6-3 montre que la longueur et la largeur du "cube" d'afitin et celles de "Jumbo crevette" ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5%. Par contre, l'épaisseur du cube Jumbo crevette est plus grande que celle du cube d'afitin. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la pression appliquée sur la poudre d'afitin (12 bars) est plus élevée que celle de Jumbo crevette (nous n'en savons pas grand-chose sur sa valeur exacte !). Il faut souligner que la valeur 12 bars appliquée est d'autant plus nécessaire que la compression de la poudre d'afitin s'effectue sans aucun additif, aucun produit liant pouvant assurer sa fermeté. Aussi, les dimensions du cube d'afitin obtenu sont-elles proches de celles prévues dans la conception : respectivement 30 mm de longueur, 24 mm de largeur et 9,5 mm d'épaisseur.

Tableau 6-3. Récapitulatif des paramètres de performances techniques de la presse à cubes d'afitin

Paramètres	Unité	Cubes afitin			Cubes Jumbo crevettes		
		L	<i>l</i>	h	L	<i>l</i>	h
Dimensions des cubes	mm ³	29,87±0,16a	23,9±0,02a	9,56±0,07a	30,14±0,13a	24,34±0,13a	9,84±0,09b
Charge à la rupture des cubes	N	30,66 ±5,67 _a			14,4±3,13 _b		
Pression à la rupture	bars	4,62±0,84 _a			1,92±0,42 _b		
Masse d'un cube	g	7,5±0,48 _a			10,23±0,19 _b		
Masse volumique d'un cube	kg/m ³	1169±173 _a			1417,13±20 _b		
Dureté	%	80,6±2,6 _a			96,4±1,2 _b		
Friabilité	%	9,4±1,4 _a			3,51±0,8 _b		
Capacité horaire	kg/h (nombre de cubes)	15 (2000 cubes)			-----		

La valeur de la pression à la rupture du cube d'afitin est 2,4 fois supérieure à celle du cube "Jumbo crevette". Ceci présage d'un bon comportement du cube d'afitin pendant les différentes manutentions (transport, stockage, manipulation). Par contre, le cube d'afitin est moins dure et plus friable que le cube "Jumbo crevette". L'absence d'un matériau liant dans la poudre d'afitin pourrait expliquer ce résultat. L'ajout de liants tels que la gomme arabique, le farine de lafou ou de blé, le sirop de sucre ou la gélatine, pourrait permettre de diminuer la friabilité du cube d'afitin. Une étude est nécessaire pour choisir un liant approprié et correspondant aux qualités organoleptiques recherchées par les consommateurs.

En définitive, le cube d'afitin est plus résistant, moins dure et plus fragile que le cube Jumbo crevette (Loncin and Merson, 1979). Les valeurs de la masse volumique et de la masse du cube d'afitin sont inférieures à celles du cube Jumbo crevette dans les proportions respectives de 21 % et 36,4 %. Les matières constituantes du cube Jumbo crevette pourraient justifier ces différences entre les valeurs massiques.

Le cycle de production de cubes d'afitin avec cette presse manuelle dure environ 3 mn et comprend les étapes telles que celles de remplissage des moules dans la trémie, de positionnement des moules sur la plaque de pressage, de pressage et de démoulage. C'est la durée requise à la production de 100 cubes, soit 2000 cubes d'afitin par heure. Cette performance, obtenue avec la presse manuelle à vérin hydraulique conçue dans le cadre de cette étude, pourrait être améliorée par une automatisation de la presse. Nous y avons réfléchi à travers sa conception, mais la réalisation et l'évaluation de ses performances techniques constituent des perspectives à ce travail. La capacité envisagée pour une version automatisée de cette machine est de 10.000 cubes par heure (annexe 4).

6.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous visions l'évaluation des caractéristiques physiques et mécaniques de la poudre d'afitin et la mise au point d'une presse pour la fabrication des cubes à base de cette poudre. Les objectifs visés ont été atteints. Les caractéristiques physiques et mécaniques du cube d'afitin sont déterminées en fonction de la teneur en eau et de la pression de compactage. Les propriétés du cube d'afitin obtenu sont comparées à celles des cubes vendus sur le marché et ont permis la mise au point de la presse dont les performances sont évaluées. Cette presse présente une capacité horaire de 2000 cubes par heure. Ces cubes à afitin ont une charge moyenne à la rupture égale à 30,66 N, une dureté égale à 80,66 % et une masse égale à 7,5 g. Une automatisation de la presse est nécessaire en vue d'un accroissement de la capacité de production.

L'évaluation des qualités organoleptiques de ces cubes n'a pas été abordée dans le cadre de cette étude ainsi que la rentabilité financière de l'activité de production et de vente des cubes d'afitin. Les cubes sont obtenus sans liants. Les études futures devront être consacrées à l'exploration de ces différents aspects non abordés dans le présent mémoire. La caractérisation des matières utilisées dans la fabrication des ces exhausteurs de goûts n'est pas non plus abordée dans la présente étude. Il est important, par la suite, de réaliser une telle étude pour cerner tous les contours de ces produits qui s'imposent comme une partie incontournable de l'alimentation des populations rurales et urbaines.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La problématique du sujet traité est de contribuer au développement de la filière néré au Bénin et dans la sous-région par la mise au point d'une décortiqueuse permettant résoudre la question du décortilage des graines et une presse à cubes de poudre d'afitin en vue de sa conservation.

Dans la démarche méthodologique adoptée, la connaissance de la matière première (graines de néré), de détermination des caractéristiques physiques et mécaniques et des procédés usitées pour sa transformation ont constitué l'ossature des activités réalisées et développées dans la première partie de ce mémoire consacrée à la revue bibliographique.

La deuxième étape des travaux rapportés dans ce mémoire a été celle consacrée à l'exploration des meilleures conditions de décortilage pouvant nous permettre d'atteindre les rendements les plus élevés qui soient. Nous y avons analysé les différentes pistes de prétraitements pour en retenir ceux applicables aux graines de néré (séchage, trempage et cuisson) d'une part, et évalué leurs effets respectifs sur les caractéristiques physiques et mécaniques des graines et des cotylédons, d'autre part. Les résultats ont montré que, lorsque la graine est soumise à la cuisson de 0 à 6 h, ou au trempage pendant 24 à 72 h, les caractéristiques mesurées, teneur en eau, dimensions moyennes (longueur, largeur, épaisseur, divers diamètres) et leurs allongements relatifs, masses et volumes de 1000-graines, masses volumiques réelles et spécifiques, porosité et aire massique, subissent différents taux d'accroissements. Pendant ce temps, le séchage impose aux graines de néré ainsi qu'à leurs cotylédons une diminution des valeurs des paramètres cités. La cuisson et le trempage en eau confèrent une augmentation au coefficient de frottement statique des graines et des cotylédons sur les tôles noire, inoxydable et la grille inoxydable. Par contre, les valeurs de l'angle statique au repos, de l'angle dynamique et de la résistance minimale à la brisure affichent une décroissance lorsque la graine et le cotylédon sont prétraités par cuisson ou par trempage à l'opposé du séchage qui en favorise l'augmentation en fonction de la durée des prétraitements appliqués.

La connaissance et la prise en compte de ces différents résultats nous ont alors permis d'effectuer la conception et l'optimisation de la décortiqueuse à graines de néré. Il s'en est suivi l'analyse de l'efficacité de la décortiqueuse à graines de néré mise au point. L'évaluation de l'efficacité a été réalisée à travers les mesures des paramètres caractéristiques des performances développés pour ce genre d'équipements de transformation dont l'indice, le taux et le rendement de décortilage et le taux de brisure des cotylédons, sur des graines de néré soumises aux différents prétraitements cités. Les résultats expérimentaux ont révélé que la cuisson en eau bouillante est le traitement le mieux adapté aux graines de néré avant leur décortilage. Les meilleures performances techniques de la

décortiqueuse ont en effet été obtenues avec les graines cuites à ébullition pendant 4 h à 6 h. En-deçà de cette plage de durées (moins de 4 h) de cuisson, les valeurs des paramètres d'efficacité délivrées par la machine durant le décortilage se sont avérées inférieures à celles fournies par le procédé traditionnel servant de référence dans la filière afitin. Il est important de noter que des combinaisons de prétraitements ont aussi été explorées. Ainsi, les résultats des essais dans lesquels le séchage (2h) est suivi du trempage (24 h) ou de la cuisson pendant 1h, ont dévoilé une amélioration appréciable de l'efficacité au décortilage. Ces traitements combinés peuvent donc être fortement recommandés dans la transformation de la graine de néré en afitin.

L'étude d'optimisation des performances techniques de la décortiqueuse mise au point a permis d'identifier les variables les plus pertinentes dans son fonctionnement d'une part, et de déterminer les valeurs optimales de ces variables que sont la vitesse de la grille et le diamètre de la trémie, de même que celles de paramètres des performances techniques de la décortiqueuse, d'autre part. Les résultats à ce niveau ont alors montré que lorsque l'équipement est calé sur une vitesse de rotation de la grille égale à 666 tr/mn et un diamètre de la trémie égal à 116 mm, les valeurs optimales des paramètres indiquent 0,91% pour l'Indice de décortilage, 96,27 % pour le Taux de décortilage, 1,47 % pour le Taux de brisure, 50,35 % pour le Rendement au décortilage, 773 kg/h pour la Capacité horaire et 702,16 kg/h pour le facteur d'efficacité.

A cette efficacité technique, il faudrait associer l'efficacité économique. Pour ce faire, des tests techniques en milieu réel couplés à l'analyse économique ont été réalisés afin d'évaluer l'acceptabilité de l'équipement par les transformatrices à travers la donnée d'indications sur les paramètres économiques qui, en dernière analyse, constituent le facteur décisionnel.

L'évaluation des performances technique et économique de la technologie mécanisée de production d'afitin a permis d'éprouver la nouvelle technologie développée, de confirmer et de consolider les résultats obtenus en station, afin d'ouvrir la voie à sa large vulgarisation. L'étude a été alors réalisée en milieu réel, sous la gestion des transformatrices. La technologie mécanisée, utilisant la décortiqueuse proposée, assure une augmentation de 14 fois la capacité horaire au décortilage et de 3,4 % le rendement en afitin. Elle réduit le temps des travaux de 14,38 HH à travers la diminution de la main-d'œuvre. Les performances techniques de la décortiqueuse sont bien approuvées par les transformatrices qui, à la suite des tests effectués par leurs propres soins, se sont déclarées prêtes à adopter cette nouvelle technologie. Toutefois, une formation des transformatrices, de même que celle des potentiels fabricants, est nécessaire pour la vulgarisation de la nouvelle technologie.

La caractérisation physique et mécanique de la poudre d'afitin élaborée a été une phase indispensable à celle de la conception et de la réalisation de la presse à cubes dont les performances ont été abordées dans la dernière partie du présent mémoire. Nous y avons décrit la détermination des caractéristiques physiques et mécaniques du cube d'afitin en fonction de la teneur en eau et de la pression de compactage. Ces propriétés physiques et mécaniques du cube d'afitin ont ensuite été comparées à celles des différents cubes vendus sur le marché afin d'évaluer les performances de la presse mise au point. Les résultats ont montré que cette presse fournit une capacité horaire de 2000 cubes par heure. Les cubes « afitin » présentent une charge moyenne à la rupture de 30,66 N, une dureté de 80,66 % et une masse moyenne égale à 7,5 g.

La mise au point de la décortiqueuse et de la presse à cubes d'afitin ouvrent ainsi la voie à la valorisation et à la promotion de l'activité de transformation des graines de néré en afitin, iru ou sonrou. Le développement de ces technologies de transformation des graines de néré, en complément aux résultats issus des travaux relatifs à la mise au point des ferments et du bac à fermentation, ouvre la voie à une modernisation de cette activité qui occupe essentiellement les femmes. Cette nouvelle technologie doit favoriser l'émergence des Petites et Moyennes Entreprise (PME) qui pourront se consacrer à la production industrielle de cubes « afitin ». Toutefois, la modernisation ainsi enclenchée par les résultats de nos présents travaux ne deviendra effective sans la concrétisation de certaines études complémentaires dont celles se rapportant notamment à :

- la conception et la réalisation d'une trieuse-rinceuse de graines de néré. Cet équipement permettra d'optimiser les performances de la chaîne de production par la technologie mécanisée ;
- l'évaluation des qualités organoleptiques des cubes « afitin » ;
- l'analyse de la rentabilité financière de l'activité de production et de vente de cubes « afitin ».
- la caractérisation des matières utilisées dans la fabrication des exhausteurs de goûts.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abgahoungba, G., et Depommier, D., 1989. Aspect du parc à Karité-Néré dans le sud Borgou (Benin) Bois et Forêts des Tropiques (222). 41- 54.
- Adégbola, P., Singbo, A., Ahouansou, R. and Savi, M.-C., 2003. Analyse socio-économique de la presse à huile de palme ‘‘ Dékanmè ‘‘. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin. N° 40. 1-9.
- Adewumi, B.A., and Igbeka, J.C., 1993. The effect of steaming on the physical and dehulling characteristics of locust bean (*Parkia biglobosa*). Tropical Agriculture (Trinidad) 70(3), 380-382.
- Ahmadi, H., Mollazaber, K., Khorshidi, J., Mohtasebi, S.S. and Rajabipour, A., 2009_a. Some physical and mechanical properties of fennel seed (*Foeniculum vulgare*). Journal of Agricultural Science. Volume 1 (1), 66-75.
- Ahmadi, H., Fathollahzadeh, H. and Mbli, H., 2009_b. Post harvest physical and mechanical properties of apicot fruits, pits and kernels (C.V. Sonnati Salmas) cultivated in Iran. Pakistan Journal of Nutrition, Vol 8 (3), 264-268.
- Ahouansou, R. H. 2011. Dossier technique de fabrication de la décortiqueuse de néré. Document technique, UAC/INRAB. 35 p.
- Ahouansou, R. H, Sanya, E. A, Bagan, G., Vianou, A. and Hounhouigan, D. J., 2010_a. Effects of cooking on some physical characteristics of nere or African locust bean (*Parkia biglobosa*) seeds. J. Applied Sciences and Technology (JAST), Vol. 15, Nos 1&2. 97-100.
- Ahouansou, R.H., Agli, C., Montcho, M. and Adékambi, S., 2010_b. Etude technique et économique de la technologie améliorée de production et de conservation des extraits aqueux de feuilles de neem, d’hyptis et de papayer. Rapport technique, MAEP/INRAB/PTAA. Porto-Novo, Bénin, 41 p.
- Ahouansou, R., Sanya E.A. et Bagan G. 2006_a. Caractérisation physique et mécanique de la graine de néré (*Parkia biglobosa*). J. Rech. Sc. Univ. Lomé (Togo). Série A, 8(1) : 131-138.
- Ahouansou, R., Houssou, P., and Singbo, A., 2006_b. Mise au point et évaluation technique de concasseur de noix de palme. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin, 51, 20- 27.
- Ahouansou, R., Singbo, A.G., Fandohan, P., and Adégbola, P.Y., 2006_c. Evaluation des performances des égreneuses à maïs au nord –Bénin. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin. N° 51. 46-53.

- Ahouansou, R., 2005. Optimisation des performances des équipements agroalimentaires: application à la décortiqueuse de néré. Mémoire de DEA. Université d'Abomey - Calavi. 57 p.
- Ajayi, A.O., 1991. Design of a thresher for locust bean seed. *Agricultural Mechanisation in Asia, Africa and Latin America*, 22(3), 21-24.
- Alihonou, S. D-V., 2006. Contribution à la valorisation technologique et nutritionnelle de la graine de néré (*Parkia bigobosa*): Effet du décortilage mécanique sur le procédé et la qualité du afitin. Thèse pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome. Université d'Abomey-Calavi. 55p .
- Akani, A.O., Ohanwe, C. N. and Omoniyi, I.O., 2000. Determination of optimum impact for decortication of bambara groundnut: *Proceedings of the Nigerian Institution of Agricultural Engineers*. 22, 87-89.
- Anonyme, 2006. Orientations stratégiques de développement du Bénin, 2006-2011. 86p
- AOAC., 1980. Official methods of analysis. 13th edition. Association of Official Analytical Chemist. Washington D. C.
- Altuntaş, E. and Yildiz, M., 2005. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of faba bean (*Vicia faba L.*) grains. *Journal of Food Engineering*. 78, 174-183.
- Atiku, A.A., Aviara, N.A. and Haque, M.A., 2004. Performance evaluation of bambara ground nut sheller. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript PM 04 002. 6, 1-17.
- Audu, A., Oloso, A. O. and Umar, B., 2004. Developpement of a Concentric Cylinder Locust Bean Dehuller. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript PM 04 003. Vol.VI; 11p.
- Aviara, N.A., Oluwole, F.A. and Haque, M.A., 2005. Effect of moisture content on some physical properties of sheanut (*Butyrosperm. Paradoxum*), *Int. Agrophys.*, Vol. 19; 193-198.
- Aviara, N. A., Haque, M. A. and Izge, I. A., 2000. Physical and frictional properties of sheanut. *Agro-science Journal*. Vol 1, N° 2 (2000). 19-34.
- Aviara, N. A., Gwandzang, M. I. and Haque M. A, 1999. Physical properties of guna seeds. *J. Agric. Eng. Res.* 73. 105-111.
- Aydin, C., 2002. Physical properties of hazel nut. *Biosystems Engineering*, 82, (3), 297-303.
- Azokpota, P., Hounhouigan, D.J., and Nago, M.C., 2006a. Microbiological and chemical changes during the fermentation of African locust bean (*Parkia biglobosa*) to produce afitin, iru, and sonru, three traditional condiments produced in Benin. *International Journal of Food Microbiology*; 107; 304-309.

- Azokpota, P., Hounhouigan, D.J., Nago, M.C, and Jakobsen, M., 2006_b. Esterase and protease activities of *Bacillus* spp from afitin, iru and sonru, three African locust bean (*Parkia biglobosa*) condiments from Benin. African Journal of biotechnology 5 (3), 265-272.
- Azokpota, P., 2005. Etude de la dynamique physico-chimique et microbiologique de la fermentation des graines de néré (*Parkia biglobosa*) pour la production de l'afitin, de l'iru et du sonru. Thèse de Doctorat unique. Université d'Abomey-Calavi (Bénin)- Université Royale, Agricole et Vétérinaire de Copenhague (Danemark), 171 p.
- Azokpota, P., Hounhouigan, D.J., Nago, M.C., 2001. Etude comparative des systèmes techniques de production Fon et Yoruba au Bénin. (2001). Actes de l'Atelier Scientifique Post-Récolte 2001. Bohicon 26 – 27 juillet 2001. 278-286.
- Bamgboye, I. A. and Adejumo, O.I., 2011. Physical properties of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seed. Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal. Manuscript 154. Vol 9.
- Bäumler, E., Caniberti, A., Nolasco, S.M. and Riccobene, I.C., 2006. Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. Journal of Food Engineering. 72, 134-140.
- Bart-Plange, A. and Barye, E.A., 2003. The physical, properties of category B cocoa bean. Journal of Food Engineering. Vol 60, 219-227.
- Baryeh, E. A., 2001. Physical properties of bambara groundnuts. J. Food Eng., N°47; 321-326.
- Bationo, F., Son, G. et Diawara, B., 2004. Presse hydraulique à cubes de soubala. In Diawara, B. & Jakobsen, M. (2004). Valorisation technologique et nutritionnelle du néré ou *Parkia biglobosa* (Jacq.) benth : une espèce agroforestière. ISBN 0796-6954. pp 151 - 154.
- Beaumont, M., 2002. Flavouring composition prepared by fermentation with *Bacillus* spp., International Journal of Food Microbiology 75:189-196.
- Bell, A., Mück, O. and Schuler, U., 2000. Les richesses du sol. Fondation Allemande pour le Développement International.gtz Ph Action, 237 p.
- Bellianchicov, N. N., 1990. Mécanisation de l'élevage et de la préparation du fourrage. 366 p.
- Bup, D. N., Kapseu, C., Tenin, D., Kuitche, A., Abi, C. F. and Tchiegang, C. 2008. Variation of the physical properties of sheanut (*Vitellaria Paradoxa Gaertn.*) kernels during convective drying. International Journal of food Engineering. Vol 4 (7), 1-18.
- Çalışır S., Marakakoğlu T., Öztürk. Ö. & Öğüt H. 2005. Some physical properties of safflower seed (*Carthamus tinctorius* L.). Ziraat Fakültesi Dergisi . Vol 19 (36), 87-92.
- Campbell-Platt, G., 1980. African locust bean (*Parkia* species) and its West African fermented food product, dawadawa. Ecology of Food an Nutrition, 9: 123-132.

- Capéraà, P. and van Cutsem, B., 1988. Méthodes et modèles en statistique non paramétrique: exposé fondamental. Edition Dunod, Presses Université de Laval. 388 p.
- Çarman, K., 1996. Physical properties of lentil seed. Journal of Agricultural Engineering Research , 63, 87-92.
- Chasseray, P., 1991. Caractéristiques physiques des grains et de leurs dérivés in : Les industries de première transformation des céréales: Technique et documentation – Lavoisier ISBN : 2 – 85206 – 610 – 6 ; 105 - 144.
- Chevalier, A., 2004. Guide du dessinateur industriel. Hachette technique, ISBN 2 01 16 8831 0, 335 p.
- Chevalier, A., 1999. Guide du dessinateur industriel. Hachette technique, ISBN 2 01 16 7583 9, 319 p.
- Coskuner, Y. and Karababa E., 2007. Some physical properties of flaxseed (*Linum usitatissimum L.*). Journal of food Engineering 78, 1067-1073.
- Dah-Dovonon, J. Z. 2000. Espèces Ligneuses Alimentaires au Bénin in Réseau « Espèces Ligneuses Alimentaires » Compte rendu de la première réunion du Réseau tenue 11-13 décembre 2000 au CNSF Ouagadougou, Burkina Faso Institut International des Ressources Phytogénétiques.
- Dededji, M.M., Ahouansou, R.H. and Hounhouigan, D.J., 2008. Evaluation des performances d'un granuleur mécanique pour la production du wassa-wassa, un cous-cous à base de farine de cosette d'igname. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin.59, 49-58.
- Despande, S. D., Bal, S., and Ojha, T. P., 1993. Physical properties of soybean. J. Agric. Eng. Res., N°56, 89-98.
- Despande, S. S., Sathe, S. K., Salunkhe, D. K. and Cornforth, D. P., 1982. Effect of dehulling on phytic acid, polyphenols and enzyme inhibitors of dry beans. J. Food Sci. 47, 13-46.
- Diawara, B. et Diasso, K., 2004. Bilan de matières dans le procédé traditionnel de production du Soumbala. In Valorisation technologique et nutritionnelle du néré ou *Parkia biglobosa* (Jacq.) benth : une espèce agro forestière. Diawara B. et Jakobsen M. (eds.), ISSN 0796-6954, DANIDA-KVL-CNRST/IRSAT; 133 -142.
- Diawara, B., and Jakobsen, M., 2004. Valorisation technologique et nutritionnelle du néré ou *Parkia biglobosa* (Jacq)Benth : une espèce agroforestière. ISBN 0796-6954. 174 p
- Diawara, B., 1993. Contribution à l'étude du procédés traditionnels de fabrication des "soumbala" au Burkina Faso . Aspects biochimiques, microbiologiques et technologiques. Science et technologie, Vol 20 (2), 5–14.

- Dursun, E. and Dursun, I., 2005. Some physical properties of caper seed. *Biosystem Engineering* 92 (2), 237-245.
- Dutta, S. K., Nema, V. K. and Bhardwaj, R. K., 1988. Physical properties of gram. *J. Agric. Eng. Res.*, 39, 259-268.
- Fliedel, G., Monti A. and Thesbant, S. 1996. Caractérisation et valorisation du sorgho Montpellier, CIRAD – CA 404p (ISBN 2 – 81614 -2171).
- Fliedel, G., Grenet, C., Gontard, N. and Pons, B., 1989. Dureté, caractéristiques physico-chimiques et aptitudes au décorticage des grains de sorgho. Montpellier, France : Laboratoire de technologie des céréales, IRAT-CIRAD. 45-50.
- Fraser, B.M., Verma, S. S. and Muir, W.E., 1978. Some physical properties of fababean. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23, 53-57.
- Gnanglè, P. C., 2005. Parcs à karité (*Vitellaria paradoxa*) (Gaertn. C. F.) (Sapotaceae) au Bénin : Importance socio-culturelle, caractérisation morphologique, structurale et régénération naturelle. Mémoire de DEA. UAC/FSA, 113 p.
- Godon, B., and Willan, C., 1991. Les industries de première transformation des céréales: Technique et documentation – Lavoisier ISBN : 2 – 85206 – 610 – 6. 679 p.
- Gupta, R.K., and Das, S.K., 1998. Friction coefficients of sunflower seed and kernel on various structural surfaces. *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol 71, 175-180.
- Gutierrez, M.-L.,and June-Beaulaton, D., 2002. Histoire du parc à néré sur le plateau d'Abomey (Bénin) : de sa conservation pour la production à la commercialisation d'un condiment, l'afitin. *Cahiers d'Outre-mer* , Bordeaux, 220, 453-474.
- Gutierrez, M. L., Maïzi, P., Nago, M. et Hounhouigan, J., 2000. Production et commercialisation de l'afitin fon dans la région d'Abomey.-Bohicon au Bénin. CERNA, CNEARC, CIRAD. Rapport. 123 p.
- Hazell, P., 2006. *Revue Spore* N° 125. Octobre 2006. 16 p
- Hokpins, H.C., 1983. Taxonomy, reproductive biology and economic potential of *Parkia* (leguminosae : mimosoideae) in Africa and Madagascar. *Bot. J. of the Linnean Society*,87. 135-167.
- Hongbete, F., and Hounhouigan, D. J., 2003. Valorisation de la technologie du afitin : amélioration de la fermentation et mise au point d'exhausteur de goût. Communication à l'Atelier Scientifique Post-Récolte. Bohicon, 2003.
- Hounhouigan, D. J., Ahouansou, R. and Madode, Y., 2004. Test d'adaptation en station d'une décortiqueuse de néré pour la production de « Afitin » au Bénin. Rapport technique. 10 p.

- Hounhouigan, D. J ; Assadevo, P. L., Azokpota , P., Nago, M.C. and Jacobsen, M., 2001_a. Changements physico-chimiques et microbiologiques au cours de la fermentation du afitin fon un condiment béninois à base de néré (*Parkia biglobosa*) ou du soja (*Glycine max*). Actes de l'Atelier Scientifique Post-Récolte 2001. Bohicon 26 – 27 juillet 2001. 269-277.
- Hounhouigan, D. J., Assadevo, L.C., Hongbeto, F., Azokpota, P., Nago, M.C and Jacobsen, M. 2001_b. Caractérisation physico-chimique et perspectives de valorisation de l'afitin au Bénin. Actes de l'Atelier Scientifique International sur la Recherche-Développement sur les Technologies Post-Récolte en Afrique. 295p.
- Hounhouigan, D.J., Kayode, P., Nago, C.M. and Mestres, C., 1999. Etude de la mécanisation du décorticage du maïs pour la production du mawè. Annales des Sciences Agronomiques du Bénin.2, 99-113.
- Hounkpèvi, R.Y., 2009. Effet du décorticage mécanique des graines de néré (*Parkia biglobosa*) sur la qualité microbiologique, physico-chimique et organoleptique de l'afitin. Mémoire de Thèse d'Ingénieur Agronome. Université d'Abomey-Calavi. FSA.Bénin. 49 p.
- Hucl, P., Han, H.L., Abdelaal, E.M., and Hughes, G.R., 2001. Development and quality of glabrous canaryseed. Final Report. 27-35.
- Ikegwuoha, H.C., 1998. Design, construction and testing of a dehuller for African bread fruit seed. M.Sc. Thesis University of Ibadan, Nigeria.
- International Standard Organisation, ISO-662, Geneva, Switzzland, 1998.
- International Standard Organisation, ISO-520, Geneva, Switzerland, 1998.
- IRSAT, 2009. Fiches techniques de présentation de quelques technologies du département mécanisation de l'IRSAT/CNRST. Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologie ; Département de mécanisation. 12 p.
- IRSAT, 2008. Fiches techniques soumbala. Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologie ; Département de mécanisation. 11 p.
- Jha, S.N., Kingsly, A.R.P., and Chopra, S., 2006. Physical and mechanical properties of mango during growth and storage for determination of maturity related to robot's haversting. Journal of Food Engineering. 72, 73-76.
- Joshi, D. C., Das, S. K., and Mukherjee, R. K., 1993. Some physical properties of pumpkin seed. J. Agric. Eng. Res. 54, 219-229.
- Kaleemullah, S., 1992. The effect of moisture contents on the physical properties of groundnut kernels. Tropical Sciences Vol 32, 129-136.

- Kashaninejad, M., Ahmadi, M., Daraei, A., and Chabra, D., 2008. Handling and frictional characteristics of soybean as function of moisture content and variety. *Powder. Technology* 188 (1):1-8.
- Kone, S., 2001. Fabrication du "Soumbala". *Gate information service / gtz.* 4p
- Lawton, P. J., 1980. Coefficient of friction between cereal grain and various silo wall materials. *J. Agric. Eng. Res.*, 25, 75-86.
- Lemonier, D. and Ingenbleck, Y., 1989. Les carences nutritionnelles dans les pays en voie de développement . ACCT, communication présentée aux 3ème Journées Scientifiques Internationales du GERM, Nianig (Sénégal), 4-9 Octobre 1979. 613 p.
- Leniges, H. A. and Beverlov, W. A., 1975. *Food process engineering.* D. Radel, Dordrecht, : 169 - 188.
- Li, Z., Li, P. and Liu, J., 2011. Physical and mechanical properties of tomato fruits as related to robot's harvesting. *Journal of Food Engineering.* 103, 170-178.
- Lingani-Sawadogo, H., Diawara, B., Ganou, L., Gouyahali, S., Halm, M., Amoa-Awua, W.K. and Jakobsen, M., 2003. Effet du décorticage mécanique sur la fermentation des grains de néré (*Parkia biglobosa*) en soumbala. *Ann. Sci. Agronomiques du Bénin* (5)1, 67-84.
- Loncin, M. and Merson, R. L., 1979. *Food engineering.* Academic Press, New York, 246-264.
- MAEP, 2009. Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole au Bénin. Rapport technique. 130 p.
- Mankanjuola, G. A., 1972. A study of some of the physical properties of melon seed. *Journal of Agricultural Engineering Research* , 17, 128-137.
- Marouzé, C., 2004. Performances du Décortiqueur à néré CIRAD . Rapport technique; 15p.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Hariot, P. 1986. *Unit operations of chemical Engineering.* New York : McGraw-Hill. 56 -75.
- Mohsenin, N. N., 1980. *Physical Properties of Plant and Animal Materials.* 2nd edition (revised). Gordon and Breach Science Publishers. New York.
- Montcho, D.M. and Ahouansou, R., 2001. Etude des performances techniques de deux types de moulins à condiments. Rapport technique.MAEP/INRAB/PTAA.
- MPDEPP, 2008. Impact de la crise mondiale sur le développement économique et social du Bénin. Ministère d'Etat chargé de la Prospective, Développement et de l'Evaluation des Politiques Publiques. Rapport technique ; 210 p.
- Nago, C.M. et Hounhouigan, D.J., 1997. Etude technique et socio-économique de la filière "afitin" au Bénin. Projet ALISA. Rapport technique.

- Nelson, S. O., 1986. Moisture dependent kernel and bulk density relationship for wheat and corn. Transaction of the SAE. 23; 139-143.
- Nimkar, P.M. and Chattopadhyay, P.K., 2001. Some physical properties of green gram. Journal of Agricultural Engineering Research, 80(2). 183-189.
- Odigboh, E.U., 1979. Impact Egusi Shelling Machine. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 22, 1264-1269.
- Odufa, S.A., 1985. Dawadawa. In : Legume-based fermented foods, N.R. Reedy, M.D. Pierson and O.K. Solunke (Editors). CRC Press Inc., Boca Raton. 12p.
- Ogunjimi, L. A. O., Aviara, N. A. and Aregbesola, O. A., 2002. Some engineering properties of locust bean seed. J Food. Eng 55(2), 95-99.
- Ögüt, H., 1998. Some physical properties of white lupin. Journal of Agricultural Engineering Research, 69, 273-277.
- Oje, K., 1994. Moisture dependence of some physical properties of cowpea. Ifè Journal of Technology, 4, 23-27.
- Oje, K., 1993. Some engineering properties of thevetia nut. Journal of Agricultural Engineering Research and Technology, 1, 38-45.
- Oje, K. and Ugbor, E. C., 1991. Some physical properties of oil bean seed. J. Agric. Eng. Res., 76(4), 419-421.
- Ojo, S.O., 1989. Improvement and evaluation of a locust bean dehuller. Unpublished M.Sc. dissertation, Department of Agricultural Engineering, University of Ibadan, Nigeria, 35-55.
- Okokon, F.B., Oduh, M.A. and Akpan, N.A., 2007. Investigation of Force Required to crack Melon seed Shell by Static Loading. Advanced Materiel Research, 18-19, 187-192.
- Olajide, J.O. and Ade Omowaye, B.I.O., 1999. Some physical properties of locust bean seed. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol 74, 213-215.
- Oloso, A.O., 1988. Design, Fabrication and Evaluation of a steamer and dehuller for locust bean. Unpublished M.Sc. dissertation, Department of Agricultural Engineering, University of Ibadan, Nigeria. 25-40.
- Oluwole, F.A., Abdulrahim, A.T. and Alalere, R.K., 2007. Evaluation of some Centrifugal Impaction Devices for Shelling Bambara Groundnut. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript PM 07 007. Vol. IX. 14 p.
- Oluwole, F.A, Aviara, N.A. and Haque, M.A., 2004. Development and performance tests of sheanut cracker. Journal of Food Engineering. 65, 117-123.

- Omobuwajo, T.O., Akande, E.A. and Sanny, I. A., 1999. Selected physical, mechanical and aerodynamic properties of African breadfruit (*Treculla Africana*) seeds. Journal of Food Engineering, 40, 241-246.
- Opoku, A., Tabil, L., Sundaram, J., Crerar, W.J. and Park, S.J. 2003. Conditioning and Dehulling of Pigeons Peas and Mung Beans. Presentation at the CSAE/SCGR 2003. Meeting Montreal, Québec. 16 p.
- Orguven, F. and Kubilay, V., 2004. Some physical, mechanical and aerodynamic properties of pine (*Pinus pinea*). Journal of Food Engineering. Vol 68, 191-196.
- Osunade, J. A. and Lassisi, F. 1994. Coefficient of friction of maize and sorghum grains on laterized concrete wall. NSE Technology Transaction, 29, 50-57.
- Ouédraogo, A. S., 1995. *Parkia biglobosa* (Leguminosae) en Afrique de l'Ouest: Bio système et Amélioration. Institute for Forestry and Nature Research, Wagennigen, The Netherlands.
- Oyelade, O.J., Odugbenro, P.O., Abioye, A.O. and Raji, N.I., 2005. Some physical properties of African star apple (*Chrysophillum alibidum*) seeds. Journal of food Engineering 67, 433-440.
- Ozdemir, F. and Akinci, I., 2004. Physical and nutritional properties of four major commercial Turkish hazelnut varieties. Journal of food Engineering 63, 341-347.
- Paksoy M. and Aydin, C., 2004. Some physical, properties of Edible squash seed Journal of Food Engineering. Vol 65(2), 225-231.
- Parkouda, C., Nielsen, S.D., Azokopta, P., Ouba, L.Y.I., Amora-Awua, W.K., Thorsen, L., Hounhouigan, J.D., Jensen, J. S., Tano-Debrah, K., Diawara, B. and Jakobsen, M. 2009. The microbiology of alkaline-fermentation of indigenous seeds used as food condiments in Africa and Asia. Critical Reviews in Microbiology, Vol. 35, No 2, 139-156.
- Peker, A., 1996. The determination of some physical properties of corn kernel. Selcuk University. The Journal of Agricultural Faculty. Vol 10 (12), 22-65.
- Phirke, P. and Bhole, N. G., 2000. Pretreatment of pigeon pea grain for improvement of dehulling characteristics. In International Journal of Food Science & Technologie, Volume 35, Issue 3, 305 p.
- PNUD, 2011. Rapport sur le développement humain ; Durabilité et équité : un meilleur avenir pour tous ; 202 p.
- Rateau, N., 1995. Etude de la valeur nutritionnelle du néré ou « *Parkia biglobosa* ». Mémoire de DESS en Nutrition et Alimentation dans les pays en développement. Université des Sciences. Montpellier II- France. 33-45.

- Rateau, N., 1993. Dynamique sociale et stratégies nutritionnelles : La place du néré (*Parkia biglobosa*) dans l'alimentation des populations de la savane ivoirienne. Mémoire de maîtrise en sciences sociales, Université des Hautes Etudes en Pratiques Sociales, Paris III, France. 23 – 30.
- Razzavi, S.M.A., Amini. M.A., Rafe, A., and Emadzazadeh, H., 2007. The physical properties of pistachio nut and its kernel as a function of moisture content and variety. Part III: Frictional properties. *Journal of Food Engineering*. Vol 81, 226-235.
- Reichert, R.D., Oomah, B.D. and Youngs, C.G., 1979. Factors affecting the abrasive-type dehulling of grain legumes investigated with a new intermediate- sized batch dehuller. *J.Food Sci.* 49: pp: 267-272.
- Sacilik, K., Ozturk, R., and Keskin, R., 2003. Some physical properties of hemp seed. *Biosystems Engineering* 86 (2), 191-198.
- Sanou, H., Picard, N., Lovett, P. N., Dembélé, M., Korbo, A., Diarisso, D. and Bouvet, J. M., 2005. Phenotypic variation of agromorphological traits of the shea tree, *Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn, in Mali. Genetic resources and crop evolution. 125-130.
- Sanya, E. A., Ahouansou, H. R., Bagan, G. and Vianou, A., 2009. Effets du débit d'alimentation et de la vitesse de grille motrice sur les performances d'une décortiqueuse de graines de néré «*Parkia biglobosa*». *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo)*, 2009, Série A, 10(1), 1-11.
- Seyed, M.A., Razzavi, I. and Milani, E., 2006. Somme physical, properties of watermelon seeds. *African Journal of Agricultural Research* . Vol 1 (3), 65-69.
- Shepherd, H. and Bhardwaj, R. K., 1986. Moisture dependent physical properties of pigeon pea . *J. Agric. Eng. Res.*, 35, 227-234.
- Shyeth, B. J., Rodda, E. D. and Nelson, A. J., 1980. Evaluation of new soybean dehuller. *Transactions of American society of Agricultural Engineers*, 23: 523 –528.
- Sibidou, S., Joly, H.I. et van der Maesen, L.J.G., 2004. Etude de la diversité génétique du *Parkia Biglobosa* (Jacq.) Benth. : Implications pour la conservation des ressources génétiques ; In Vodouhe, R. ; Atta-Krah, K. ; Achigan-Dako, G.E. ; Eyog-Matig, O. and Avohou, H. 2004. Plant genetic resources and food security in West and Central Africa. Regional Conference, 26-30; April 2004.
- Singbo, A.G. and Ahouansou, R., 2005. Etude de faisabilité de l'implantation d'un atelier mécanisé de production de beurre de karité au Bénin (Afrique de l'Ouest). *Bulletin de Recherche Agronomique du Bénin*. N° 50. 38-45.

- Spéné, D., Gourhant, R., 2003. Guide de calcul en mécanique. Hachette technique, ISBN 2 01 16 88353, 272 p.
- Suthar, S. H. and Das, S. K., 1996. Some physical properties of karingda seed. J. Agric Eng. Res., Res., 54, 219-229.
- Thomson, R. A., and Isaacs G. W., 1967. Porosity détermination of grains and seeds with air comparasion pycnometer. *Transactions of the ASAE*. 10. 693-696.
- Traoré Z., Son, G. et Diawara, B., 2004. Décorticage mécanique des graines de néré. In Valorisation technologique et nutritionnelle du néré ou *Parkia biglobosa* (Jacq.) benth : une espèce agro forestière. Diawara B. et Jakobsen M. (eds.), ISSN 0796-6954, DANIDA-KVL-CNRST/IRSAT, 145-150.
- Tsang-Mui-Chung, M., Verma, M.R., and Wright, M.E., 1984. A device of friction measurement of grains. *Transaction of ASAE*, 27, 1938-1941.
- Vantomme, P. 1999. Activités relatives aux produits forestiers non ligneux. OIBT, Actualités des Forêts Tropicales ; 7 : 25-3.
- Vilche, C., Gely, M. and Santalla, E., 2003. Physical properties of quinoa seeds. *Biosystems Engineering* 86 (1), 59-65.
- Wiemer, H-J., 1995. Analyse économique et financière du système Pourghère au Mali. Projet Pourghère DNHE-GTZ, Bamako, Mali. 22 p.
- World Bank, 2005. Benin Poverty Assessment. Report No. 28447- BEN ; 25-45.
- Zavrajnov, A.I., and Nikolow, D. I., 1990. Mécanisation de la préparation et de la conservation des fourrages. ISBN-5-10-000761-3. 336 p.

Références webographiques

CNUCED : Centre des Nations Unies pour le Commerce et le Développement, 2003. Informations de marché dans le secteur des produits de base. Informations sur le karité. Disponible sur <http://r0.unctad.org/infocomm/francais/karite/culture.htm#rendements>. Consulté, le 23 Février 2010.

Devenet, 2001. Mieux connaître le soubala pour en faire un meilleur usage. La plate-forme de communication et de formation sur le développement. Disponible sur Internet : <http://www.virtualcentre.org/ru/library/search.asp>

Infogate: Flux comparatif des différentes opérations de fabrication du sumbala de néré selon traditionnels et améliorés. Disponible sur Internet : <http://www.gtz.de/gate/>. Consulté le 23 Octobre 2011.

Michel, P., 1999. Le néré d'Afrique étudié à Ploufragan. Disponible sur Internet : <http://www.espace-sciences.org/1993>. Consulté le 28 Septembre 2010

ONU (Organisation des Nations Unies), 2005. Les objectifs du Millénaire pour le développement. <http://.un.org/french/millennium goal> . Consulté, le 18 Mars 2011

ANNEXES

Annexe 1. Production scientifique

❖ Publications

R.H. Ahouansou, E.A. Sanya, G. Bagan ; A.. Vianou and D.J. Hounhouigan (2010). Effects of cooking on some physical characteristics of nere seeds or african locust beans (*parkia biglobosa*). Journal of Applied Science and Technology (JAST), Vol. 15, Nos. 1 & 2, pp. 93 – 100.

Sanya E. A., Ahouansou R.H., Bagan G. and Vianou A.2009. Effets du debit d'alimentation et de la vitesse de grille motrice sur les performances d'une decortiqueuse de graines de nere «Parkia biglobosa» J. Rech. Sci. Univ. Lome (togo), 2009, serie a, 10(1) : 1-11

Ahouansou R.H., Sanya E.A.et Bagan G.C. 2006. Caractérisation physique et mécanique de la graine de néré (*Parkia biglobosa*). Journal Recherche Scientifique. Université Lomé. Série A 8(1) : 131-138

❖ Communications éditées

Ahouansou R.H., Sanya E.A. Bagan G. Vianou A. et Hounhouigan D.J. 2009. Effets de la cuisson à eau sur quelques caractéristiques physiques des grains de néré (*Parkia biglobosa*). Actes du 2ème colloque de l'UAC des Sciences, Cultures et Technologies ; 26 au 29 mai 2009 à Abomey-Calavi, Vol 2 ; 60-71.

❖ Article soumis pour publication à “ International Journal of Food Engineering”

Ahouansou R.H., Sanya E.A. Bagan G. Vianou A. et Hounhouigan D.J. Effect of pretreatment of African locust bean seeds (*Parkia biglobosa*) on the technical efficiency of a dehuller.

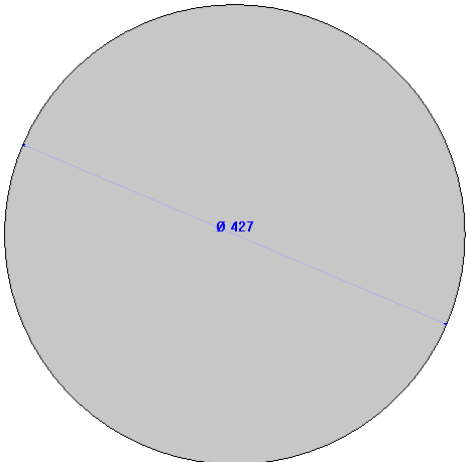
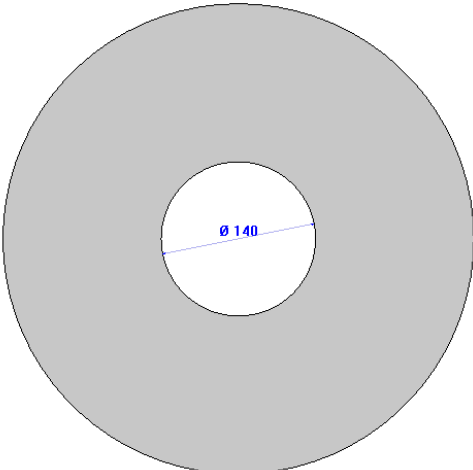
❖ Résumé édité

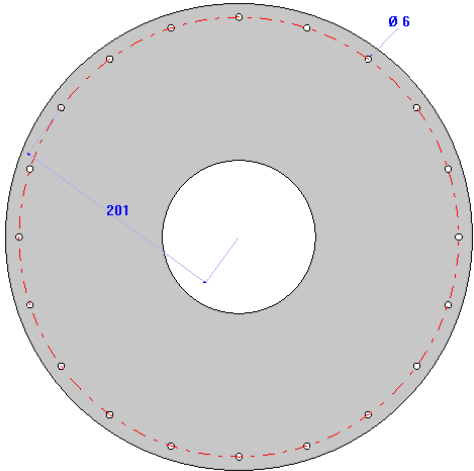
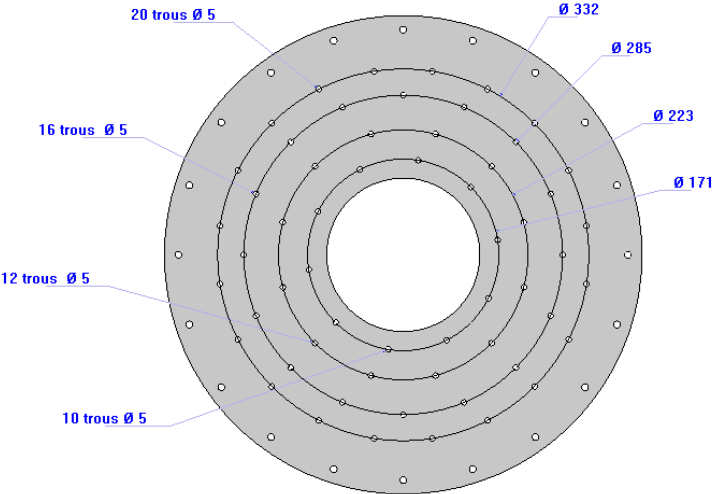
Ahouansou R.H., Sanya E.A., Bagan G., Vianou A. Hounhouigan J. 2010. Effet du prétraitement des graines de néré sur l'efficacité technique d'une décortiqueuse. In Journées Scientifiques Internationales de Lomé (JSIL) XIVème édition Programmes et Résumés des Communications. Prof Gumedzoe. pp 407.

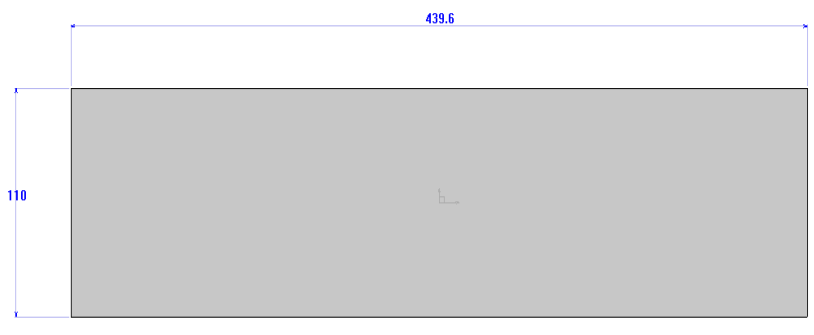
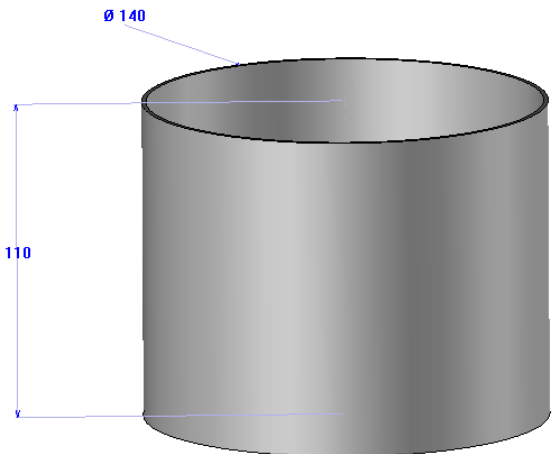
Annexe 2. Eléments du dossier technique de fabrication de la décortiqueuse de graines de néré

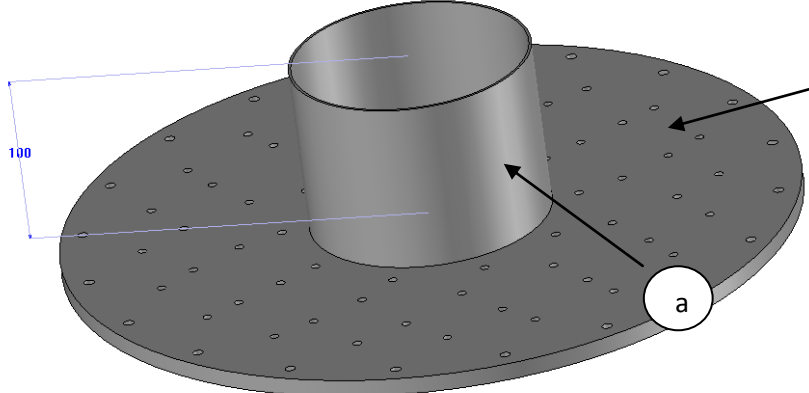
Le dossier technique complet de fabrication de la décortiqueuse de néré est élaboré et disponible. Il comporte 43 pages ^[154]. Nous en présentons ici simplement quelques extraits.

Procédure de fabrication du **PLATEAU STATOR**

N°	Opérations	Qté.	Illustration Schématique	Matières premières	Outils
1	Tracer et Découper la tôle de la pièce a du plateau	01		Tôle noire 100/10	Poste à souder, tour, outils de tour
2	Percer l'avant trous au centre de la pièce et aléser au diamètre 140 mm	-		-	Tour et outils de tour

3	Repérer et percer 20 trous de diamètres 6mm sur un rayon de 201 mm	-		-	Perceuse, pointeau
4	Percer de divers trous de diamètre 5 mm sur la pièce a pour la fixation de la grille fixe (réaliser ces perçages ensemble avec la grille fixe)	-		-	Perceuse

5	Tracer et découper la tôle de la pièce b du plateau	01		Tôle noire 15/10	cisaille
6	Rouler la tôle découpée suivant la longueur	-		-	Rouleuse électrique

<p>7</p>	<p>Soudure des pièces a et b</p>	<p>01</p>		<p>-</p>	<p>Poste à souder, équerre, baguettes</p>
----------	----------------------------------	-----------	--	----------	---

Annexe 3. Eléments de calcul des pièces de la presse à cubes d'afitin

Calcul de l'épaisseur de la matrice

La matrice est réalisée avec des barres en acier inoxydables, ce qui respecte donc les règles d'hygiène. Dimensionnons l'épaisseur de chaque moule en supposant que l'enceinte est sous pression. Dans le cas d'espèce, considérons que les parties à section brusque ou à rapport d'angle sont les plus vulnérables. Nous supposons alors que la probable rupture doit avoir lieu suivant la diagonale dans l'enceinte (comme nous sommes en présence d'une enceinte parallélépipédique).

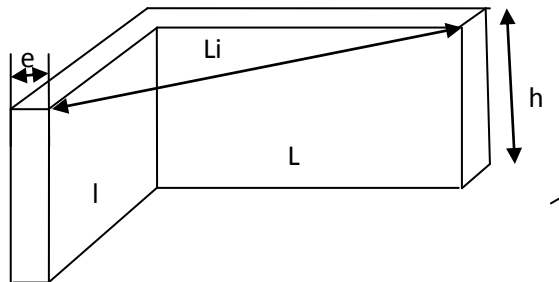


Figure 7.1. Perspective de la coupe d'un moule

L'effort N responsable de la contrainte équivaut à la résultante des efforts disponibles dans la section de la poudre comprimée correspondante au plan de coupe prenant en compte la diagonale. En négligeant la pression atmosphérique, on peut écrire :

$N = F$; avec N , l'effort ; F_i , la résultante des forces pressantes exercées par la poudre comprimée.

Or $F_i = P \times S_i$;

avec P , la pression de compactage et S_i , la section du produit comprimé dans le plan de coupe.

On a : $S_i = L_i \cdot h$; donc, $F_i = P \cdot L_i \cdot h$

La contrainte que nous avons, comme nous sommes en présence d'un cisaillement vaut alors: $\sigma = \frac{N}{S_r}$ équivaut à : $\sigma = \frac{P \cdot L_i \cdot h \cdot S_r}{S_r}$; S_r étant la surface de rupture.

On a : $S_r = 2e \cdot h$ donc $\sigma = \frac{P \cdot L_i \cdot h}{2e \cdot h}$; $\sigma = \frac{P \cdot L_i}{2e}$; e représente l'épaisseur du moule.

Les conditions de résistance imposent :

$K_t \cdot \sigma \leq R_p / s$; avec s , le coefficient de sécurité ; K_t , le coefficient de concentration des contraintes ; R_p , la résistance pratique de l'acier

On a donc : $\frac{K_t \cdot P \cdot L_i}{2e} \leq \frac{R_p}{s}$ équivaut à : $e \geq \frac{K_t \cdot P \cdot L_i \cdot s}{2 \cdot R_p}$, avec $L_i = \sqrt{L^2 + l^2}$

Application numérique : $K_t = 2$, $s = 5$, $R_p = 200 \text{ N/mm}^2$ pour les aciers = $2378181,82 \text{ Pa}$,

(Pression définie d'après les résultats des essais de compactage de la poudre).

$$Li = \sqrt{0,033^2 + 0,025^2} ; Li = 4,14 \cdot 10^{-2} m$$

$$e \geq \frac{2 \times 2378181,82 \times 4,14 \cdot 10^{-2} \times 5}{2 \times 2 \cdot 10^8} \quad e \geq 3,44 \cdot 10^{-3} m \quad \text{soit} \quad e \geq 3,44 \text{ mm}$$

L'épaisseur prise sur la machine est 10 mm donc cette épaisseur est largement suffisante.

Calcul de l'épaisseur de la plaque de base

Cette plaque est réalisée avec une tôle d'acier inoxydable, ce qui respecte donc les règles d'hygiène.

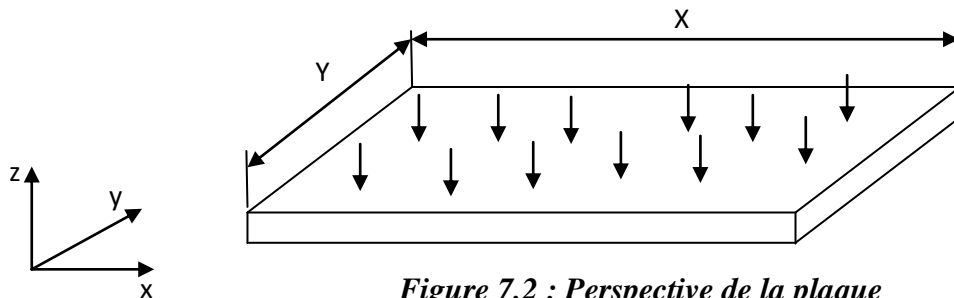


Figure 7.2 : Perspective de la plaque

Etude des sollicitations de la plaque

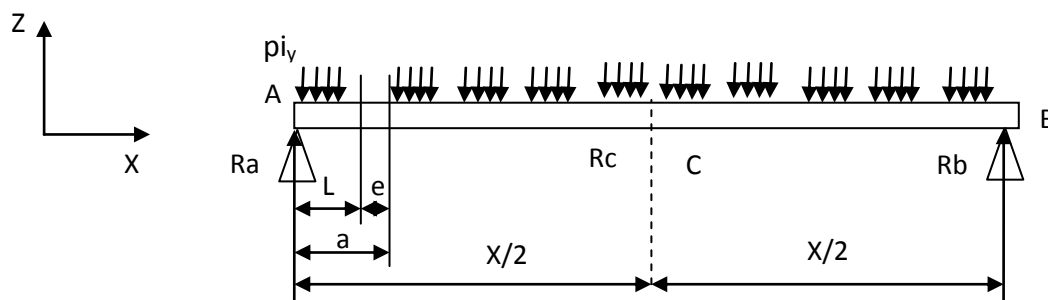


Figure 7.3 : Représentation des sollicitations de la plaque

Calcul des réactions I

A l'équilibre on a : $\sum F_{ext} \vec{=} 0$

$$\sum M(F/A) \vec{=} 0$$

Donc : $Ra + Rb - 100P \cdot l \cdot L = 0$ (1)

$$Rb \cdot (10L + 9e) - 100P \cdot l \cdot L \frac{10L + 9e}{2} = 0$$
 (2)

(2) \Rightarrow

$$Rb = 50P \cdot l \cdot L$$

(1) \Rightarrow

$$Ra = 50P \cdot l \cdot L$$

Application numérique : $P = 2378181,82 \text{ Pa}$; $l = 0,025m$; $L = 0,033m$

$$Ra = Rb = 50 \times 2378181,82 \times 0,033 \times 0,025$$

$$Ra = Rb = 98100N$$

Calcul des efforts tranchants $T(x)$ et des moments fléchissants $M(x)$

Comme la répartition des efforts sur les portions AC et CB sont identiques, nous allons étudier les efforts seulement dans la portion AC. Les diagrammes des efforts tranchants et des moments fléchissants sur la portion AC sont symétriques de ceux de la portion CB par rapport à un axe passant par C.

$$\text{Pour } 0 \leq x < L \quad T(x) = Ra - 10P.l.x \quad M(x) = Ra.x - 10P.l.\frac{x^2}{2}$$

$$\text{Pour } L \leq x < L + e \quad T(x) = Ra - 10P.l.L$$

$$M(x) = Ra.x - 10P.l.L.\left(x - \frac{L}{2}\right) \quad \text{Pour } L + e \leq x < 2L + e$$

$$T(x) = Ra - 10P.l.L - 10P.l(x - (L + e))$$

$$M(x) = Ra.x - 10P.l.L.\left(x - \frac{L}{2}\right) - 10P.l.\left(\frac{(x-L-e)^2}{2}\right)$$

$$\text{Pour } 2L + e \leq x < 2L + 2e \quad T(x) = Ra - 20P.l.L$$

$$M(x) = Ra.x - 20P.l.L.x + 10P.l.L(2L + e)$$

$$\text{Pour } 2L + 2e \leq x < 3L + 2e \quad ; \quad T(x) = Ra - 20P.l.L - 10P.l.(x - (2L + 2e))$$

$$M(x) = Ra.x - 20P.l.L.x - 10P.l.L(2L + e) - 10P.l.\frac{(x - 2L - 2e)^2}{2}$$

$$\text{Pour } 3L + 2e \leq x < 3L + 3e \quad ; \quad T(x) = Ra - 30P.l.L$$

$$M(x) = Ra.x - 20P.l.L.x + 10P.l.L(2L + e) - 10P.l.L.\left(x - \left(\frac{5L}{2} + 2e\right)\right)$$

$$M(x) = Ra.x - 30P.l.L.x + 10P.l.L\left(\frac{9L}{2} + 3e\right)$$

$$\text{Pour } 3L + 3e \leq x < 4L + 3e \quad ; \quad T(x) = Ra - 30P.l.L - 10P.l.(x - (3L + 3e))$$

$$M(x) = Ra.x - 30P.l.L.x + 10P.l.L\left(\frac{9L}{2} + 3e\right) - 10P.l.\frac{(x - 3L - 3e)^2}{2}$$

$$\text{Pour } 4L + 3e \leq x < 4L + 4e \quad ; \quad T(x) = Ra - 40P.l.L$$

$$M(x) = Ra.x - 30P.l.L.x + 10P.l.L\left(\frac{9L}{2} + 3e\right) - 10P.l.L\left(x - \left(\frac{7L}{2} + 3e\right)\right)$$

$$M(x) = Ra.x - 40P.l.L.x + 10P.l.L(8L + 6e)$$

$$\text{Pour } 4L + 4e \leq x < 5L + 4e \quad T(x) = Ra - 40P.l.L - 10P.l.(x - 4L - 4e)$$

$$M(x) = Ra.x - 40P.l.L.x + 10P.l.L(8L + 6e) - 10P.l.\frac{(x - 4L - 4e)^2}{2}$$

$$\text{Pour } 5L + 4e \leq x < 5L + 5e \quad T(x) = Ra - 50P.l.L = 0 ;$$

$$M(x) = Ra \cdot x - 40P \cdot l \cdot L \cdot x + 10P \cdot l \cdot L(8L + 6e) - 10P \cdot l \cdot L(x - (\frac{9L}{2} + 4e))$$

$$M(x) = 10P \cdot l \cdot L \cdot (\frac{25L}{2} + 10e) \qquad M(x) = 10055,25 \text{ N.m}$$

c) Epures des efforts tranchants $T(x)$ et des moments fléchissants $M(x)$

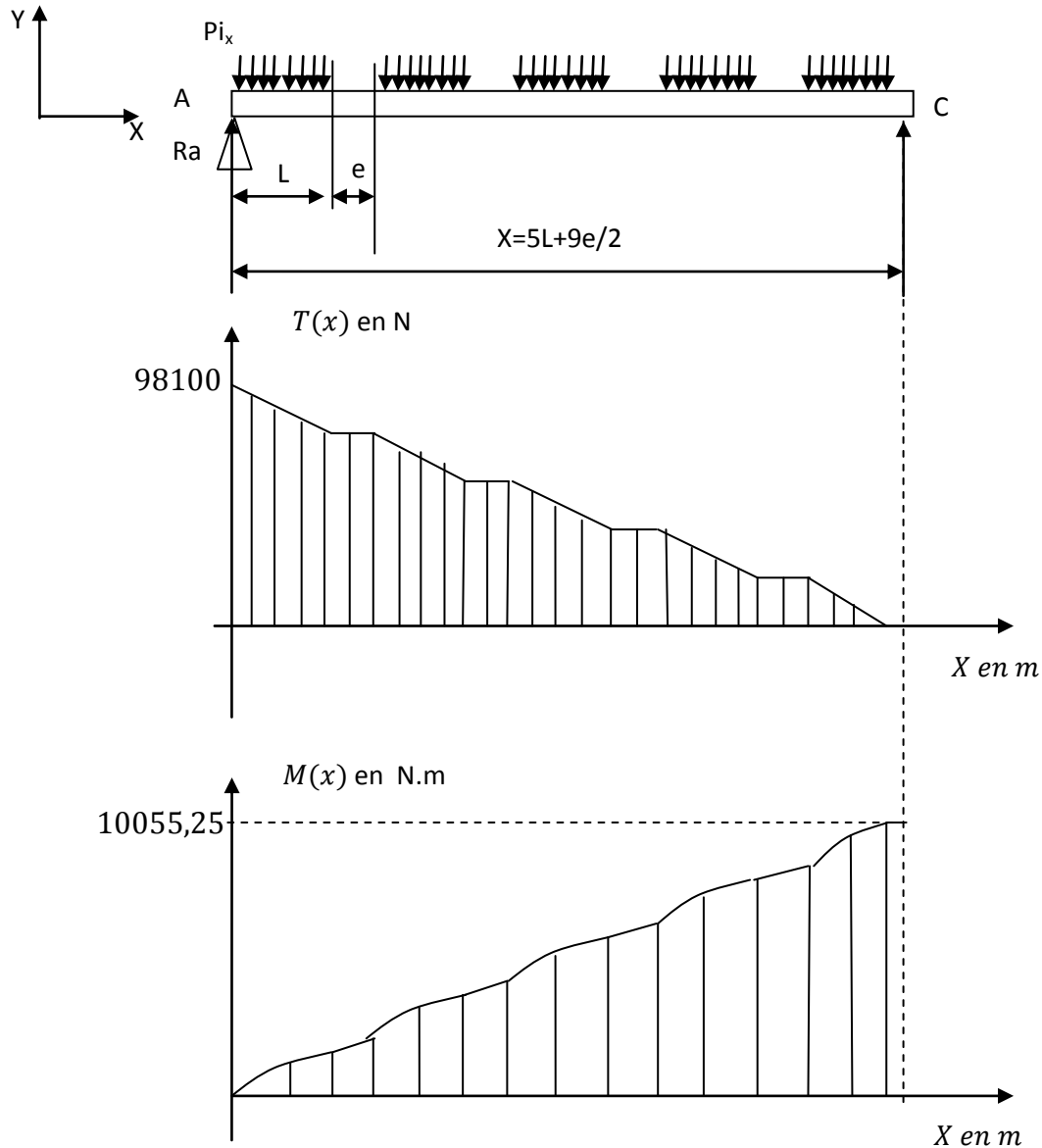


Figure 7.4. Diagrammes des efforts et des moments

Calcul de la résistance et dimensionnement de la plaque de base

Compte tenu de la distribution des efforts, nous étudions la résistance de la plaque à la sollicitation simple de flexion. La condition de résistance dans ce cas est :

$$\sigma_{\acute{e}q} = \frac{M_{max}}{W_y} \leq \frac{R_p}{s}$$

; avec W_y , le moment résistant par rapport à x ;
 s, le coefficient de sécurité ;
 R_p , la résistance pratique

$$\sigma_{\acute{e}q} = \frac{6M_{max}}{zx^2} \leq \frac{R_p}{s} \quad ; \quad \text{avec} \quad W_y = \frac{zy^2}{6}$$

$$z \geq \frac{6s.M_{max}}{R_p.y^2}$$

La section dangereuse est en C, car le moment est maximal en ce point.

Application numérique : $s = 1,5$; $M_{max} = 10055,25 \text{ N.m}$
 $R_p = 200 \text{ N/mm}^2$ pour les aciers
 $y = 10l + 9e = 0,34 \text{ m}$

$$z \geq \frac{6 \times 1,5 \times 10055,25}{2.10^8 \times 0,34^2} \Rightarrow z \geq 3,91.10^{-3} \text{ m} ; \text{ soit } z \geq \mathbf{3,46 \text{ mm}}$$

La tôle utilisée a une épaisseur de 4 mm, alors, elle peut résister aux sollicitations.

Calcul de l'épaisseur du bloc piston

L'aluminium utilisé est AG6 qui présente les meilleures qualités du point de vue coût, forme, couleur et fonction. Il est très conseillé en industrie chimique et alimentaire.

Les propriétés de AG6 sont les suivantes :

- Résistance mécanique $R_m = 160 \text{ N/mm}^2$
- Résistance pratique $R_{p0,2\%} = 90 \text{ N/mm}^2$
- Module d'élasticité $E = 7\,500 \text{ daN/mm}^2$

Etude des sollicitations du bloc piston

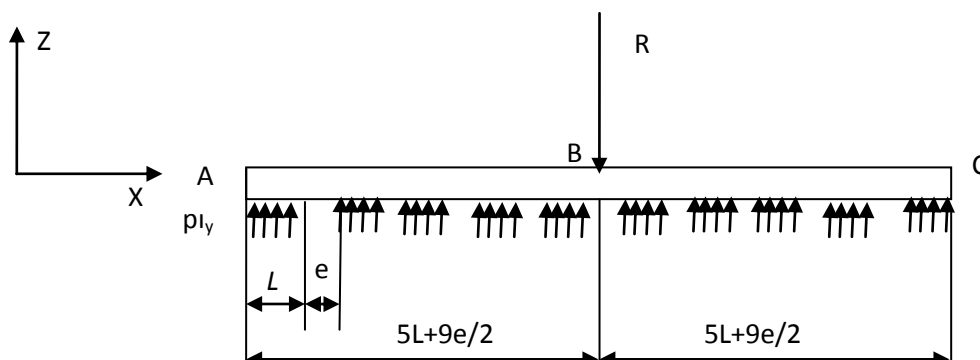


Figure 7.5 : Représentation des sollicitations du bloc piston

a) Calcul de la réaction R

A l'équilibre on a :

$$\begin{array}{l} \rightarrow \rightarrow \\ \Sigma F_{ext} = 0 \quad (1) \quad \Sigma M(F/A) = 0 \quad (2) \quad (1) \Rightarrow R - 100P.L.l = 0 \end{array}$$

$R = 100P.L.l$

b) Calcul des efforts tranchants et des moments fléchissant

Comme la répartition des efforts sur les portions AB et BC sont identiques, nous allons étudier les efforts seulement sur la portion AB.

$$\text{Pour } 0 \leq x < L \quad T(x) = 10P.l.x \quad M(x) = 10P.l.\frac{x^2}{2}$$

$$\text{Pour } L \leq x < L + e$$

$$T(x) = 10P.l.L \quad M(x) = 10P.l.L.\left(x - \frac{L}{2}\right)$$

$$\text{Pour } L + e \leq x < 2L + e$$

$$\begin{aligned} T(x) &= 10P.l.L + 10P.l(x - (L + e)) \\ M(x) &= 10P.l.L.\left(x - \frac{L}{2}\right) - 10P.l.\left(\frac{(x-L-e)^2}{2}\right) \end{aligned}$$

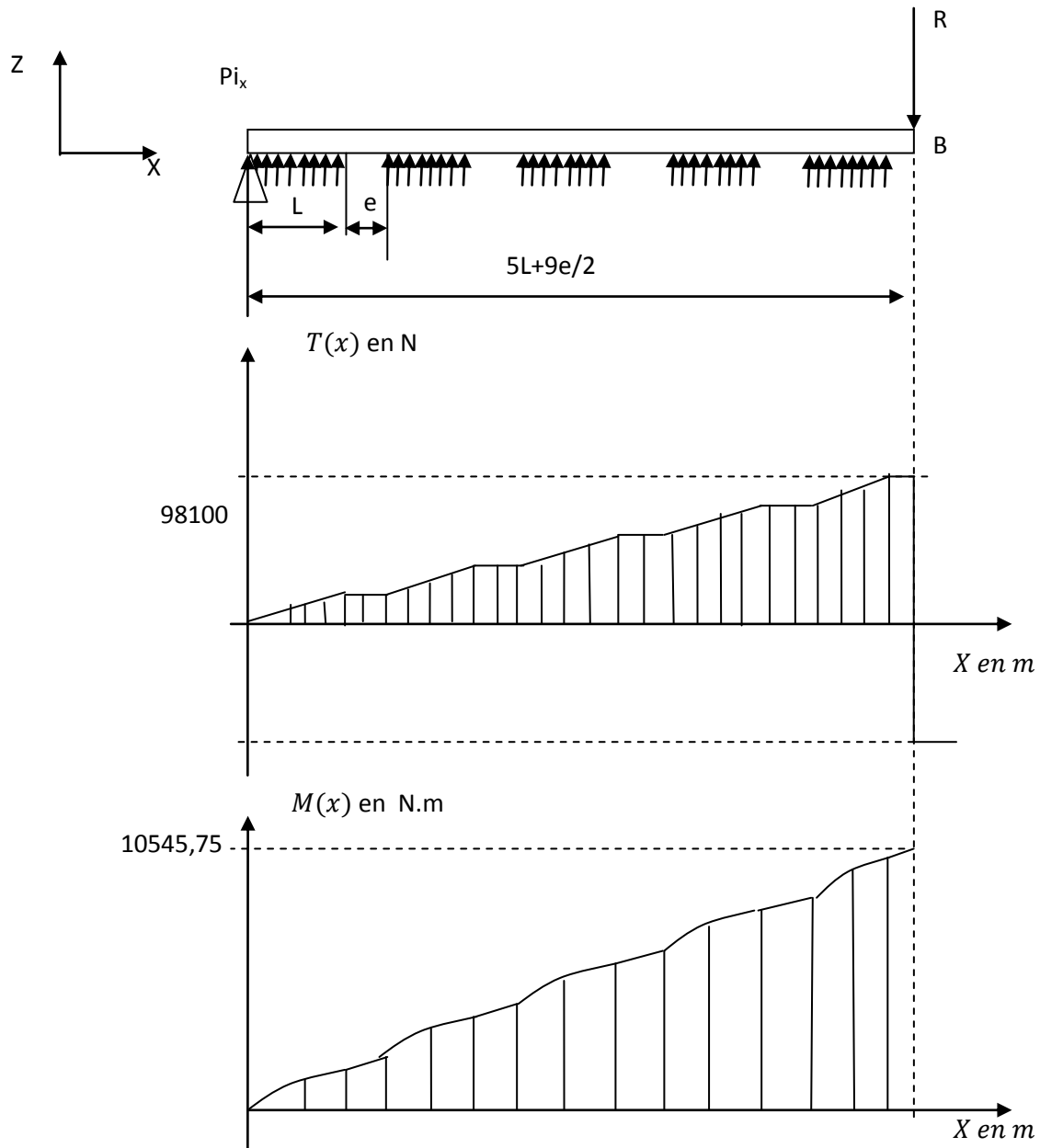
c) Epures des efforts tranchants $T(x)$ et des moments fléchissant $M(x)$ 

Figure 7.6. Diagrammes des efforts et des moments

Annexe 4. Représentation synoptique de la presse hydraulique automatisée

Les choix technologiques effectués nous ont permis d'élaborer le schéma suivant :

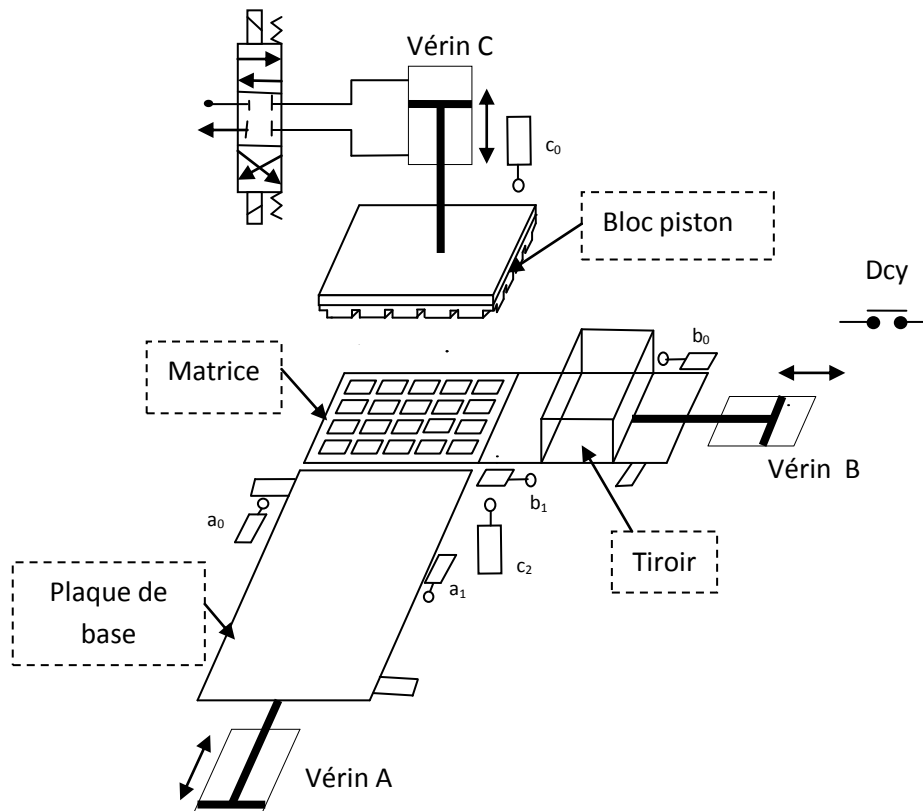


Figure 7.7 : Schéma synoptique de la presse automatisée

Fonctionnement du nouveau dispositif

La presse hydraulique automatisée présentée à la figure 4.3, fonctionne de la manière suivante :

Après la mise en marche, la tige du vérin A sort pour assurer la **fermeture** du bas de la matrice avec la plaque de base. A la fin de cette opération, le capteur a_1 est actionné, ce qui provoque l'arrêt de la tige de A et la commande de la sortie de la tige du vérin B. La tige de B, en sortant, fait passer le tiroir rempli de la poudre sur la matrice pour assurer le remplissage des moules. Lorsque le capteur b_1 est actionné, la tige du vérin B recule. A la fin de cette seconde opération, la sortie de la tige du vérin C est commandée pour assurer le **pressage**. A la fin du pressage, le capteur de pression (c_1) émet un signal qui commande la rentrée de la tige de C et de A. Lorsque les deux tiges sont complètement rentrées, donc les capteurs a_0 et c_0 sont actionnés, la tige de C ressort et assure le **démoulage**. A la fin de cette dernière opération, le capteur c_2 est actionné, ce qui commande la rentrée de la tige de C ; lorsque la tige de C est rentrée complètement, le capteur c_0 est réactionné et la tige de A ressort ; c'est le début d'un nouveau cycle.

Annexe 5. Eléments de la trieuse de graines de néré

Description du principe de fonctionnement de la trieuse

Après considération des différents résultats obtenus dans la génération de solution et la caractérisation des graines de néré décortiquées la trieuse conçue fonctionne comme suit : La quantité de graine de néré décortiquée à trier est versée dans la trémie de la trieuse, cette trémie débouche dans le tambour perforé qui est mise en rotation grâce au moteur par l'intermédiaire de son axe à qui il est solidaire. Le produit dans le tambour est remué grâce au mouvement de rotation, dans le tambour est fixé des tôles en inox en forme de filet d'épaisseurs raisonnables, destinées à convoier le produit vers l'avant, une petite inclinaison est adoptée pour faciliter l'écoulement du produit vers la sortie. Le triage est assuré grâce à une quantité d'eau qui est versée dans le réservoir de la trieuse avant le début de triage, cette eau sera à chaque fois filtrée par un tamis placé en dessus du réservoir. L'eau contenue dans le réservoir est renvoyée dans le tambour par une pompe entraînée par le même moteur, elle aspire l'eau du réservoir et la refoule vers le dessus de la machine, l'eau entre alors sous pression dans la rampe d'arrosage qui à son tour arrose le produit dans le tambour. Les cotylédons sont récupérés au niveau de la sortie située de l'autre coté du tambour après être débarrassée des coques. Un trou de vidange est prévu en dessous du réservoir pour permettre l'évacuation de l'eau jugée sale grâce à un voyant et grâce à l'aspect des cotylédons après triage, le tamis est sorti puis nettoyer à la fin du triage

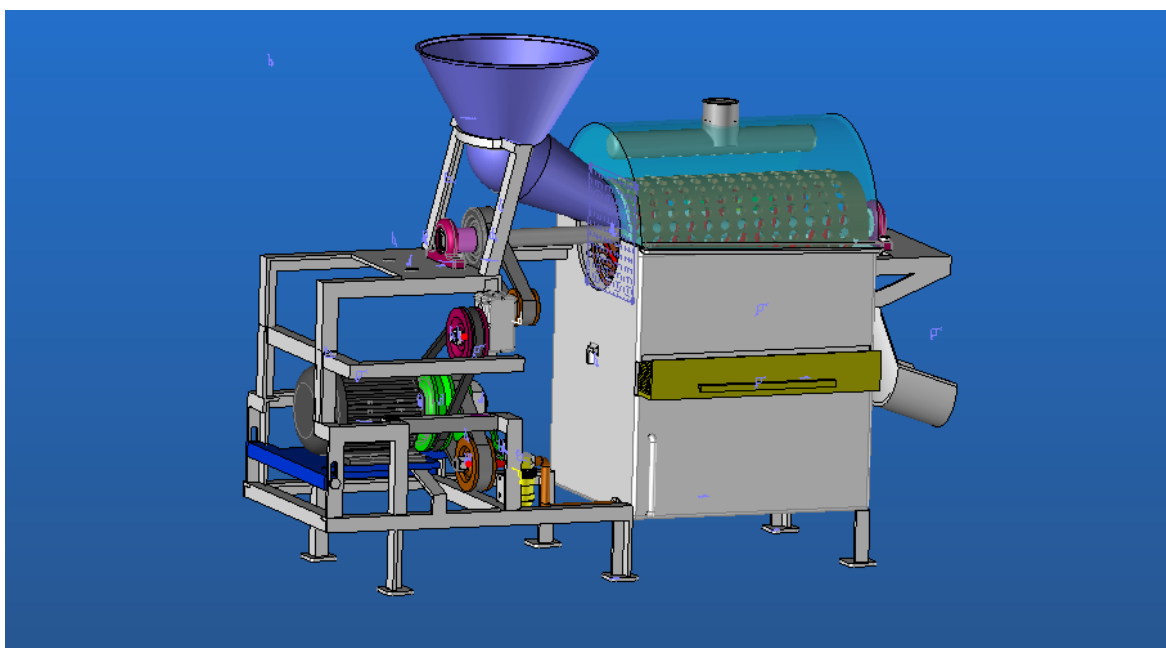


Photo annexe 5 : Trieuse de graine de néré décortiquée

Annexe 6. Fiche de collecte des données sur les graines de néré et les cotylédons

- 1- Nom du Technicien :
- 2- Echantillon N° :
- 3- Lieu de prélèvement :
- 4- Date :
- 5- Teneur en eau des noix
- 6- Teneur en eau des amandes
- 7- Masse denoix
- 8- Masse de amande
- 9- Volume réel de Noix :
- 10- Volume réel de amande
- 11- Volume spécifique de noix :
- 12- Volume spécifique de amande :
- 13- Dimensions des noix et amandes :

N°	Dimensions noix (mm)			Dimensions amandes (mm)		
	Longueur	Largeur	Epaisseur	Longueur	Largeur	Epaisseur
1-						
2-						
3-						
4-						
5-						
6-						
7-						
8-						
9-						
10-						
11-						
12-						
13-						
14-						
15-						
16-						
17-						
18-						
19-						
20-						
21-						
22-						
23-						
24-						
25-						

99-						
100						

Annexe 7. Fiche des données sur le test comparatif des technologies de production d'afitin
Triage

Désignation	Quantité	
Masse graine au début (kg)		
Masse graine finale		
Heure début		
Heure final		
Nombre personne		
Quantité cendre		
Matériaux utilisés		
Cout du néré		

Lavage

Désignation	Quantité	
Masse graine au début (kg)		
Masse graine finale		
Heure début		
Heure final		
Quantité eau		
Cout de l'eau		
Nombre personnes		
Matériaux utilisés		

Première cuisson

Désignation	Quantité	
Masse graine au début (kg)		
Masse graine finale		
Heure début		
Heure final		
Quantité eau		
Cout de l'eau		
Matériaux utilisés		
Quantité bois		
Cout du bois		

Désignation	Quantité	
Masse graine au début (kg)		
Masse graine finale		
Heure début		
Heure final		

Décortilage

Quantité eau		
Cout de l'eau		
Quantité carburant		
Cout carburant		
Quantité sable		
Matériaux utilisés		
Nombre de personnes		

Triage

Désignation	Quantité	
Masse graine au début (kg)		
Masse cotylédons		
Masse coques		
Heure début		
Heure final		
Quantité eau		
Cout de l'eau		
Quantité sable		
Matériaux utilisés		

Deuxième cuisson

Désignation	Quantité	
Masse cotylédons au début (kg)		
Masse cotylédons finale		
Heure début		
Heure final		
Quantité eau		
Cout de l'eau		
Matériaux utilisés		

Fermentation

Désignation	Quantité	
Ferment		
Cout ferment		
Température initiale		
Température finale		
Masse afitin		
Prix de vente afitin		
Heure début fermentation		
Heure finale fermentation		
Quantité de sel		
Quantité eau		
Duré salage		
Cout sel		
Durée broyage		
Cout broyage		
Matériel utilisés		

Appréciations des transformatrices

EFFECTS OF COOKING ON SOME PHYSICAL CHARACTERISTICS OF NERE SEEDS OR AFRICAN LOCUST BEANS (*Parkia biglobosa*)

R.H. Ahouansou, E.A. Sanya †, G. Bagan ‡, A. Vianou §, and D.J. Hounhouigan * Programme Technologies Agricoles Alimentaires, National Institute of Agricultural Research of Benin, BP 128, Porto-Novo, Benin

†Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquées, École Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 2009, Cotonou, Benin

‡ Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquées, Institute Universitaire de Technologie, § Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquées, École Polytechnique d'Abomey-Calavi, 01 BP 2009, Cotonou, Benin

*Laboratoire de Microbiologie et de Biotechnologie Alimentaire du Département Nutrition et Sécurité Alimentaire, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin

ABSTRACT

The major difficulty encountered in processing locust beans or nere seeds (*Parkia biglobosa*) into afitin subsist is the laborious seeds dehushing. Studies were conducted to determine the optimal cooking duration for ensuring the seeds attained 16.14 % (db) water content prior to efficient dehushing. Therefore, the effects of cooking the seeds in water at 102 °C for duration of 1, 2, 3, 4, 5, and 6 hours on the physical characteristics were assessed. Depending on the treatment duration, the cooking induced variable modifications in the physical characteristics of the seeds. The water content, 1000-seeds mass, and 1000-seeds volume of cooked seeds increased with cooking duration, respectively from 16.14 to 284.62 % (db), 231.66 to 508.33 g and 208 to 482 cm³. Seed porosity rose from 35.6 to 42.2 % during the first hour of cooking, but decreased gradually to attain constant value of 41 % for the remaining 5 h. Although the average size of seeds increased marginally, there was corresponding lengthening, indicated by 20.40 % change in thickness, 14.5 % change in length and 13.5 % change in width, which confirmed the remarkable effects of cooking treatment. However, the true and bulk densities decreased respectively from 1110 to 1055 kg/m³ and 715 to 625 kg/m³ as cooking time increased. The data on dimensional changes (seed length and width) and swelling as function of the cooking time provided parameters for designing shelling grids for efficient dehushing.

1. INTRODUCTION

The principal interest of nere seeds exploitation is fermentation of the cotyledons into condiment, known by various local names as afitin, iru, sonru, soumbala, netetou and dawadawa [1]. Accessing the cotyledons has been the major problem encountered in preparation of the snuffed condiment, because the seed husks are extremely hard and firmly attached to the cotyledons. Hence, the dehushing step remains the most labour intensive conversion process of the seeds into afitin.

A dehushing machine was designed, fabricated, and test run by researchers of University of Abomey-Calavi and National Institute of Agricultural Research of Benin [2]. Field tests of the machine on raw dry nere seeds showed the decorticator provided flow rate of 66.7 kg/h, dehushing efficiency of 48.6 % and rate almonds crack of 10 to 11 %; which were acceptable compared with values recorded by the traditional feet pressing method. The unreliability and low efficiency was attributed to heterogeneity of the seeds, which limited ado-

ption of the machine by women users. Also, deficiencies emanated from pre-cooking and other treatments, such as drying or roasting, adopted to condition the raw seeds/beans before dehushing.

In the traditional practice for afitin condiment production, cooking was the adopted treatment for transforming the seeds, and exceeded duration of 8 h of boiling in water at temperature of 102 °C [3]. Whatever the applied treatment, the process efficiency should be related to that of decorticator. Therefore, the design of equipment for food processing ought to be based on knowledge of the physical, mechanical and chemical properties of the product being handled [4], and the needs of the operators [5].

Knowledge of physical properties of the seeds in relation to applied treatment was essential for designing a decorticator to achieve satisfactory performance and optimization [4, 6]. The design of decorticator integrating the seed characteristics, would achieve higher efficiency in dehushing ratio, significant redu-

ction in labour and time, improvement in productivity, and quality assurance.

In this paper, analyses of changes in the physical characteristics of nere seeds induced by cooking treatment are presented. The models developed based on key design and output parameters to be integrated in the traditional practice to condition the seeds prior to dehulling are also discussed.

2. SEED PHYSICAL CHARACTERISTICS AND DEHULLING

2.1. Seed Hardness

The hardness of nere seeds is a characteristic that exerted major influence directly on dehusking, grinding or crushing processes. The hardness is measured by duration of dehusking to obtaining the end product, and also determines the dehusking output, since during abrasion, a tender seed produces higher rate of cracking than a hard grain.

2.2. Decorticator

The decorticator used in the study consisted of 4 principal components, namely, seed feed hopper of 8 kg capacity; dehusking compartment (containing two main active parts of fixed and mobile perforated grids, with adjustable gap as function of size of the seeds being shelled); 5 CV gasoline thermal engine for driving the perforated motive grid; and separator module of ventilator and channel for cotyledons and hulls separation. The test runs showed that dehusking raw dry seeds was tedious, time consuming and of low efficiency [7, 8].

Pre-treating the seeds before dehulling by traditional cooking practice induced changes in the properties compared with raw dry seeds. The cooking duration could affect the seed structure, through softening to make dehuller run easier, increase dehusking rate/output and improve technical performance of the decorticator.

Variation of seeds properties due to applied treatment, might also affect the dimensions which are important for adjusting the seeds receiving gap between the two major active parts of the dehuller.

2.3. Seed Dimensions

If l (mm) is length, τ (mm) is thickness and w (mm) is width of a seed, the arithmetic mean diameter (D_A) was expressed as [4],

$$D_A = (l + \tau + w)/3 \quad (1)$$

and the geometric mean diameter (D_G) as,

$$D_G = (l\tau w)^{1/3} \quad (2)$$

Equation (2) gave the closest value to the experimental volume of some seeds [9]. The sphericity of seeds (S) is given by the dimensionless relation,

$$S = l^{-1} \times (l\tau w)^{1/3} \quad (3)$$

The general expression of dimensional lengthening $\Delta(D_t)$ (%) at time t of treatment is

$$\Delta(D_t) = 100 \times (D_t - D_0) / D_0 \quad (4)$$

where D_t may be $l(t)$, $\tau(t)$ or $w(t)$ after cooking time (t) and D_0 corresponds to initial dimensions of the raw seeds, i.e. $t = 0$, $D_0 = D(t = 0)$.

2.4. Mass, Volume, Density, and Porosity

The physical characteristics of seeds were expressed in terms of 1000-seeds mass and volume, true density and bulk density. The 1000-seeds volume was used to derive the volume of one seed (V_Z). The seed density (ρ) and V_Z provided weighted parameters, in terms of equivalent diameter (D_E), seed porosity (P %), and mass ratio of seed ($R_{c/s}$ %) [6, 10].

The equivalent diameter (D_E mm) adopted for seeds and other particulate products of irregular shapes, is equal to that of a sphere having identical volume as unit seed or particle; and is expressed as,

$$D_E = 1.24 \times V_Z^{1/3} \quad (5)$$

The seed porosity (P %) is degree of empty spaces contained in a product when not subjected to any external effective pressure, and was calculated as [11, 12],

$$P(\%) = 100 \times (\rho_B - \rho_T) / \rho_T \quad (6)$$

where ρ_T is true density and ρ_B is bulk density of seeds.

The mass ratio of seed ($R_{c/s}$ %) is ratio of mass of cotyledons (M_C) to the mass of entire seed (mass of cotyledon + mass of hull) (M_S), i.e.

$$R_{c/s} = \frac{M_C}{M_S} \times 100 \quad (7)$$

3. MATERIAL AND METHODS

3.1. Seed Selection and Sampling

Stocks of naturally sun-dried nere seeds were obtained from Dantokpa market in Cotonou. The seeds were winnowed and manually sorted out to eliminate dirty, non-firmed and bad seeds. About 85 kg of the cleaned se-

eds stock were packed in big plastic containers and stored under ambient conditions in the laboratory. Figure 1 illustrates a picture of the as-received dry seeds, while Table 1 gives the physical characteristics.



Fig. 1. Raw dry nere (*Parkia biglobosa*) seeds

Table 1. Physical characteristics of raw dry seeds (mean values and standard deviation from 6 measurements)

Parameter	Unit	Value
Water content (db)	%	16.14 ± 0.07
Length	mm	10.12 ± 1.26
Width	mm	8.30 ± 1.20
Thickness	mm	4.94 ± 0.72
Arithmetic mean diameter	mm	7.78 ± 0.75
Geometric mean diameter	mm	7.42 ± 0.68
Seeds sphericity	(-)	0.74 ± 0.06
Mass of 1000-seeds	g	231.66 ± 3.58
Mass ratio cotyledons/seed	%	72.03 ± 2.87
Seeds porosity	%	35.63 ± 0.72
Volume of 1000-seeds	cm ³	208.2 ± 36.0
True density	kg/m ³	1183 ± 52.0
Bulk density	kg/m ³	627 ± 33.0
Specific area of seed	m ² /kg	0.72 ± 0.02
Equivalent diameter	(mm)	7.36 ± 0.082

The sampling consisted of packing seeds in batches of 100, randomly taken from the stock, numbered, and sealed in labelled polystyrene sachets and stored at room temperature of 25 °C in the laboratory.

3.2. Sample Preparation and Conditioning

Random samples from 7 sets of 100-seeds samples in sachets labelled S₀, S₁, S₂, S₃, S₄, S₅, S₆, were selected for determination of bulk density and mass of cotyledons. Sample S₀ represented the control or untreated raw dry seeds. The other 6 samples (S₁, S₂, S₃, S₄, S₅, S₆) were cooked in boiling water at temperature of 102 °C, respectively for 1, 2, 3, 4, 5 and 6 hours duration, and the process was repeated for each set for 7 days.

3.3. Cooking Method

The method of cooking the seeds was replication of the traditional mode adopted by

women processors. Aluminium containers, each of 2,500 mL capacity without cover was used to cook the seeds. The seeds were poured onto a steel grid, held up and immersed in water at 30 °C. Due to limited capacity of the vessels, the filling rate was 1 kg of seeds for 2.5 L of water.

From preliminary tests, each cooker unit was brought to 102 °C in 10 minutes. The temperature was maintained constant during the required cooking time by supply of hot water from standby heated units free of seeds. The cooking duration was counted starting from the instant of water boiling. At end of stipulated time, the seeds were drawn out of the boiling water and spread for 2 min on absorbent papers to drain off excess water.

Tests were conducted on portions of the treated samples, while the remaining seeds were packed in 100 x 150 mm polyethylene sachets and stored in plastic bags.

4. MEASUREMENTS OF SEED PHYSICAL CHARACTERISTICS

Measurements of the physical characteristics of the treated seeds in batches of 6 samples of 100-seeds and the control were performed, and replicated 6 times to obtain mean values and standard deviations. The parameters determined were water content, average dimensions, 1000-seeds mass and volume, true and bulk densities, spheroid, and porosity.

4.1. Water Content

The water content was determined following ISO-662 procedure [13]. For the tests, 100-seeds samples were ground using RETCH mill. Three samples each of about 5 g were measured using SARTHORIUS balance (precision of 0.1 mg) and subjected to thermogravimetric analysis at drying temperature of 105 ± 2 °C for 8 h in HE50 Pfeiffer oven. The sample was weighed every hour, after a brief cooling (10 - 15 min), in a seal-cote ISO 9000 desiccator type, until constant mass was attained after 3 consecutive measurements.

The water content (dry basis) of the seeds was calculated as [11, 14, 15],

$$Wc_{db} = (100 \times Wc_{wb}) / (100 - Wc_{wb}) \quad (8)$$

where Wc_{wb} is water content (wet basis) calculated from initial mass M_{ts} and final or dried mass M_{ds} of sample as,

$$W_{c_{w,b}} = 100 \times (M_{is} - M_{ds}) / M_{ts} \quad (9)$$

4.2. Seed Dimensions

The length, width and thickness of raw and cooked seeds were measured using a 100 mm digital FACOM slide calliper, with 0.01 mm precision.

4.3. 1000-Seeds Mass and Volume

The 1000-seeds mass ($M_{1000-seeds}$) and volume ($V_{1000-seeds}$) were determined in accordance with ISO-520 procedure [16]. An electronic Mettler Toledo SB1600 balance (1 g precision) and a 500 mL Brückner Pycnometer (precision of 0.01 mL) with liquid xylen were used for the measurements on each of the 100-seeds sample. The mass of seeds and volume of displaced liquid were recorded and 10 trials were performed for each measurement.

4.4. True and Bulk Densities

The true density of seeds (ρ_T) was calculated from the measured masses and volumes. The bulk density (ρ_B) was determined following AOAC method [17]. Seeds of mass 500 g were poured in the Pycnometer, volume of displaced liquid was read and the bulk density calculated.

4.5. Mass of Cotyledons

The mass of cotyledons (M_c) was determined by using 250 g seeds taken from each of the 6 trials. The individual seeds were manually shelled using a pair of nippers to break the hardened husk, and separated into two parts, and weighed to obtain the average mass of cotyledons (M_c), and that of the husks.

4.5. Data Analyses

The experimental data were analysed using SPSS 9.0 software. The graphs were plotted using MS Excel 2007, and the trend equations and regression coefficients (R^2) of the mathematical models indicated.

5. RESULTS

The results represented variation of physical characteristics with cooking duration and the general effects of treatment on dehusking with respect to the control samples. The conditioning and induced changes in the physical characteristics of seeds, in terms of, water

absorption, dimensional changes, equivalent diameter, 1000-seeds mass and volume, cotyledons/seed mass ratio, sphericity and porosity of nere seeds were presented.

5.1. Water Content

The effect of cooking duration on water content of the seeds was plotted as shown in Fig. 2. When nere seeds were cooked from 0 h (control) to 6 h, the water content increased from 16.14 % (db) at control state to 284.62 % (db) at the end of the 6 h treatment.

The water absorption $W_a(t)$ % of the seeds during cooking was modelled as a function of time (t), by a polynomial equation of the form,

$$W_a(t) = -0.776t^6 + 15.19t^5 - 112.7t^4 + 389.5t^3 - 613.4t^2 + 398.3t + 16.14 \quad R^2 \approx 1 \quad (10)$$

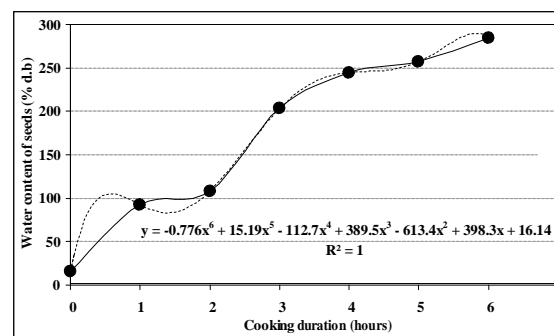


Fig. 2. Changes in water content of nere seeds with cooking duration

5.2. Dimensional Parameters

Raw dry seeds of *Parkia biglobosa* at 16.14 % water content (db) had average length of 10.11 mm, width of 8.30 mm and thickness of 4.94 mm. The dimensions after cooking are shown in Table 2.

The induced lengthening was represented as change (Δ) of length (l), width (w) and thickness (τ) of the seeds as plotted in Fig. 3. When the cooking time was increased from 0 to 6 h, $\Delta l = 1.47$ mm, $\Delta w = 1.04$ mm and $\Delta \tau = 1.01$ mm, while the arithmetic and geometric mean diameters changed by 15.42 % and 15.90 % respectively. From Fig. 3, the thickness was most drastically affected by the cooking treatment with ~ 20.4 % rise, while the length and width only increased by 14.5 % and 13.5 %.

The mathematical models describing relationships between Δl , Δw , $\Delta \tau$ and cooking duration (t) were respectively,

Table 2. Dimensional changes of nere seeds with cooking time up to 6 h (Control was uncooked).

Applied treatments	Variation of dimensional characteristics of nere seeds (mm)					Sphericity (-)
	Length	Width	Thickness	Arithmetic mean diameter	Geometric mean diameter	
Uncooked t=0	10.12±1.26	8.30±1.20	4.94±0.72	7.78±0.75	7.42±0.68	0.74±0.06
Cooked for 1h	10.40±1.45	8.69±1.41	5.23±0.97	8.12±1.07	7.76±1.05	0.74±0.06
Cooked for 2h	11.02±1.47	8.98±1.37	5.53±0.03	8.51±0.98	8.13±0.98	0.74±0.07
Cooked for 3h	11.24±1.41	9.16±1.47	5.60±0.99	8.67±0.89	8.26±0.91	0.74±0.08
Cooked for 4h	11.42±1.47	9.24±1.39	5.86±1.11	8.84±0.98	8.47±1.00	0.75±0.18
Cooked for 5h	11.45±1.39	9.36±1.34	5.90±0.85	8.90±0.93	8.55±0.90	0.75±0.06
Cooked for 6h	11.59±1.42	9.34±1.24	5.95±1.04	8.98±0.78	8.60±0.80	0.75±0.09

$$\Delta l = 6.365 \ln(t) + 3.558 \quad R^2=0.971; \quad (11)$$

$$\Delta w = 4.60 \ln(t) + 4.931 \quad R^2=0.983; \quad (12)$$

$$\Delta t = 8.356 \ln(t) + 5.780 \quad R^2=0.972; \quad (13)$$

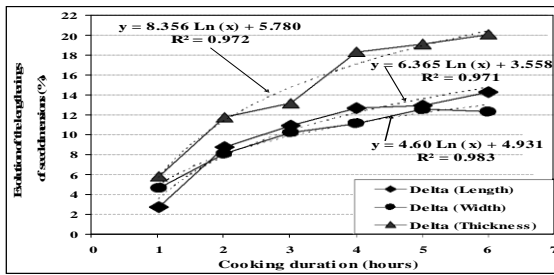


Fig. 3. Dependence of dimensional lengthening of nere seeds on cooking duration

The seed sphericity was independent of the cooking process, as the change was only 1.4 % after 6 h of treatment.

5.3. Equivalent Diameter

The effect of cooking duration on equivalent diameter of the seeds is illustrated by Fig. 4. As the cooking time increased from 0 to 6 h, $D_E(t)$ increased from 7.36 to 9.72 (~ 32.07 %). The change induced was described by the trend equation,

$$D_E(t) = -0.009t^4 + 0.132t^3 - 0.616t^2 + 1.471t + 7.356 \quad R^2 = 0.999, \quad (14)$$

5.4. 1000-Seeds Mass and Volume

Figures 5 and 6 show dependence of 1000-seed mass and volume on cooking duration. The mass of 1000-seeds increased from 231.66 to 508.33 g when the cooking time was increased from 0 to 6 h.

The trend equations of dependence of M_{1000-S} and V_{1000-S} on cooking time were respectively,

$$M_{1000-S} = 0.152t^5 - 3.813t^4 + 31.66t^3 - 110.4t^2 + 194.4t + 231.67 \quad R^2 \approx 1 \quad (15)$$

$$V_{1000-S}(t) = -0.001t^4 + 0.013t^3 - 0.060t^2 + 0.144t + 0.208 \quad R^2 = 0.9883 \quad (16)$$

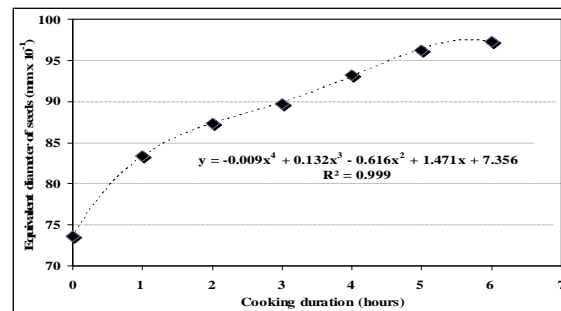


Fig. 4. Variation of equivalent diameter of nere seeds on cooking time.

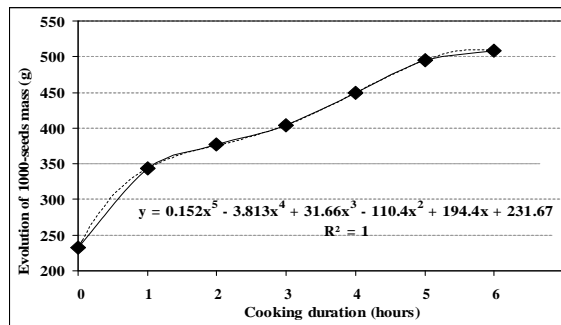


Fig. 5. Increase in 1000-seeds mass of nere on cooking time

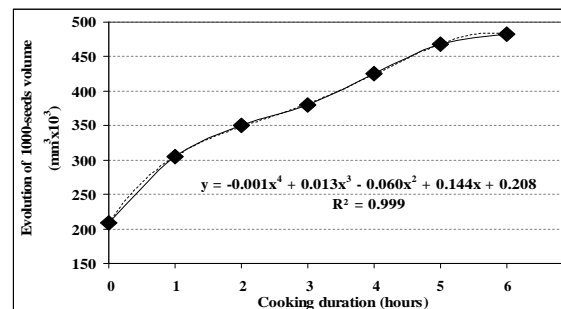


Fig. 6. Increase in 1000-seeds volume with cooking time

5.5. Mass Ratio of Cotyledons

Effect of cooking on mass ratio (R_{CS})

is shown in Fig. 7, and during the first hour of treatment, $R_{C/S}$ increased from 72 % to 89.3 %, and then decreased quasi-linearly to 64.94 % at end of 6 h. The trend equation of dependence of $R_{C/S}$ on cooking time was,

$$R_{C/S} = 0.125t^5 - 2.092t^4 + 13.15t^3 - 38.38t^2 + 44.33t + 72.01$$

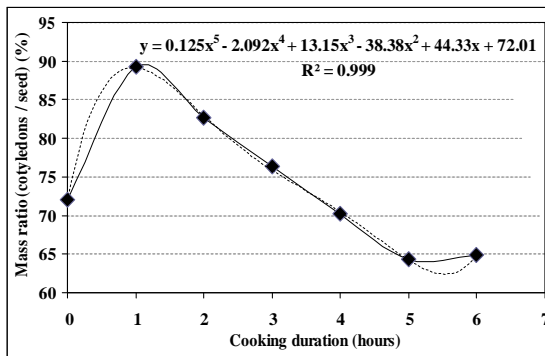
$$R^2 = 0.999 \quad (17)$$


Fig. 7. Mass ratio of cotyledons to seeds versus cooking time

5.6. Porosity of Seeds

The change of porosity of seeds in Fig. 8 showed increase from 35.6 to 42.2 % during the first hour of cooking, and then slightly decreased to about 40.78 %, and remained nearly constant for the next 5 h of treatment. The seed porosity (P) as function of cooking time (t) was expressed as,

$$P = 0.05t^5 - 0.970t^4 + 6.046t^3 - 16.40t^2 + 17.80t + 35.63$$

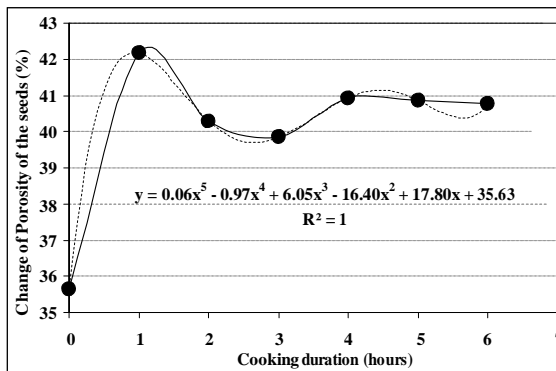
$$R^2 \approx 1 \quad (17)$$


Fig. 8. Changes in porosity of nere seeds on cooking time

5.7. Density

Figures 9 and 10 represent the variation of true and bulk densities of the seeds. The true density increased from 1109.8 to 1127.9 kg/m^3 in the first hour, and then decreased to a constant value of 1053.9 kg/m^3 . The bulk density decreased from 714.3 kg/m^3 to 624.1 kg/m^3 after 4 h of cooking and attained a constant

value. The trend equations were,

$$\rho_T(t) = -0.20t^6 + 4.17t^5 - 34.03t^4 + 135.6t^3 + 259.5t^2 + 172.0t + 1109$$

$$R^2 = 1, \quad (18)$$

$$\rho_B(t) = -0.1t^6 + 1.5t^5 - 7.15t^4 + 6.2t^3 + 38.3t^2 - 100.8t + 714.2$$

$$R^2 = 1, \quad (19)$$

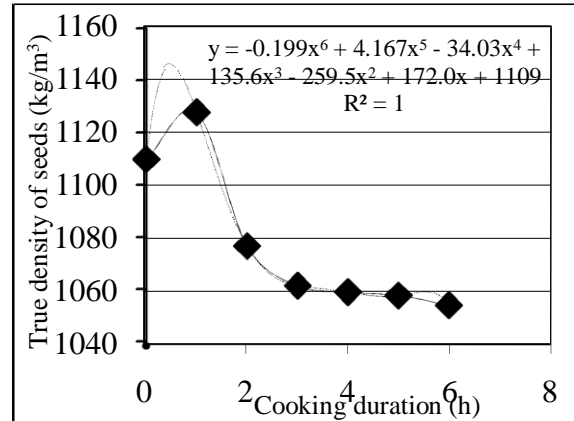


Fig. 9. Variation of true density of nere seeds with cooking time

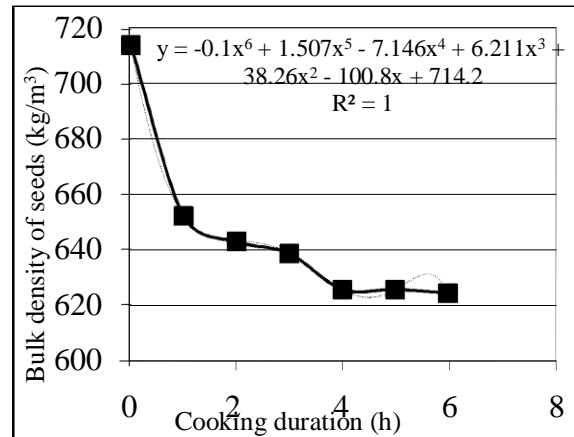


Fig. 10. Dependence of bulk density of nere seeds on cooking time

6. DISCUSSION

The major impacts of cooking of *Parkia biglobosa* seeds were dimensional changes and swelling, as observed on *Parkia fillicoides* [18]. The cooking treatment generated discernible modifications at seeds size level, but the notable effects were lengthening of the seeds.

6.1. Dimensional Changes and Dehusking

Knowledge of the seed length and width as function of cooking time provided indicators for the design of shelling grids. For correct seed dehusking, the space between the two consecutive perforations of the grids must be less than the smallest seed length and width, i.e. ~ 8.3 mm.

The seed thickness was best indication for adjustment of the breathing gap between the fixed and mobile perforated grids of the machine, hence the possibility of varying the value of arranged gap between the two decorticating grids from 0 mm (touching grids) to 5.95 mm (cooked seeds thickness).

The high value recorded for increase in thickness (lengthening) originated from the sum of thickness of two cotyledons, and slit separation, added to two times the hull and gap between hull and cotyledons. The value of separating gap between cotyledons of seed could be assumed null with regard to the seed length or width as seeds were water engorged.

Upon boiling water treatment, the water engorged seeds exhibited increase of mass from water imbibitions of the cotyledons and hulls (Fig. 6), and the behaviour provided useful indicators on the attainable values for dehusking rate and output capacity versus cooking time. The indicators served to appraise the technical performance of a seed decorticator, through computation of the dehusking output, as evidenced by increase in the seed-particle sizes shown in Table 2. During cooking, the mass of hulls evolved more quickly than that of cotyledons, as the hulls continuously absorbed water which contributed to softening the seeds structure, leading to destruction of walls of the hull. Under combined actions of heat and moisture, the cotyledons absorbed water.

The cooking of the seeds caused dilatation of hull and cotyledons (two major components). The phenomenon of swelling might have weakened the seed hulls, inducing efficient dehusking operation.

Knowledge of 1000-seeds volume also facilitated design of some components of the decorticator, such as, seed hopper and shelling compartment.

The effects of cooking might be linked with water engorged seeds that generated increase in mass (Fig. 5), enlargement of diameter causing volume expansion (Fig. 7), and subsequently, variations in values of the true and bulk densities.

5.2. Porosity and Weakening of Seeds

Porosity signifies degree of emptiness or space in the seed when not subjected to an external pressure. The change in seed porosity

(Fig. 10) was a function of existing gap between hulls and cotyledons, and might explain adherence reduction of the two major parts of the seeds.

Maximum value of porosity of seeds was reached after 1 h of cooking, which could mark the beginning of adherence weakening between the seed hulls and cotyledons. After 4 h cooking, the seeds porosity recorded minor variations, indicating that no significant changes took place at adherence level of hulls and cotyledons. The corresponding cooking time could be regarded as the appropriate moment or best indicator for accomplishing efficient seed dehusking.

6. CONCLUSIONS

Experiments were conducted to assess influences of cooking treatment on the physical characteristics of nere seeds (*Parkia biglobosa*) through analysis of the induced changes.

When the seeds were cooked at 102 °C for 1 to 6 h, the physical characterization parameters underwent various changes. The parameters which increased with cooking time were the water content of seeds (from 16.14 to 284.62 % (db), 1000-seeds mass (from 231.66 to 508.33 g) and treated seeds volume (from 20.80 to 48.20 x 10³ mm³). The effect on the seed lengthening was observed in the three main axes as changes in seed thickness (20.4 %), length (14.5 %) and width (13.5 %).

Other parameters showed mixed behaviour that consisted of increase in value at the first hour of treatment followed by reduction for the remaining 5 h. The seed porosity changed from 35.6 to 42.2 % and finally to 40.78 %; the bulk density changed from 1109.8 to 1127.9 kg/m³ and finally to 1053.9 kg/m³, while the mass ratio changed from 73.40 to 89.28 % and finally to 64.95 %.

The true density of seeds exhibited decreasing trend from 714.3 kg/m³ for raw seeds at time zero, to reach constant value of 624.1 kg/m³ after about 4 h of cooking and maintained for the rest of the period.

The major impacts of cooking *Parkia biglobosa* seeds were dimensional changes and swelling, and variation of the seeds length and width as function of the cooking time provided indicators for the design of shelling grids.

7. REFERENCES

1. Alihonou S.D.V., Contribution à la valorisation technologique et nutritionnelle de la graine de néré (*Parkia biglobosa*): Effet du décortiquage mécanique sur le procédé et la qualité du afitin, *Mémoire Diplôme Ingénieur Agronome*, 2006, Univ. Abomey – Calavi
2. Hounhouigan D.J., Ahouansou R. and Madode Y., Test d'adaptation en station d'une décortiqueuse de néré pour la production de «afitin» au Bénin, *Rapport Technique*, FSA/INRAB, 2004, pp. 8-12.
3. Gutierrez M.L, Maïzi P., Nago M. and Hounhouigan J., Production et commercialisation de l'afitin fon dans la région d'Abomey - Bohicon au Bénin, *Rapport Technique*, CERNA, CNEARC, CIRAD, 2000.
4. Zavrjajnov A.I & Nikolow D.I, Mécanisation de la préparation et de la conservation des fourrages, *Agropromizdat Edition*, Moscou, 1990.
5. Marouzé C., Proposition d'une méthode pour piloter la trajectoire technologique des équipements dans les pays du Sud, Application au secteur agricole et agroalimentaire, in *Thèse de Doctorat, ENSAM, France*. 1999. pp. 56-80.
6. Bellianchicov N.N, Mécanisation de l'élevage et de la préparation du fourrage, *Agropromizdat Edition*, Moscou, 1990.
7. Ahouansou R., Optimisation des performances des équipements agroalimentaires: application la décortiqueuse de néré, *Mémoire DEA*, 2005, Univ. Abomey – Calavi, Bénin.
8. Ahouansou R., Sanya E. A. and Bagan G., Caractérisation physique et mécanique de la graine de néré (*Parkia Biglobosa*), *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo)*, Série A 8, No. 1, 2006, pp. 131-138
9. Aviara N.A., Gwandzang M.I. and Haque M.A., Physical properties of guna seeds, *J. Agric. Eng. Res.*, Vol. 73, 1999, pp. 105-111.
10. Chasseray P., Caractéristiques physiques des grains et de leurs dérivés in: *Les industries de première transformation des céréales*, Tech. Doc., Lavoisier, 1991. Pp. 105-144.
11. Aviara N.A, Oluwole F.A. and Haque M.A., Effect of moisture content on some physical properties of sheanut (*Butyrosperm. Paradoxum*), *Int. Agrophys.*, Vol. 19, 2005. Pp. 193-198.
12. Mohsenin N.N., *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, 2nd ed., Gordon & Breach Science Publishers, New York, 1986.
13. *International Standards Organization*, ISO – 662, Geneva, Switzerland, 1998
14. Douglas A.S., Donald M.W., Holler F.J. and Buess-Herman C., *Chimie analytique*, Traduit par Buess-Herman C., Dauchot-Weymeers J.,
15. Keey R.B., Drying of loose and particulate materials, Taylor & Francis Edition, *Hemisphere Publishing Corporation*, USA, 1992.
16. *ISO-520*, Geneva, Switzerland,
17. *Association of Official Analytical Chemists (AOAC)*, *Official methods of analysis*, 13th ed., Washington D.C., 1980.
18. Ogunjimi L.A.O., Aviara N.A. and Aregbesola O.A., Some engineering properties of locust bean seed. *J. Food Engineering*, Vol. 55, No. 2, 2002, pp. 95-99.

EFFETS DU DEBIT D'ALIMENTATION ET DE LA VITESSE DE GRILLE MOTRICE SUR LES PERFORMANCES D'UNE DECORTIQUEUSE DE GRAINES DE NERE «*PARKIA BIGLOBOSA*»

SANYA E. A.¹, AHOUANSON R.H.², BAGAN G.¹ and VIANO A.¹

1- Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA) - EPAC - Université d'Abomey-Calavi (République du Bénin). Mail to : easanyas@hotmail.com

2- Institut National de la Recherche Agronomique du Bénin (INRAB), Porto-Novo (République du Bénin).
(Reçu le 24 octobre 2008 ; Révisé le 15 mai 2009 ; Accepté le 28 mai 2009)

RESUME

L'investigation discutée dans le présent article est exclusivement consacrée à l'étude des impacts du débit d'alimentation en graines de néré et de la vitesse de la grille motrice sur les performances d'une décortiqueuse conçue pour soulager les femmes productrices d'afitin. Les effets de ces deux paramètres opératoires sont examinés à travers les caractéristiques de performances que sont la capacité horaire de la décortiqueuse, le taux et l'indice de décortilage, le taux de brisure des cotylédons. Les résultats obtenus ont montré que les caractéristiques accèdent à leur optimum à différentes conditions opératoires. Les valeurs optimales, de la Capacité horaire (207,57kg/h), de l'Indice de décortilage (0,37) et du Taux de décortilage (70,30%) sont atteintes à vitesses identiques de 542tr/min, mais à débits respectivement de 350kg/h pour les deux premiers et 200kg/h pour le troisième. Celle du Taux de brisure (13,02%) est acquise à 287kg/h et 200tr/min. L'application d'une procédure d'optimisation multi critères a permis d'appréhender cette variabilité et d'en déterminer les conditions opératoires optimisant l'ensemble des caractéristiques de performances. Le taux et l'indice optima de décortilage chutent respectivement à 66,67% et 0,314 tandis que celui de brisure augmente légèrement à 16,12%, sans toutefois que la valeur de la capacité horaire soit modifiée.

Mots clés: Graines; néré; débit; décortilage; brisure; indice; capacité; efficacité.

ABSTRACT

This paper is exclusively devoted to assess the impacts of Nere seeds "*Parkia biglobosa*" flow rate and rotary grid speed on a seed decorticator efficiency. The effects of these two operative factors were studied by analyzing the process responses through the hourly capacity of the plant, its dehusking rate and index, and the breakage rate of seed cotyledons. The gotten results showed that all those performance characteristics reach their optimum at different operative conditions. The optimal values of hourly Capacity (207.57kg/h), dehusking index (0.37) and dehusking rate (70.30%) are reached at identical driving grid speed of 542rpm, at seed flow respectively of 350kg/h for the two first characteristics and 200kg/h for the third one. The optimal breakage rate (13.02%) is acquired at seed flow of 350kg/h and a grid speed of 200rpm. A multi criteria optimization procedure is displayed that allows to apart from this noticed variability and thus determine the appropriate optimized values of operative factors. The previous values for rates and dehusking index are reduced respectively to 66.67% and 0.314, and provoke a slight increase of the breakage one to 16.12% without however any modification of the hourly capacity.

Key words: Nere seed; flow; rate; dehusking; efficiency; crack; index, effects.

INTRODUCTION

Arbre assez répandu en Afrique de l'Ouest, le néré (*Parkia biglobosa*), s'adapte aux sols pauvres constitués de croûtes ferrugineuses ainsi qu'à ceux des zones climatiques à faible pluviométrie de

type soudanien [1– 4]. Les graines de néré font l'objet d'importantes transactions dans les pays Ouest Africains et l'aire de consommation dépasse largement celle des régions productrices.

La consommation annuelle de graines de néré au Sénégal, au Mali, en Guinée, au Bénin et au Nigeria est évaluée à plusieurs centaines de tonnes [1]. Dans la seule région du Nigeria, près de 200.000 tonnes de graines sont collectées par an et transformées en «iru ou afitin». Cette graine est utilisée en pharmacopée traditionnelle [1 – 6] et surtout en alimentation humaine [1 – 3 ; 6]. Une étude de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) indique que 100g de Sumbala apportent à l'organisme 432cal et contiennent 36,5mg de protéides, 28,8g de lipides, 37g de fer [7], des B2 et PP. A titre comparatif, 100g de poudre de feuilles de moringa y apportent 205cal, 27,1g de protéides, 2,3g de lipides et 28,2mg de fer [11 – 14]. La transformation traditionnelle des graines de néré en afitin est une opération comportant plusieurs étapes: la pré - cuisson des graines, le décorticage séparant le tégument des cotylédons, le rinçage, le triage, la cuisson des cotylédons, et la fermentation alcaline [1]. Le décorticage demeure l'opération la plus fastidieuse et la moins hygiénique [12–16]. Dans la sous région ouest africaine, diverses investigations [10 ; 13 ; 16 – 18] sont menées ou en cours, toujours dans le souci de lever ou tout au moins d'amoindrir les contraintes liées à cette pénibilité, de moderniser l'activité pour à termes standardiser la technologie d'obtention du afitin. C'est dans cette optique que s'insère la mise au point d'une décortiqueuse expérimentale UAC-INRAB en 2004 [18]. Elle résulte de l'importante collaboration existant entre les chercheurs de l'Université d'Abomey–Calavi (UAC) et ceux de

l'Institut National de la Recherche Agricole du Bénin (INRAB). Des résultats très intéressants en ont été obtenus. Néanmoins, la plage explorée pour les variables opératoires a été jugée étroite [18]. De plus, certains de ces résultats semblent révéler des imperfections liées à la décortiqueuse. Le présent article est essentiellement consacré à l'étude des influences de deux variables expérimentales, débit de graines de néré et vitesse de la grille motrice, sur les paramètres caractérisant l'efficacité de la décortiqueuse en vue de l'optimisation de son exploitation.

1- MATERIEL ET METHODES

Les différents essais ont été effectués à l'unité expérimentale de Transformation des produits de la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey–Calavi (UAC). Les diverses analyses sont réalisées dans les Laboratoires du Programme de Technologies Agricoles Alimentaires (PTAA) et de la FSA.

1-1- Matière végétale : les graines de néré

Un bon décorticage dépend, non seulement de l'opération elle-même, mais aussi de la matière première [15 ; 16 ; 23]. Une graine est considérée comme décortiquée, si 90% environ de sa coque a été enlevée [17 ; 18]. Les graines de néré, sur lesquelles ont porté les investigations, sont celles de la variété tout venant acquise à N'Dali. La caractérisation physico mécanique des graines fait l'objet d'une étude antérieure [22]: le tableau I ci-après est un extrait de données résultant.

Tableau I: Caractéristiques physiques et mécaniques des graines de néré utilisées [22]

Désignations des paramètres mesurés	Valeur	Unité
Teneur en eau initiale	3,07 ± 0,07	%
Masse de 1000 graines	222,97 ± 3,58	g
Poids amandes / Poids graines	62,77	%
Poids coques / Poids graines	37,23	%
Densité	1,183 ± 0,052	-
Densité relative	627 ± 33	kg / hL
Aire massique	0,72 ± 0,02	m ² / kg
Taux de réduction	1,23	-
Aplatissement	1,52	-
Elongation	1,22	-
Diamètre équivalent	7,04	mm
Volumique massique	0,05 ± 00	m ³ / kg
Volume de 1000 graines	183,25 ± 6	mL

EFFETS DU DEBIT D'ALIMENTATION ET DE LA VITESSE DE GRILLE MOTRICE SUR LES PERFORMANCES D'UNE DECORTIQUEUSE DE GRAINES DE NERE «PARKIA BIGLOBOSA»

1-2- Matériel de décortiquage

La machine utilisée dans cette étude est une décortiqueuse expérimentale de graines de néré conçue et réalisée au PTAA en 2004 [19]. Elle comporte quatre principaux organes: une trémie d'alimentation en graines (capacité 8kg), une chambre de décortiquage, un moteur thermique à essence et un module de séparation formé d'un ventilateur et d'un canal de séparation.

1-3- Expérimentation

La plage des vitesses de la grille motrice explorée va de 185 à 542tr/min et celle de graines de néré de 200 à 350kg/h. Six (06) valeurs particulières de la vitesse ont été constamment visées: 185 – 221 – 257 – 320 – 428 – 542tr/min et quatre (04) pour le débit: 200 – 250 – 300 – 350kg/h. La variation de vitesses est obtenue au moyen de jeux de poulies de différents diamètres calées sur l'axe de la grille mobile. Celle de débits est faite par permutation de cylindres calibrés insérés en sortie de la trémie d'alimentation. Pour chaque vitesse, on investit cette série de débits.

- le Taux de brisure des cotylédons (T_B): $T_B = m_b / M_p$ (%) ;
- le Taux de décortiquage (T_D): $T_D = m_d / M_p$ (%) ;
- le Taux de graines non décortiquées (T_N): $T_N = m_n / M_p$ (%) ;
- la Capacité horaire (C_H): $C_H = M_E / t_h$ (kg/h),
- et l'Indice de décortiquage (I_D): $I_D = [(m_c + m_h) - (m_n + m_b)] / M_E$ (sans unité).

Dans ces relations, apparaissent la masse m_b des coques vannées et la masse M_E d'échantillon, notamment dans le calcul de la capacité horaire (C_H) et l'indice de décortiquage (I_D). Ce dernier sert à la mesure l'efficacité globale de la décortiqueuse [10 ; 17 ; 18]. Sa valeur théorique est située dans l'intervalle [-1; +1] où (-1) coorespond à la brisure totale des graines et (+1) indique le décortiquage parfait i. e. sans brisure et sans graines non décortiquées.

1-5- Exploitation des données et présentation des résultats

Le traitement des données est exécuté sous STATGRAPHICS Plus 5.1, un puissant logiciel d'analyses statistiques adapté à ce genre de problème.

Son avantage réside dans le fait qu'il permet

Il en découle un plan d'expériences à vingt quatre (24) points. Tout point est répété six (6) fois. On utilise un échantillon de graines de masse $M_E = 3\text{kg}$ par essai. La teneur en eau est contrôlée et maintenue à 6%. La durée du décortiquage (t_D) est mesurée à l'aide d'un chronomètre. Le décortiquage de l'échantillon donne accès à deux fractions du produit:

- la première est le mélange formé par les cotylédons brisés ou non et les graines non décortiquées ou partiellement décortiquées,
- la seconde est composée de coques et de graines brisées.

On prélève un sous échantillon $M_p = 500\text{g}$ dans la première fraction. Il est manuellement séparé en trois (03) sous fractions respectivement pesées afin d'en déterminer les masses, de cotylédons entiers ou éclatés en deux (m_c), de graines non atteintes ou partiellement décortiquées (m_n) et de cotylédons brisées (m_b).

1-4- Expression des parametres de performance

L'efficacité de la décortiqueuse est évaluée à partir des paramètres ci-après exprimés [10 ; 17 ; 18]:

d'analyser aussi bien, l'influence isolée des variables étudiées (vitesse et débit), que celle de leurs interactions, et en un nombre réduit d'essais, donc de coût. On peut y générer une procédure d'optimisation à variable multiple fournissant les valeurs optimisées, aussi bien des paramètres expérimentaux, que celles des caractéristiques de performance recherchées.

La présentation et l'analyse des résultats d'interactions des paramètres étudiés, sur ceux d'évaluation de l'efficacité, sont faites au moyen des surfaces de réponse. Le niveau de confiance adopté est 95%, valeur classique dans les analyses statistiques des données et affichée avec délimitation en trait interrompu sur les graphiques d'effets isolés de

PARETO.

2- RESULTATS ET COMMENTAIRES

avec leurs écarts-types, ainsi que les plages explorées des paramètres étudiés sont résumées dans le tableau II.

Les moyennes des valeurs obtenues pour les variables caractéristiques de la performance de la décortiqueuse

Tableau II: Récapitulatif des moyennes des valeurs obtenues et plages des variables étudiées

Variables étudiées	Débit de Graines de néré		Vitesse de Grille rotative	
Plages de valeurs explorées	200 à 350 kg/h		185 à 542 tr/min	
Nombre de points expérimentaux: 24	Variables réponses: (moyenne des valeurs)			
Nombre d'essais par point : 6	CH	TB	TD	ID
Valeur moyenne maximale	245,00	26,90	90,06	0,90
Valeur moyenne minimale	75,00	6,27	41,76	-0,14
Moyenne des moyennes	151,79	15,24	61,01	0,22
Ecart-Type des Moyennes	52,73	5,64	15,78	0,32

2-1- Analyse set optimisation de la capacite Horaire

Les données acquises, pour la capacité horaire (C_H), montrent que la variation de débit de graines (B, figure1-1, à gauche) a une très grande influence sur ce paramètre de performance de la décortiqueuse. L'accroissement de débit s'accompagne d'une augmentation considérable de la capacité horaire. L'amélioration ainsi enregistrée, est justifiée par le fait que, l'écoulement des graines de néré est maîtrisé et meilleur comparativement à celui des essais préliminaires [19]. L'alimentation de la décortiqueuse avait été très tôt limitée par l'effet de bourrage apparu dans la goulotte d'entrée de graines. Les modifications apportées à ce niveau ont permis d'accroître considérablement le débit d'alimentation en graines: sa valeur maximale passe de 66,67kg/h à 350kg/h. La

capacité horaire maximale passe alors à 245kg/h contre 80kg/h initialement, soit un taux d'accroissement de 206,25%, l'optimum se situant à 207,57kg/h.

La vitesse de la grille décortiqueuse (A) influe très peu sur la capacité horaire de la machine. Son impact n'est pas statistiquement significatif au seuil de confiance de 95%, bien qu'un faible effet positif soit enregistré (légende +, graphique 1-1). S'agissant de l'intensité des effets produits sur la capacité horaire (C_H), celle résultant du débit de graines de néré ($\cong 3,84$) avoisinant le double de la valeur requise ($\cong 2,1$) pour satisfaire au critère de la significativité (95%). On peut alors retenir que l'amélioration de la capacité horaire passe par celle de débit d'alimentation en graine.

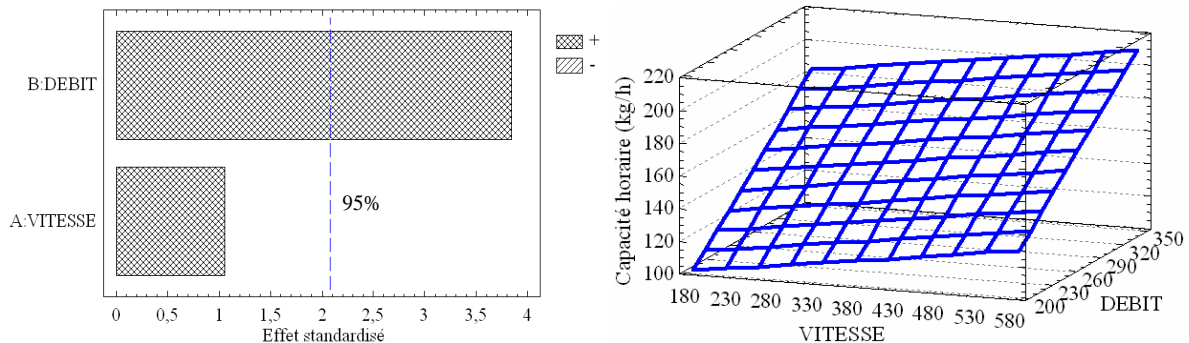


Figure 1 : 1-1- Graphique standardisé de PARETO pour l'Influence des variables étudiées sur la capacité horaire. 1-2- Surface de réponse des interactions du Débit et de la Vitesse de grille sur la Capacité horaire.

EFFETS DU DEBIT D'ALIMENTATION ET DE LA VITESSE DE GRILLE MOTRICE SUR LES PERFORMANCES D'UNE DECORTIQUEUSE DE GRAINES DE NERE «PARKIA BIGLOBOSA»

Pour assurer un pilotage direct de la machine, nous avons déterminé l'équation du modèle de régression ajusté aux valeurs de la capacité horaire, équation dans laquelle les variables sont exprimées dans leurs unités initiales : Débit (kg/h) et Vitesse (tr/min). Elle est représentée par :

$$C_H = -19,471 + (0,5444 \times \text{Débit}) + (0,0673 \times \text{Vitesse}).$$

L'évolution de la capacité horaire (C_H) aux interactions entre le débit de graines et la vitesse de rotation de la grille est présentée à la figure 1-2 (à droite). Cette analyse montre à 95% : la capacité horaire optimale est de $C_{Hop} = 207,568 \approx 208 \text{kg/h}$. Elle est obtenue pour les valeurs optimisées de débit de

350kg/h et de vitesse de 542tr/min. Cela signifie qu'en optant pour une capacité optimale au détriment des autres paramètres d'efficacité, la décortiqueuse devra alors être exploitée, dans son état actuel, au point de fonctionnement repéré par les coordonnées:

$$D_{op} = 350 \text{kg/h}, \quad V_{op} = 542 \text{tr/min}, \quad C_{Hop} = 208 \text{kg/h}.$$

2-2- Analyse et optimisation du taux de décortage

Les résultats obtenus montrent que le taux de décortage (T_D) est quasi insensible à la variation du débit d'alimentation en graines de néré (facteur B, figure 2-1, à gauche). L'augmentation de la vitesse de la grille mobile (facteur A) affecte de façon relativement notable le taux de décortage (T_D).

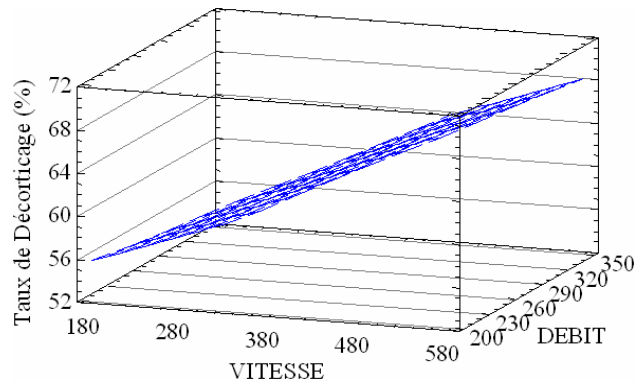
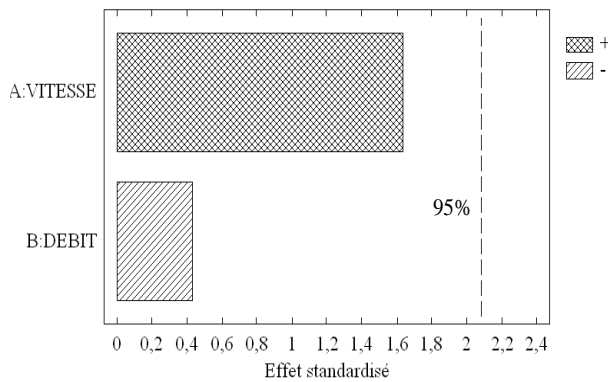


Figure 2 : 2-1 – Graphique standardisé de PARETO présentant l'influence des variables étudiées sur le Taux de Décortage. 2-2- Surface de réponse des interactions du débit et de la vitesse de grille sur le Taux de Décortage.

Toutefois, son influence n'est pas statistiquement significative au niveau de confiance de (95%). Environ 1/5 de la valeur de l'effet enregistré est encore nécessaire pour statistiquement valider l'influence de la vitesse. Cela n'exclut nullement d'en tenir compte. L'équation du modèle de régression ajusté aux valeurs du taux de décortage mesurées dans cette étude est exprimée par:

$$T_D = 53,2562 - 0,0235 \times \text{Débit} + (0,0401 \times \text{Vitesse}),$$

où les variables sont spécifiées dans leurs unités initiales (kg/h et tr/min). Les résultats de l'étude du taux de décortage (T_D), aux interactions du débit et de la vitesse, sont présentés au moyen de la surface de réponses (figure 2-2, à droite). Ils révèlent que les meilleures valeurs de T_D sont obtenues à vitesses élevées de rotation de la grille, indépendamment du débit de graines de néré. Il en découle aussi le taux de

décortage T_{Dop} qui est de valeur 70,30% dérivant de celles des variables expérimentales suivantes: vitesse de rotation de la grille décortiqueuse 542Tr/min et débit de graines de néré 200kg/h. Ce résultat corrobore la tendance observée par Hucl et *al.* [10]. En effet, dans une investigation relative au décortage du sorgho, ces auteurs avaient antérieurement noté des résultats analogues en relevant que les meilleurs taux provenaient des valeurs de vitesses de décortage relativement plus élevées, opérant entre 600 et 1100Tr/min. L'équipement utilisé dans notre présente étude n'offre pas, pour l'instant, la possibilité d'atteindre ces valeurs de vitesse pour la grille décortiqueuse. Cependant, les mêmes tendances qui s'observent avec les données enregistrées attestent qu'une poursuite des modifications est indispensable à ce niveau pour réellement appréhender l'importance

EFFETS DU DEBIT D'ALIMENTATION ET DE LA VITESSE DE GRILLE MOTRICE SUR LES PERFORMANCES D'UNE DECORTIQUEUSE DE GRAINES DE NERE «PARKIA BIGLOBOSA»

de l'influence de la vitesse de la grille décortiqueuse sur ce paramètre.

2-3- Analyse et optimisation du taux de brisure des cotylédons

Le taux de brisure des cotylédons (T_B) est une caractéristique que nous considérons aussi importante pour juger de l'efficacité d'une décortiqueuse. Plus ce taux est faible, meilleure sera l'efficacité de la décortiqueuse, notamment à délivrer des cotylédons

entiers. Car c'est là aussi, un aspect qui participe de la qualité du produit final, sous l'angle des modes de présentations du afitin, puisque dans certaines régions consommatrices, l'entièreté du cotylédon est préférée.

L'exploitation statistique des résultats expérimentaux a montré que le Taux de brisure des cotylédons est très peu influencé par la variation de la vitesse de la grille (A, figure 3-1, à gauche). Mieux, ce taux reste aussi quasi insensible à la variation du débit de graines (B).

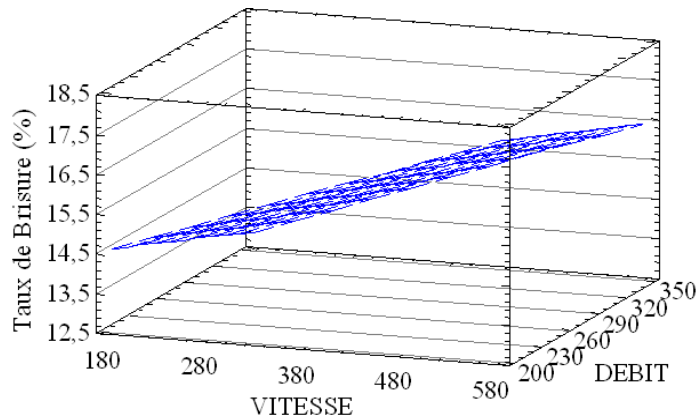


Figure 3 : 3-1 – Graphique standardisé de PARETO pour l'influence des variables étudiées sur le Taux de Brisure. 3-2- Surface de réponse des interactions du Débit et de la Vitesse de grille sur le Taux de Brisure.

L'équation du modèle de régression ajusté aux valeurs obtenues pour le Taux de brisure T_B est donné par:

$$T_B = 15,2028 - (0,0110 \times \text{Débit}) + (0,0087 \times \text{Vitesse})$$

où les variables sont toujours spécifiées dans leurs unités initiales: (kg/h et tr/min). Ce modèle montre que la constante est négative pour le débit de graines alors que celle de la vitesse de grille reste positive. Cela signifie que, bien que les effets des deux variables ne soient pas statistiquement significatifs dans les plages des valeurs explorées, le taux de brisure augmente quand même légèrement avec l'accroissement de la vitesse, tandis qu'il diminue avec l'augmentation de débit de graines. Les réponses du taux de brisure des cotylédons (T_B) à la variation simultanée du débit et de la vitesse sont présentées à la figure 3-2 (à droite).

Pour minimiser le taux de brisure et mieux accroître l'efficacité de la décortiqueuse, il faut que cette machine soit exploitée dans des conditions opératoires optimales définies par les suivantes: débit de graines de néré 287kg/h, vitesse de la

grille 249,733 \approx 250tr/min. Ce qui conduit à l'obtention de T_{Bop} égale à 13,02%. Cet optimum (T_{Bop}) est nettement supérieur aux plus faibles valeurs enregistrées durant l'exploitation de la décortiqueuse au cours de certains de nos essais (6,27 à 8,06%), le maximum étant situé aux alentours de 26%. Certains de nos résultats, notamment pour cinq points expérimentaux répétés six fois, ont fourni des valeurs moyennes du Taux de brisure comprises entre 10,30 et 11,83%. Ils confirment ainsi les ordres de grandeurs obtenus dans nos investigations antérieures 10 à 11% [19 ; 20], mais pour des valeurs de capacité horaire nettement faibles (\leq 66,67kg/h). Ces résultats attestent la bonne performance acquise avec la version améliorée de la décortiqueuse de graines de néré.

2-4- Analyse et optimisation de l'indice de décortiquage

Les résultats des essais effectués (Figure 4:1-2) ont montré que l'augmentation de la vitesse de la grille décortiqueuse, quoique n'ayant pas d'effet statistiquement significatif (à 95%), affecte néanmoins positivement (+) et de façon relativement appréciable, l'indice de décortiquage (I_D). Le débit d'alimentation en

EFFETS DU DEBIT D'ALIMENTATION ET DE LA VITESSE DE GRILLE MOTRICE SUR LES PERFORMANCES D'UNE DECORTIQUEUSE DE GRAINES DE NERE «PARKIA BIGLOBOSA»

graines n'y a quasiment pas d'influence; mieux la tendance enregistrée pour ce facteur s'avère plutôt négative (-) donc réductrice de l'Indice de décortiquage.

les valeurs acquises, a pour équation:

Le modèle de régression linéaire, fixant adéquatement

$$I_D = 0,085 - (0,0004 \times \text{Débit}) + (0,0006 \times \text{Vitesse}).$$

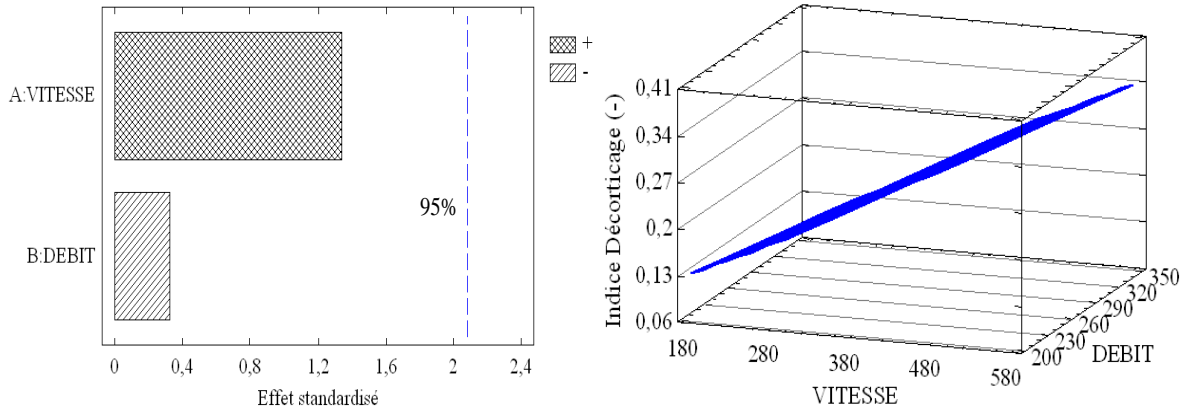


Figure 4 : 4-1- Graphe standardisé de PARETO pour l'influence des variables étudiées sur l'Indice de Décortiquage. 4-2- Surface de réponse des interactions du Débit et de la Vitesse de grille sur l'Indice de Décortiquage.

L'étude de l'interaction de la vitesse de la grille et du débit de graines, en vue de l'optimisation de l'Indice de décortiquage (I_D), conduit à faire fonctionner la décortiqueuse dans les conditions opératoires maximisant ce paramètre. Il est obtenu pour un débit de graines égal à 200kg/h et une vitesse de grille de 542tr/min donnant l'indice optimal de décortiquage de valeur $I_D=0,368 \approx 0,37$. Ce résultat est jugé satisfaisant d'autant que les valeurs moyennes enregistrées pour l'ensemble des vingt quatre points expérimentaux,

répétés six fois par point, se situent entre - 0,14 et + 0,90, la moyenne et l'écart - type étant respectivement de 0,22 et 0,32. L'indice optimal (0,37) ainsi obtenu reste néanmoins assez éloigné de celui de référence exprimant le décortiquage parfait (valeur +1).

Le tableau III récapitule les valeurs optimales des quatre variables de caractérisation de performance de la décortiqueuse ainsi que celles des deux paramètres étudiés.

Tableau III : Conditions opératoires associées aux valeurs optimales des caractéristiques de performance

Facteurs	Valeurs des facteurs optimisant chaque variable réponse			
Vitesse (tr/min)	350,0	542,0	542,0	542,0
Débit (kg/h)	185,0	200,0	350,0	200,0
Valeurs optimales des réponses pour ces conditions expérimentales				
Variables	Taux de brisure	Taux de décortiquage	Capacité horaire	Indice décortiquage
Réponses	13,02 (%)	70,30 (%)	207,57 (kg/h)	0,37 (-)

2-5- Analyse d'optimisation multiple criteres

La procédure fournit les valeurs des combinaisons de facteurs expérimentaux (vitesse et débit) qui optimisent, de façon simultanée, les caractéristiques de la machine i. e. maximiser la capacité horaire, le taux et l'indice de décortiquage, et minimiser le taux de brisure.

EFFETS DU DEBIT D'ALIMENTATION ET DE LA VITESSE DE GRILLE MOTRICE SUR LES PERFORMANCES D'UNE DECORTIQUEUSE DE GRAINES DE NERE «*PARKIA BIGLOBOSA*»

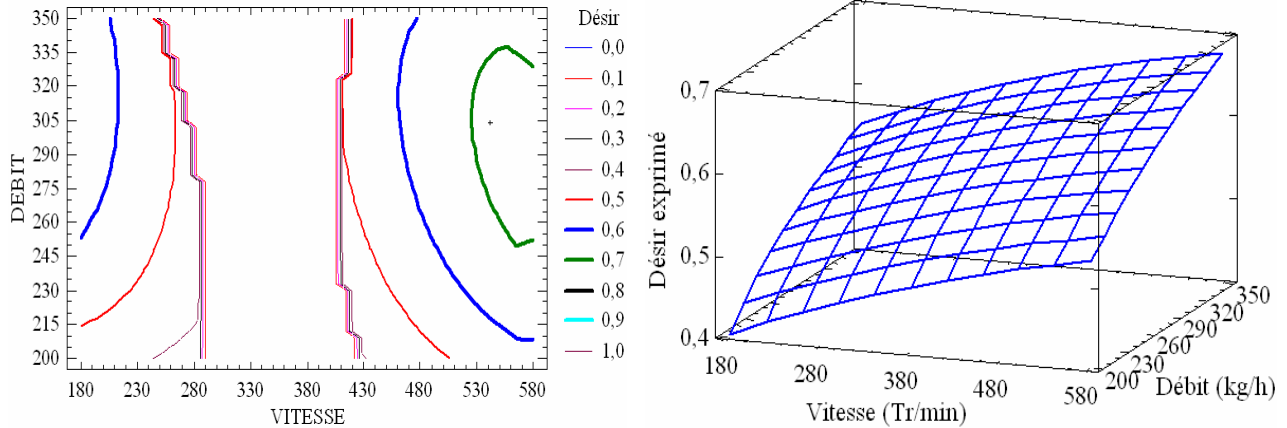


Figure 5: Contours (5 – 1, à gauche) et surface de réponse (5 – 2, à droite) pour les interactions entre le débit de graines et la vitesse de la grille décortiqueuse qui satisfont les 4 critères ci-après: maximisation de l'Indice et du Taux de Décorticage, maximisation de la Capacité Horaire et minimisation du Taux de Brisure des cotylédons.

Le paramètre, désigné par «Désir exprimé» (Figure 5), prend simultanément en compte les quatre critères. La légende de la figure 5-1 (à gauche) indique les contours des différentes zones dans lesquelles les valeurs des désirs sont satisfaites. Ces contours délimitent aussi les plages de valeurs de Débit et de Vitesse qui produisent les désirs. On cherche surtout à maximiser le «Désir exprimé». Ainsi, pour satisfaire à un désir de valeur 0,60, les conditions opératoires ne peuvent être choisies que dans deux zones. La zone de débits allant de 260 à 350kg/h et à faibles vitesses (180 et 210tr/min) ou la celle beaucoup plus étendue de débits de 210 à 350kg/h, à fortes vitesses (460 à 542tr/min). Un désir de 0,70 ne serait satisfait que si la décortiqueuse est exploitée à fortes valeurs de vitesses

(530 à 542tr/min) et à une plage de débits plus restreinte (250 à 350kg/h). Les valeurs optima sont obtenues au débit de 350kg/h et à vitesse de 542tr/min. Ce qui fournit une capacité horaire de 207,57kg/h, un taux de brisure de 16,12%, un taux décorticage de 66,74% et un indice de décorticage de 0,314. Le tableau IV présente, à titre comparatif, les ordres de grandeurs de quelques caractéristiques mesurées ou rencontrées dans la littérature. Mentionnons que très peu de données sont actuellement disponibles sur le sujet et qu'il se pose toujours quelques problèmes de terminologie en rapport avec les définitions des paramètres devant réellement caractériser l'efficacité des décortiqueuses.

Tableau IV : Quelques éléments indicatifs pour comparaison de performances des décortiqueuses.

Teneur en eau des graines §	Unité	NIGERIA	CIRAD	UAC –	UAC –INRAB	[22] UAC –
Performances machines		[21]	[20]	INRAB [19]	[22] Max-Min	INRABMO
Teneur en eau (b.s) – (b. h)	%	110 *	-	5,71**	6,00 **	6,00 **
Capacité horaire	kg/h	30,60	76,00	66,67	350,00	207,57
Rendement: amande propre	%	-	56,25	50,00	58,00	58,00
Rendement: amande référence	%	-	44,40	44,40	44,40	44,40
Taux de brisure des cotylédons	%	-	-	11,97	13,02	16,11
Taux de décorticage	%	-	99,00	-	90,06	83,64
Efficacité réelle	%	70,30	70,00	77,32	70,30	66,74

Teneur en eau: (*) base sèche; (**): base humide; Max-Min: Maximal- Minimal; MO: Optimisation Multiple.

EFFETS DU DEBIT D'ALIMENTATION ET DE LA VITESSE DE GRILLE MOTRICE SUR LES PERFORMANCES D'UNE DECORTIQUEUSE DE GRAINES DE NERE «PARKIA BIGLOBOSA»

Par ailleurs, l'accroissement obtenu pour C_H n'a en rien affecté, ni le rendement en amande propre de la décortiqueuse, encore moins le Taux de brisure. Le modèle de régression linéaire multiple entre le Taux de brisure et les trois autres variables caractéristiques a pour équation:

$$T_B = - 61,7427 - (0,01192 \times C_H) + (1,5820 \times T_D) - (80,510 \times I_D).$$

L'application du test de DURBIN-WATSON donne une valeur de probabilité associée aux données de la Capacité horaire (0,1739) supérieure à 5%. L'effet de cette dernière n'est donc pas statistiquement significatif. Ainsi, le terme qui la porte peut être négligé dans le modèle.

Enfin, une amélioration notable est atteinte pour le Taux de décortication avec les modifications apportées à la machine. Sa valeur maximale de T_D est passée de 77,32% (à $C_H=66,67\text{kg/h}$) à 90,06% ($C_H=105\text{kg/h}$), avec un indice de décortication $I_D=0,73$ et un taux de brisure tout de même relativement élevé: $T_B=20,32\%$.

CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette investigation ont prouvé la nette amélioration apportée au niveau de la performance de la décortiqueuse, notamment aux

valeurs élevées de la vitesse de sa grille motrice. Un taux de brisure minimal de 8,03%, un indice de décortication de 0,45 et un taux de décortication élevé de 68,20%, sont assurés à débit de 300kg/h et à vitesse de 542tr/min avec une capacité horaire de 166,23kg/h. Le taux maximal de décortication de 90,06% a été obtenu à cette même vitesse et à débit de 250kg/h, à capacité horaire réduite (105kg/h) pour des taux de brisure relativement élevés (10,6 à 20,32%). Cette tendance laisse présager des possibilités toujours ouvertes pour la poursuite de l'amélioration de la machine, spécialement au niveau de la vitesse de sa grille décortiqueuse. L'optimisation à multiple critères réalisée, dans l'état actuel de la machine, a permis la détermination des valeurs optima, aussi bien des variables expérimentales: débit de graines (350kg/h), vitesse de grille (542tr/min), que de celles caractérisant l'efficacité de la machine: capacité horaire (207,57kg/h), taux de décortication (66,74%), indice de décortication (0,314) et taux de brisure (16,12%). Certains résultats du présent travail confirment les valeurs obtenues dans l'investigation antérieure^[19]: taux de brisure de 10 à 11%. Les autres illustrent essentiellement le progrès qualitatif exhibé par la décortiqueuse, suite à la maîtrise du contrôle de la vitesse de la grille motrice du débit d'alimentation en graines de Néré.

LISTE DES SYMBOLES, NOTATIONS ET SIGLES

A : Débit de graines (kg/h) ;
B : Vitesse de grille rotative de décortication (tours/min ou rpm) ;
 T_D , T_{Dop} : Taux de Décortication et Taux optimal de décortication (%);
 T_B , T_{Bop} : Taux de Brisure et taux optimal minimisant la brisure des cotylédons (%);
 I_D , I_{Dop} : Indice de Décortication et Indice optimal de décortication (sans unité);
 C_H , C_{Hop} : Capacité horaire et capacité horaire optimale de la décortiqueuse (kg/h);

M_E , M_p , m_B , m_D , m_s , m_h : Masse d'échantillon et celles des différentes fractions issues (g)
UAC : Université d'Abomey – Calavi;
FSA: Faculté des Sciences Agronomiques;
PTAA: Programme des Technologies Agricoles Alimentaires;
INRAB: Institut National de la Recherche Agricole du Bénin;
FAO: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les Responsables des Laboratoires du Programme Technologie Agricole Alimentaire (PTAA) et de la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey–Calavi (UAC) et

ceux de l'Institut National de la Recherche Agricole du Bénin (INRAB) pour avoir mis leurs équipements à notre disposition dans la réalisation de ce travail. /.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. GUTIERREZ M. L., MAÏZI P., NAGO M. et HOUNHOUIGAN D. J., 2000.- *Production et commercialisation de afitin fon dans la région d'Abomey-Bohicon au Bénin*. CERNA, CNEARC, CIRAD. Rapport, 123p.
2. RATEAU N., 1995.- *Etude de la valeur nutritionnelle du néré ou «Parkia biglobosa»*. Mémoire de DESS en Nutrition et Alimentation dans les pays en développement. Université des Sciences. Montpellier II - France.
3. AGBAHOUNGBA G. et DEPOMMIER D., 1989.- Aspect du parc à karité - néré dans le sud du Borgou (Bénin). *Bois et Forêts des Tropiques* (222), pp: 41-54.
4. LOWELL J. Fuglie, 2002.- L'arbre de la vie: les multiples usages du moringa. *CTA ; CWS.*, pp: 45 - 52.
5. HOUNHOUIGAN D. J., ASSADEVO P. L., AZOKPOTA P., NAGO M.C and JACOBSEN M., 2001.- *Changements physico-chimiques et microbiologiques au cours de la fermentation du afitin fon, un condiment béninois à base de néré (Parkia biglobosa) ou du soja (Glycine max)*. Actes de l'Atelier Scientifique Post-Récolte. Bohicon, 26-27 juillet 2001. pp: 269 - 277.
6. HOKPINS H.C., 1983.- Taxonomy, reproductive biology and economic potential of *Parkia* (leguminosae: mimosoideae) in Africa and Madagascar. *Bot. J. of the Linnean Society*, 87: 135 - 167
7. ODUNFA S. A., 1985.- Dawadawa. In *Legume-based fermented foods*. N. R Reedy; M. D. Pierson and O. K Solunke (Editors). CRC Press Inc, Boca Raton.
8. NAGO C. M et HOUNHOUIGAN D. J., 1997.- *Etude technique et socio-économique de la filière "afitin" au Bénin*. Rapport du Projet ALISA.
9. KONE S., 2001.- Fabrication du "Sumbala". *Gate information service / gtz*. 4p.
10. HUCL P., HAN H.L., ABDELAAL E.M. and HUGHES G.R., 2001.- *Development and quality of glabrous canaryseed*. Final Report, pp: 27-35.
11. OUEDRAOGO A. S., 1995.- *Parkia biglobosa (Leguminosae) en Afrique de l'Ouest: Biosystème et Amélioration*. Institute for Forestry and Nature Researc., Wagennigen, The Netherlands.
12. HOUNHOUIGAN D. J., ASSADEVO L. C., HONGBETO F., AZOKPOTA P., NAGO M. C et JACOBSEN M., 2001.- *Caractérisation physico-chimique et perspective de valorisation de afitin au Bénin*. Actes de l'Atelier Scientifique International sur la Recherche - Développement des Technologies Post-Récolte en Afrique. p 295.
13. CHASSERAY P., 1991.- Caractéristiques physiques des grains et de leurs dérivés. In *Les industries de première transformation des céréales*. Technique et documentation - Lavoisier ISBN : 2 - 85206 - 610 - 6. pp:105-144.
14. DIAWARA B., 1993.- Contribution à l'étude du procédés traditionnels de fabrication des "sumbala" au Burkina Faso. Aspects biochimiques, microbiologiques et technologiques. *Sci. & Technol.*, Vol 20 (2) : 5-14.
15. FLIEDEL G., MONTI A. and THESBANT S., 1996.- *Caractérisation et valorisation du sorgho*. CIRAD-CA Montpellier, France. (ISBN 2- 81614-2171). 404 p.
16. FLIEDEL G., GRENET C., GONTARD N. et PONS B., 1989.- *Durété, caractéristiques physico-chimiques et aptitudes au décorticage des grains de sorgho*. Laboratoire de technologie des céréales, IRAT - CIRAD. Montpellier, France.
17. OPOKU A., TABIL L, SUNDARAM J, CRERAR W. J. and PARK S. J., 2003.- *Conditioning and Dehulling of Pigeons Peas and Mung Beans*. Presentation at CSAE / SCGR 2003 Meeting. Montreal, p 16.
18. BELLIANCHICOV N. N., 1990.- *Mécanisation de l'élevage et de la préparation du fourrage*. 366p.
19. HOUNHOUIGAN D. J, AHOANSOU R and MADODE Y., 2004.- *Test d'adaptation en station d'une Décortiqueuse de Néré pour la Production de « Afitin » au Bénin*. Rapport 2004.
20. TRAORE Z., SON G. et DIAWARA B, 2004.-

EFFETS DU DEBIT D'ALIMENTATION ET DE LA VITESSE DE GRILLE MOTRICE SUR LES
PERFORMANCES D'UNE DECORTIQUEUSE DE GRAINES DE NERE «PARKIA BIGLOBOSA»

Décorticage mécanique des graines de néré. Valorisation technologique et nutritionnelle du néré ou Parkia biglobosa (Jacq.) benth: une espèce agro forestière. Diawara B. et Jakobson M., Edit. ISSN 0796-6954, DANIDA-KVL- NRST/IRSAT, pp: 145-150.

21. AUDU A., OLOSO A. O. and UMAR B., 2004.- Development of a Concentric Cylinder Locust Bean Dehuller. Agricultural Engineering International: the CIGR.. *Journal of Scientific Research and Development. Manuscript PM 04 003*; Vol. VI.

22. AHOUANSOU R., 2005.- *Optimisation des performances des équipements agroalimentaires: application à la décortiqueuse de néré.* Rapport de DEA Sciences Pour l'Ingénieur. EPAC- UAC- Bénin. 58p.

23. REICHERT R. D, OOMAH B. D and YOUNGS C. G, 1979.- Factors affecting the abrasive-type dehulling of grain legumes investigated with a new intermediate-sized batch dehuller. *J. Food Sci.*, 49: 267-272.

Résumé

Dans le développement de cette thèse, les caractéristiques physiques et mécaniques des graines de néré ont d'abord été mesurées. Les variables obtenues sont indispensables à la définition, la conception à travers les calculs d'ingénierie et à la réalisation de la décortiqueuse des graines. Une décortiqueuse à graines de néré crues et sèches a alors été mise au point et ses performances techniques optimisées. Toutefois, dans le souci de l'amélioration des capacités opérationnelles de la machine, l'étude a permis d'identifier, parmi les prétraitements applicables aux graines, la cuisson en eau bouillante durant 4 h comme étant le meilleur à assurer préalablement au décortilage. S'en sont alors suivis les tests d'optimisation relativement aux graines cuites induisant d'importantes modifications techniques sur l'équipement amenant à la réalisation d'une décortiqueuse nouvelle version dont la conception, la validation et l'optimisation des performances ont été basées sur l'approche centrée sur les utilisatrices. Lorsque la décortiqueuse à graines cuites à 4 h est calée sur un régime de grille active de 666 tr/mn et un diamètre de trémie de 116mm, les valeurs optimisées des paramètres de performance suivantes sont enregistrées: Indice de décortilage 0,91%, Taux de décortilage 96,27 %, Taux de brisure 1,47 %, Rendement au décortilage 50,35%, Capacité horaire 773 kg/h et facteur d'efficacité 702,16 kg/h. Par ailleurs, les caractéristiques physiques et mécaniques de la poudre d'afitin sont évaluées en fonction de la teneur en eau et de la pression de compactage et comparées à celles des cubes vendus sur le marché national. Les résultats ont montré que la teneur en eau de la poudre d'afitin permettant d'obtenir un bon produit est comprise entre 9 % et 15 %, les pressions correspondantes se situant entre 9,5 bars et 11,89 bars, la compressibilité de la poudre augmentant avec l'accroissement de sa teneur en eau. Lorsque la teneur en eau de la poudre d'afitin augmente de 7 à 18 % (b h), le coefficient de compressibilité croît de 0,37 à 0,48. Ces données ont servi aux calculs de conception et de réalisation de la presse de formage des cubes d'afitin de capacité horaire de 2000 cubes/h. Le cube «afitin» produit présente une charge moyenne à la rupture égale à 30,66 N, une dureté de 80,66 % et une masse de 7,5 g.

Mots clés : graine de néré, décortiqueuse, afitin, presse, cube, optimisation.

Abstract

The physical and mechanical properties of locust bean seeds have first been measured. The gotten variables are indispensable to the definition, the conception through the engineering calculations, the realization of the equipment required to assure the dehulling of the seeds. A dehuller of raw and dry locust bean seed has been put then to the point and its technical performances optimized. However, in the worry of the improvement of the operational capacities of the machine, the survey permitted to identify, among the treatments applicable to the seeds, cooking in boiling water during 4 h as being the best to assure to the dehulling previously. Are followed then relatively the tests of optimization of it to the seeds cooked misleading important technical modifications on the equipment bringing to the realization of a new version dehuller of which the conception, validation and the optimization of the performances have been based on the approach centered on the users. When the seeds cooked to 4h is stalled on a regime of active grid of 666 tr/mn and a diameter of hopper of 116mm, the values optimized of the performance parameters follow are recorded: Dehulling index 0,91%, Dehulling percentage 96,27%, Percentage of broken cotyledon 1,47%, Dehulling yield 50,35%, Throughput 773 kg/h and factor of efficiency 702,16 kg/h. The physical and mechanical features of the powder of afitin are valued according to the content in water and the pressure of compaction and are compared to those of the cubes sold on the national market. The results showed that of the content in water of the powder of afitin permitting to get a good product is consisted between 9% and 15%, the corresponding pressures being located between 9,5 bars and 11,89 bars, the compressibility of the powder increasing with the growth of its water content. These data served to the calculations of conception and realization of the press of formage of the cubes of afitin of throughput of 2000 cubes/h. The cube "afitin" produces present a middle load to the equal rupture to 30,66 N, a toughness of 80,66% and a mass of 7,5 g.

Key words: locust bean seeds, dehuller, afitin, press, cube, optimization.

