

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



FACULTE DE MEDECINE, DE PHARMACIE ET D'ODONTOLOGIE

Laboratoire de Chimie Analytique et de Bromatologie

ANNEE : 2015/2016

N° : 092

MEMOIRE

MASTER ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

ET MANAGEMENT DE LA QUALITE DES PRODUITS

DE SANTE ET DES ALIMENTS

***EFFETS DE L'ETUVAGE SUR LES PROPRIETES
PHYSIQUES ET BIOCHIMIQUES DU FONIO PRODUIT
AU SENEGAL***

Présenté et soutenu le **10 Juin 2016 à 10H**

par

Mme Djinda Marie SENE

Née le 16 Avril... à DAKAR (SENEGAL)

MEMBRES DU JURY

PRESIDENT:	M.	Yérim Mbagnick	DIOP	: Professeur
MEMBRES:	M.	Serigne Omar	SARR	: Maitre de Conférences Agrégé
	M.	Cheikh	DIOP	: Assistant
	M.	Fallou	SARR	: Directeur de recherche
DIRECTEUR DE MEMOIRE:	M	Fallou	SARR	: Directeur de recherche

DEDICACES

JE DÉDIE CE TRAVAIL...

**À MA GRAND-MÈRE JOSÉPHINE PREIRA DE VALERA MA RÉFÉRENCE,
MA CONFIDENTE...**

**À MES PARENTS OUSMANE SENE ET ANNE MARIE CARVALHO MA
SOURCE DE MOTIVATION...**

**À MES FRÈRES ET SŒURS, MES COMPAGNONS DANS LES BON ET DURE
MOMENTS...**

À MON MARI CHEIKH AHMADOU BAMBA KEBE, MON AMI, MON SOUTIEN...

**JE VOUS REMERCIE POUR VOTRE SOUTIEN INCONDITIONNEL ET VOS
ENCOURAGEMENTS SANS LESQUELS JE N'EN SERAIS PAS LÀ
AUJOURD'HUI.**

**QU'ILS PUISSENT TROUVER DANS CE TRAVAIL LE TÉMOIGNAGE DE MA
SINCÈRE GRATITUDE ET DE MON PROFOND RESPECT.**

REMECIEMENTS

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de stage, M. Fallou SARR, responsable de l'atelier céréales et légumineuses et chef du projet « céréales étuvés » pour m'avoir accueilli chaleureusement au sein de son équipe. Ses remarques, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise, ses conseils et son ouverture d'esprit sont autant d'éléments qui m'ont permis d'atteindre les objectifs de l'entreprise dans le cadre de mon mémoire. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

J'adresse de chaleureux remerciements à son assistant, Mamadou Salif SOW pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de ce mémoire. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui. Un grand merci à sa famille depuis Kolda. Leur hospitalité et leur gentillesse m'ont profondément marqué lors de mes missions.

Je désire remercier le directeur général M. Amadou SECK et tout son personnel, surtout le personnel des laboratoires de chimie et de phytosanitaire ainsi que l'atelier céréale et légumineuse, pour leur implication dans mon mémoire, leur professionnalisme et leur sympathie. Le cadre de travail était idéal.

J'adresse de sincères remerciements au WAAPP pour m'avoir octroyé une bourse qui m'a permis de mener à bien mon travail de mémoire.

Un grand merci aux étudiants de ma promotion et à tous les stagiaires de l'ITA : Ousmane NDIAYE, Stephany Aida MAGANGA TCHITOUA, Fatou WELLE, Moustapha NDIAYE, Barka NDIAYE, Oumar GUEYE, Seye SENE, Harouna MAREGA, Dr WANE et Birima SENE pour leur aide et leur bonne humeur. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec eux.

A nos professeurs j'adresse mes sincères remerciements ainsi qu'aux intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches. Mention spécial à Dr Rokhaya GUEYE pour avoir corrigé mon mémoire et à Mme ROSE pour ses qualités humaines.

A nos maitres et juges

A Notre Maître et Président de Jury

Professeur Yérim Mbagnick DIOP

Nous sommes très honorées de la spontanéité avec laquelle vous avez
Accepté de présider ce jury de mémoire malgré vos multiples occupations.
Nous avons eu le privilège de travailler parmi votre équipe et d'apprécier
Vos grandes qualités humaines et professionnelles, votre simplicité et
Votre disponibilité qui fait de vous un enseignant exceptionnel.
Nous vous prions d'accepter, Cher Maître, l'expression de notre sincère
admiration et notre profond respect.

A Notre Maître et Juge

Professeur Serigne Omar SARR

Maître de Conférences Agrégé de Chimie Analytique

Nous saisissons cette occasion pour vous exprimer toute notre reconnaissance et nos sincères
remerciements.

Nous vous prions d'accepter, monsieur le professeur, l'expression de notre profonde et
respectueuse gratitude.

A Notre Maître et Juge

Dr Cheikh DIOP

Merci d'avoir accepté, avec grande sympathie, de juger ce travail malgré votre emploi du
temps trop chargé.

Recevez ici, notre parfaite reconnaissance et notre grande estime.

A Notre Maître et Directeur de Mémoire,

M. Fallou SARR Chef d'Atelier Céréales et Légumineuses à l'ITA

N'eut été votre soutien et contribution, ce travail ne serait pas possible.

Votre simplicité, votre bonté et votre courtoisie m'ont profondément marqué.

Monsieur, veuillez recevoir l'expression de mes sentiments les plus distingués et ma profonde
gratitude

LISTE DES ABREVIATIONS

AOAC: Association of Official Analyst Chemical.

CERAAS: Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse.

CIRAD: Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement.

EDTA: Acide Ethylène Diamine Tétra Acétique.

EPCST: Etablissement Public à Caractère Scientifique et Technologique.

FAO: Food and agriculture organisation (Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture des Nations Unies).

FAOSTAT: Agence des Statistiques de la FAO (Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture des Nations Unies).

FED: Fonio Euvé Décortiqué.

FNED: Fonio Non Euvé Décortiqué.

ITA: Institut de Technologie Alimentaire.

M.S : Matière sèche

OMS: Organisation Mondiale de la Santé.

ONG: Organisation Non Gouvernementale.

PME: Petites et Moyennes Entreprises.

PMI: Petites et Moyennes Industries.

WAAPP: West African Agricultural Productivity Program (en français PPAAO Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest).

SNRASP: Système National de Recherche Agricole et Agro-Sylvo-Pastorale.

UNICEF: United Nation Children's Emergency Fund (Fond des Nations Unies l'Enfance).

USAID: United States Agency for International Development.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Zone de culture du fonio au Sénégal	5
Figure 2: Structure du grain de fonio	13
Figure 3 : Procédé d'étuvage du fonio	21
Figure 4 : Schéma d'échantillonnage pour la détermination de la température de trempage du fonio	27
Figure 5 : Rendement au décorticage des différents échantillons de fonio décortiqué.....	31
Figure 6 : Taux de brisure des différents échantillons de fonio décortiqués.....	32
Figure 7 : Teneur en protéines des différents échantillons de fonio	34
Figure 8 : Teneur en amidon des différents échantillons de fonio	35
Figure 9 : Teneur en amylose des différents échantillons de fonio.....	36
Figure 10 : Teneur en cellulose des différents échantillons de fonio.....	37

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Grains de fonio mal décortiqués	6
Photo 2 : Séchage du fonio.....	8
Photo 3: Battage du fonio.....	9
Photo 4 : Vannage du fonio.....	9
Photo 5 : Echantillon de fonio brut	19
Photo 6: Tamisage du fonio	22
Photo 7: Vannage du fonio à Kolda	22
Photo 8 : Lavage du fonio	23
Photo 9 : Trempage du fonio à chaud	23
Photo 10 : Etuvage proprement dit du fonio	24
Photo 11 : Séchage du fonio à Kolda	24
Photo 12 : Décortiqueuse Sanoussi	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Pays producteurs de fonio.....	8
Tableau II : Comparaison de la valeur nutritive des céréales décortiquées.....	14

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I. Généralités	5
I.1. Origine	5
I.2. Zone de production	5
I.3. Ecologie	5
I.4. Botanique	6
I.5. Aspect et techniques culturaux	6
I.6. Volume de production	7
I.7. Opérations post-récolte	8
I.8. Traitement technique	10
I.8.1. Décorticage et mouture	10
I.8.2. Procédé d'étuvage	11
I.9. Structure physique et composition du grain de fonio	12
DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE	17
I. OBJECTIFS	18
II. PRESENTATION DU CADRE DE L'ETUDE	18
III. MATERIEL ET METHODES	19
III.1. Matériel	19
III.2. Méthodes	20
III.2.1. Méthode de détermination des paramètres du trempage	20
III.2.1.1. Nettoyage à sec	21
III.2.1.2. Lavage	22
III.2.1.3. Trempage	23
III.2.1.4. Etuvage	23
III.2.1.5. Séchage	24
III.2.1.6. Décorticage	24
III.2.2. Méthodes de détermination des paramètres technologiques	25
III.2.3. Description des échantillons	26

III.2.4. Méthodes de détermination des paramètres biochimiques	27
III.2.4.1. Préparation des échantillons.....	27
III.2.4.2. Détermination de la teneur en protéines	27
III.2.4.3. Détermination de la teneur en amidon	28
III.2.4.4. Détermination de la teneur en amylose.....	29
III.2.4.5. Détermination de la teneur en cellulose	29
III.2.5. Analyses statistiques	30
IV. RESULTATS ET DISCUSSION.....	31
IV.1. Détermination de la température d'étuvage.....	31
IV.1.1. Effet de l'étuvage sur les caractéristiques technologiques	31
IV.1.2. Effet de l'étuvage sur les constituants biochimiques.....	33
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	40
ANNEXE.....	43

RESUME

Dans le cadre de la mise en œuvre du projet « Mise au point de procédés d'obtention de céréales étuvées », financé par la banque mondiale sous l'égide du Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest/West African Agricultural Productivity Program (PPAAO/WAAPP) les effets de l'étuvage sur les propriétés physiques et biochimiques du fonio produit au Sénégal ont été étudiés. Ainsi, des échantillons de fonio « brut », de fonio non étuvé décortiqué (FNED) et de fonio étuvé décortiqué (FED). L'effet de l'étuvage sur le rendement au décortilage et le taux de brisure a été évalué.

Les effets de l'étuvage sur les teneurs en protéines, amidon, amylose et cellulose du fonio ont été déterminés. Pour le procédé d'étuvage, la température optimale de trempage, entre 70,80 et 90°C, a été spécifiée ; les rendements au décortilage sont de 45%, 68%, 66% et 71% pour le FNED, le FED à 70°C, à 80°C et à 90°C respectivement. Le taux de brisure des fonios étuvés à 70, 80, 90°C sont respectivement : 33% ; 20% ; et 13% qui sont tous beaucoup plus faibles que celui du FNED qui est à 68%. Les teneurs en protéines des FED sont comparables à celles du fonio brut qui est de 9% et légèrement supérieure à celle du FNED qui est de 8%. Les teneurs en amidon des FED sont de l'ordre de 60%. Ces teneurs légèrement supérieures à celle du fonio brut (59%) et inférieur à celle de FNED (65%). Les teneurs en amylose de FED sont comprises entre 26 et 27%, tandis que pour le fonio « brut » et le FNED cette teneur est de 20% et 29%. Les teneurs en cellulose des FED à 70, 80 et 90% sont respectivement : 0,6%, 0,6%, et 0,4% ; ces teneurs sont de 6% pour le fonio « brut » et 0,8% pour le FNED.

Ces résultats montrent que, dans les tous cas, le décortilage a un effet négatif sur les propriétés physiques et biochimiques du fonio. L'étuvage atténue ces effets quant à la teneur en protéines. Cependant, l'étuvage favoriserait l'élimination des fibres contenu dans le fonio brut au cours du décortilage.

Mots clés : Fonio, étuvage, décortilage, propriétés technologiques, composants biochimiques.

INTRODUCTION

Les céréales traditionnelles constituent l'aliment de base de nombreuses populations des régions ouest-africaines, notamment dans les zones les plus isolées. Elles jouent un rôle primordial dans la sécurité alimentaire des groupes les plus pauvres et les plus enclavés (**Cruz et al., 2006**).

Au Sénégal, parmi ces céréales, le riz occupe une grande place puis vient le mil, le maïs, le sorgho et le fonio. Ce dernier avec une production faible, reste encore peu connu en zone urbaine.

De toutes ces céréales traditionnelles, le fonio est considéré comme la plus ancienne céréale de l'Afrique occidentale. Malgré son ancienneté, cette céréale reste encore très peu connue du point de vue agronomique, technologique et alimentaire. Jusqu'à très récemment, le fonio a attiré très peu d'attention ; notamment, très peu d'efforts ont été investis jusque-là pour une mécanisation de ses opérations de post-récolte afin de fournir les marchés urbains en produit de qualité améliorée (décorticage et séchage par **Marouzé et al. (2008)** ; **Cruz et al. (2009)**). Le principal problème du fonio reste le décorticage qui constitue le vrai goulot d'étranglement de la transformation. Après battage, le grain est toujours entouré de glumes « fonio paddy » et il doit être transformé en fonio blanc pour devenir un aliment comestible via le décorticage et le blanchiment. Ces opérations sont habituellement faites à la main, à l'aide d'un pilon et d'un mortier, et exigent quatre à cinq pilages successifs séparés par autant d'opérations de vannages. Il est également indispensable d'éliminer les matières étrangères, comme le sable, les pailles et la poussière, en lavant plusieurs fois le produit ; ce qui rend sa préparation particulièrement longue et fastidieuse en zone rural. Au Sénégal, c'est vers les années 1990 qu'une décortiqueuse a été mise au point pour alléger à cette opération (**Cruz et al., 2011**). Cette machine, connue sous l'appellation décortiqueuse Sanoussi, a été conçue spécifiquement pour le décorticage et le blanchiment du fonio en raison de la petite taille des grains (inférieure à 1 mm). Cette opération technologique qui fractionne le grain en ses différents régions anatomiques conduit à des produits dont la composition biochimique évolue avec l'intensité du traitement . Ainsi, pour l'ensemble des céréales, on peut dire que très schématiquement, les farines, semoules ou grains polis sont d'autant plus concentrés en amidon et appauvris en protéines, minéraux et vitamines que le décorticage est intensif ; en revanche, la biodisponibilité de ces nutriments s'améliore quand la teneur en fibres diminue (**Favier, 1989**).

Le fonio, contrairement aux autres céréales est pourvu en méthionine et cystéine qui sont des protéines faiblement disponible dans le règne végétal (Fofana et al., 2003). Toutefois, une

partie de ces nutriments (minéraux, vitamines et protéines) est souvent éliminée lors du décorticage. Pour remédier à cela, d'autres traitements sont appliqués tels que l'étuvage, qui fait intervenir l'action de l'eau et de la chaleur, pouvant modifier favorablement la composition et les propriétés physico-chimiques des céréales. L'étuvage est couramment pratiqué dans le cas du riz (**Houssou et al., 2011**).

En effet, l'étuvage déjà testé sur le riz a donné des résultats satisfaisants sur la composition physico-chimique des grains (**Fofana et al., 2003**).

De ce fait, l'objectif de notre travail est d'évaluer les effets de l'étuvage sur les propriétés physico-biochimiques du fonio. Cette étude entre dans le cadre du projet du WAAPP (West African Agricultural Productivity Program (en français PPAAO Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest), sur l'étuvage des céréales au Sénégal.

Le présent manuscrit comprend deux parties. Dans une première partie, une synthèse bibliographique a été effectuée. Le travail expérimental réalisé est présenté dans la deuxième partie suivie des résultats et de la discussion.

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQU

I. Généralités

I.1. Origine

Le fonio est une céréale d'origine africaine qui a été domestiquée dans la zone ouest du Soudan. D'après **Protères (1955)**, le fonio est originaire d'Egypte. Il a été cultivé pour la première fois par le groupe linguistique Mandé (**Vodouhe et al., 2006**).

I.2. Zone de production

Le fonio (*Digitaria exilis*) est une graminée d'origine ouest-africaine. L'aire de culture du fonio s'étend du Sénégal au lac Tchad mais il est surtout cultivé en Guinée où il constitue une nourriture de base des populations des régions montagneuses du Fouta Djallon. Il est également rencontré au Mali, au Burkina Faso, au Nigéria et en Côte d'Ivoire (**Béavogui et al., 1992**). Au Sénégal le fonio se retrouve dans les régions du sud (**Figure 1**) (**USAID, 2008**).



Figure 1 : Zone de culture du fonio au Sénégal

I.3. Ecologie

Le fonio est une culture de climat tropical à saison sèche bien marquée à des températures moyennes de 25°C à 30 °C et à une pluviométrie de 600 mm à 1200 mm (**Béavogui et al., 1992**).

I.4. Botanique

Le fonio (*Digitaria exilis*) est une monocotylédone glumacée de la famille des graminées (ou poacées) du genre *Digitaria* (**Photo 1**). Les Digitaires qui regroupent plus de 300 espèces (**Protères, 1955**).



Photo 1 : Grains de fonio mal décortiqués

Aujourd'hui, seul *Digitaria exilis*, revêt une certaine importance en Afrique de l'ouest.

Le fonio est une petite plante herbacée annuelle de 30 à 80 cm de hauteur. L'épillet comprend une fleur stérile et une fleur fertile qui donnera le grain de fonio (**Badiane, 2006**). Sa graine mesure 1 mm de longueur et ne dépasse pas 0,7 mm de large ; le poids de 1000 graines ne dépasse pas 0,6 g (**Fofana et al., 2003**). Ses racines puisent l'eau et les nutriments du sol jusqu'à 3 cm de profondeur (**Badiane, 2006**).

I.5. Aspect et techniques culturaux

Le fonio (*Digitaria exillis*) peut se cultiver sur des sols considérés comme pauvres, peu profonds et dans des zones à faible pluviométrie. Il s'agit d'une plante qui présente une bonne résistance aux conditions de sécheresse par rapport aux autres céréales. Poussant initialement à l'état sauvage dans les zones semi-arides, le fonio est une plante très flexible et peu exigeante sur les conditions du sol et du climat. Le cycle végétatif varie de 70 à 120 jours selon les sols et les variétés cultivées. Les graines de la plante sont surtout caractérisées par une très petite taille (**Fofana et al., 2003**).

Le fonio est généralement cultivé, hors assolement, sur des terres légères (terrains sableux à caillouteux). Des terres plus riches sont également utilisées pour les variétés hâtives. Le fonio peut aussi être cultivé en rotation et il intervient alors souvent après le riz, le mil, le sorgho ou l'arachide. (**Cruz et al., 2011**).

La culture du fonio est encore aujourd'hui essentiellement manuelle. Aux premières pluies, le semis est fait « à la volée » sur un sol superficiellement ameubli à une densité de 10 à 30 kg/ha (**Vodouhe et al., 2006**). Certains pratiquent un semis relativement dense (de 30 à 50 kg/ha) pour diminuer la pression des adventices à la levée. Les graines sont enfouies à faible profondeur par un hersage ou un recouvrement à la daba. La germination est rapide et l'entretien de la culture se limite à un ou deux sarclages. (**Cruz et al., 2011**) Habituellement différents types de variétés sont distingués (**Fofana et al., 2003**) :

- Les variétés extra-précoces : cycle végétatif de 70 à 85 jours.
- Les variétés hâtives : cycle végétatif de 85 à 100 jours.
- Les variétés semi-tardives : cycle végétatif de 100 à 120 jours.
- Les variétés tardives à 150 jours de végétation.

Aujourd'hui, deux à trois variétés (extra-précoces, variétés hâtives et semi-tardives) restent les plus cultivées. Le fonio extra-précoce appelé « momo » est essentiellement cultivé pour faire face à la soudure. Le « momo » est une variété stratégique chez les producteurs. Elle mûrit très tôt, en général en fin août (au cœur de la soudure). Cette période correspond au moment où les greniers sont vides où les paysans sont confrontés à la fois à une forte intensité de travail et une extrême fragilité due aux épidémies de paludisme qui sévissent pendant cette période de l'hivernage (**Fofana et al., 2003**).

Quant aux variétés hâtives « mora » et semi-tardives « blanc », elles sont cultivées essentiellement pour l'autoconsommation des ménages en alternance aux autres céréales (maïs, mil, riz) pendant le reste de l'année. Les populations reconnaissent à chaque variété de fonio des qualités particulières en matière de production, de goût, de couleur et de comportement à la cuisson (**Fofana et al., 2003**).

De manière générale, la variété tardive « noir » n'est plus cultivée. Elle tend même à disparaître dans certaines zones. Cela résulte principalement de la concurrence qu'exercent les autres cultures à cycle long mais surtout du choix porté sur les variétés mieux adaptées pour la soudure (**Fofana et al., 2003**).

1.6. Volume de production

La culture annuelle du fonio est effectuée sur près de 380 000 ha et la production, voisine de 250 000 t (rendements moyens de 660 kg/ha) assure l'alimentation de plusieurs millions d'êtres humains durant les mois les plus difficiles au point de vue des ressources alimentaires. L'évolution de la production sur les 40 dernières années, montre une forte diminution (de 180 000 t à 130 000 t) au cours des décennies 60 et 70 puis une reprise régulière à partir de 1980

(FAOSTAT). Les rendements restant relativement constants, cette reprise de la production est due à l'extension des surfaces cultivées. Les données les plus récentes de la production du fonio selon FAOSTAT (2013-2014) à travers le monde sont représentées ci-dessous dans le **Tableau I** :

Tableau I : Pays producteurs de fonio

Pays	Valeur (tonnes)
Guinée-Conakry	429 000
Nigéria	90 000
Mali	22 090
Burkina Faso	20 000
Cote d'ivoire	17 500
Niger	6 000
Bénin	1 468
Sénégal	1 030
Guinée-Bissau	722
Monde	587 810

I.7. Opérations post-récolte

Les techniques post-récolte du fonio sont artisanales dans toute la zone et consomment beaucoup de temps et de main d'œuvre. Le processus post-récolte qu'il exige est très dur. Le principal rôle de la plate-forme est de sécher le fonio, de le protéger contre la pluie et autres formes de désagréments. Ainsi, les différentes gerbes sont disposées de façon à ce que les grains pendent vers le bas et les tiges vers le haut laissant l'eau traverser facilement. Le fonio est séché pendant plusieurs semaines. Le séchage est une opération clé dans la conservation du fonio. Un fonio mal séché pourrit et perd une grande partie des grains au battage (USAID, 2008), (Photo 2) (Kanfany, 2008). Le séchage permet la conservation en stoppant (ou en ralentissant fortement) le développement des microorganismes et, dans le cas des grains entiers, les phénomènes de respiration et de germination (Favier, 1989).



Photo 2 : Séchage du fonio

Après séchage, le fonio est soumis au battage (**Photo 3**) (**Cirad**). Cette opération est réalisée au champ ou à la maison et se fait en groupe à l'aide de bâtons (hommes) ou de piétinement plus connue sous le nom de foulage (femmes) (**USAID, 2008**).



Photo 3: Battage du fonio

Le vannage consiste en la séparation des grains avec la paille. Il s'effectue à l'aide de paniers et calebasses en jouant sur la direction du vent (**Photo 4**) (**Cirad**). Les grandes pailles sont récupérées manuellement et le reste est tiré au vent puis un tamisage permet de laisser passer les grains immatures (**USAID, 2008**).



Photo 4 : Vannage du fonio

Le stockage du fonio nécessite que le produit soit sec et conservé dans un endroit sec dépourvu de toute forme d'humidité. La conservation se fait dans des greniers, hangars ou magasins (**USAID, 2008**).

Ces opérations (le battage, le vannage et le séchage) réduisent le poids et le volume des produits, facilitant ainsi leur stockage, leur manutention et leur transport (**Favier, 1989**). Il convient de noter :

- les effets d'un séchage au soleil trop poussé qui craquelle les grains des céréales (cas fréquent en Afrique) ;
- les pertes de certaines vitamines (thiamine, riboflavine) par séchage au soleil (rayon UV, température, oxygène de l'air); (ce phénomène se retrouve aussi lors du séchage au soleil des farines, semoules, couscous, galettes, etc.)
- les pertes de vitamines et les diminutions de valeur biologique des protéines au cours de la conservation en fonction de la température et de la durée ;

I.8. Traitement technique

I.8.1. Décortilage et mouture

Le décortilage c'est l'étape qui permet d'avoir le fonio sous sa forme de consommation humaine. Le décortilage permet d'enlever les enveloppes externes qui protègent le grain à l'état de paddy.

C'est une opération très fastidieuse quand elle est manuelle, qui nécessite énormément de temps et constitue un frein au développement de la culture du fonio. Après battage, le grain est toujours entouré de glume « fonio paddy » et il doit être transformé en fonio blanc pour devenir un aliment comestible. Avant l'arrivée de la décortiqueuse Sanoussi, le décortilage et le blanchissement du fonio étaient faits habituellement à la main, au mortier et au pilon et exigeaient quatre à cinq pilages successifs séparés par autant d'opérations de vannage (**Vodouhe et al., 2006**). Le grain décortiqué est lavé à plusieurs reprises avec beaucoup d'eau en transvasant jusqu'à l'obtention du fonio blanc exempt de sable. Il faut 10 à 20 litres d'eau pour nettoyer un kilogramme de fonio (**Fofana et al., 2003**).

Les connaissances sur la structure et la composition biochimique des céréales permettent de mieux comprendre leur comportement à l'égard des traitements technologiques et l'influence de ces derniers sur la composition et la valeur nutritionnelle des dérivés céréaliers. L'usage alimentaire des céréales présente un double écueil : si on consomme la farine de mouture intégrale, c'est-à-dire la céréale entière, la présence d'une quantité importante de fibre, d'acide phytique et parfois de tanins (cas de certains sorghos) entraîne une nette diminution de la digestibilité de l'ensemble de la ration et, par la même, la perte notable de nutriments essentiels : protéines, minéraux et vitamines. En revanche, si l'on raffine à l'extrême la farine pour obtenir un produit correspondant au seul albumen, on consomme un aliment très énergétique car riche en amidon, d'une digestibilité élevée, mais appauvri en protéines, minéraux et vitamines. De plus, comme les protéines de haute valeur biologique se trouvent

dans la couche à aleurone, la farine très raffinée est appauvrie quantitativement et qualitativement. On a donc le choix entre consommer les céréales entières et mal les digérer ou bluter leur farine et perdre ainsi des nutriments nobles. Les deux extrêmes existent en pratique. Entre les deux extrêmes, la solution la plus souhaitable consisterait à n'éliminer que les enveloppes lignifiées en gardant l'assise à aleurone. Mais, en raison de l'adhérence des couches entre elles et à l'albumen, il est toujours difficile de séparer de façon progressive et nette les diverses fractions du grain. **(Favier, 1989).**

Le décortilage s'accompagne toujours du bris d'une certaine proportion des grains. Leurs fragments, y compris des germes, sont alors souvent éliminés avec le son. Selon les céréales et les sociétés, les procédés utilisés sont différents. Ils conduisent à des produits plus ou moins raffinés, dont la composition varie selon la nature et les proportions des fractions qu'ils contiennent. **(Favier, 1989).**

Le décortilage peut se faire manuellement et, depuis quelques années, se fait de manière mécanisée dans certains zones.

I.8.2. Procédé d'étuvage

L'étuvage est un procédé très ancien généralement appliqué au riz et qui consiste en un traitement hygrothermique des grains paddy, suivi d'un séchage. Cette technologie a pour avantage d'améliorer les caractéristiques technologiques, nutritionnelles et culinaires **(Housou et al., 2011).**

D'un point de vue technique, l'étuvage est un procédé qui consiste en une pré cuisson du riz paddy préalablement hydraté. Cette pré cuisson permet une gélatinisation de l'amidon qui perd sa structure cristalline pour former des complexes assurant une meilleure cohésion du grain. L'étuvage améliore donc la qualité technologique du riz (rendement au décortilage) en ressoudant les grains clivés, diminuant ainsi le taux de brisures. Il accroît les qualités organoleptiques (fermeté et absence de collant) et nutritionnelles en enrichissant l'amande en vitamines hydrosolubles (vitamine B), protéines et minéraux initialement concentrés dans le péricarpe **(Cruz et al., 2009).**

D'après **Guengane (2015)** les principales modifications chimiques, physiques et organoleptiques produites par l'étuvage sur le riz sont:

- Modifications chimiques :
 - les substances hydrosolubles constituées de vitamines et de sels minéraux se dissolvent et se diffusent dans tout le grain ;
 - les globules lipoides de l'albumen se dissolvent également dans le grain ;

- l'amidon gélatinisé se présente comme une masse compacte et homogène ;
 - les lipides sont séparés et s'enfoncent dans la masse compacte d'amidon gélatinisé; ils sont donc moins sujets à l'extraction ; et
 - les substances liposolubles du germe et de la couche extérieure de l'albumen sont dissoutes et diffusées dans le grain.
- Modifications physiques :
- le séchage ramène la teneur en eau du grain au niveau optimal pour l'usinage ;
 - tous les processus biologiques latents ou actifs à savoir la germination, la prolifération des spores de champignon, le développement d'insectes à différents stades sont définitivement stoppés ;
 - le rendement à l'usinage est meilleur et la qualité est améliorée parce qu'il y a moins de grains brisés ;
 - le riz étuvé, usiné ou non, se conserve mieux et plus longtemps car la germination n'est plus possible et la texture compacte de l'albumen lui permet de mieux résister aux attaques des insectes et de ne pas absorber l'humidité du milieu ambiant ; Le riz étuvé rancit moins.
- Modifications organoleptiques les plus importantes :
- le riz étuvé cuit est plus digeste, du fait de sa texture et de sa consistance ferme ; et ses grains sont plus fermes et ont moins tendance à coller.

I.9. Structure physique et composition du grain de fonio

Il a déjà été précisé que le fonio est une céréale vêtue dont les grains, après battage, sont entourés de «balles». Ce «fonio paddy» n'est pas comestible tel quel en raison de la présence de ces balles (glumes et glumelles) riches en cellulose. Les grains de « fonio paddy » ont une forme ovoïde, légèrement aplatie sur le dos. Ils sont de très petite taille (leur longueur est d'environ 1,8 mm et leur largeur de 0,9 mm). Après élimination des balles, le grain nu obtenu est un caryopse. **(Cruz et al., 2011).**

Anatomiquement, ces grains de fonio décortiqué correspondent aux grains de blé, de maïs ou de mil qui sont des céréales à grains nus. Le grain de fonio décortiqué, également appelé «fonio complet», a un péricarpe brillant de couleur blanche, jaune ou violette selon les variétés. Il ne mesure que 1,4 à 1,5 mm de long, 0,8 à 0,9 mm de large et 0,6 mm d'épaisseur. Sur une face, on repère le hile et sur l'autre, le germe relativement gros qui contient les réserves lipidiques. Le grain nu est formé de trois parties : le tégument, le germe et l'albumen **(Figure 2) (Cruz et al., 2009).**

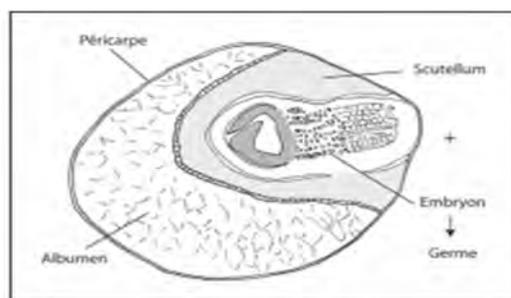


Figure 2: Structure du grain de fonio

- Le tégument comprend :
 - le péricarpe qui correspond aux téguments du «fruit» dérivé de la paroi de l’ovaire.
 - une assise protéique ou couche à aleurone qui représente la première assise constitutive de l’albumen.

Une fois éliminé, le tégument constituera une partie du son, riche en cellulose et en protéines. Les travaux de **Cruz et al., (2011)** décrivent ainsi le caryopse : «La coupe transversale du caryopse présente, extérieurement, une rangée de cellules aplaties représentant l’épiderme du péricarpe (longueur de 30 m, largeur de 6-8 m). Ces cellules examinées de face montrent des parois très fortement plissées, épaisses, comme cela s’observe dans presque tous les caryopses des graminées équatoriales».

- Le germe est formé de l’embryon et d’un cotylédon (ou scutellum). Il constitue un organe de réserve, riche en protéines et en lipides pour la jeune plantule. Une fois éliminé, le germe constituera une autre partie du son, riche en lipides.
- L’albumen représente l’amande du grain et correspond au fonio blanchi.

La microstructure du fonio a été étudiée en microscopie électronique à balayage. La description est succincte mais confirme les caractéristiques suivantes : le caryopse comprend les couches du péricarpe et la testa, entourant l’endosperme et les tissus embryonnaires. L’endosperme est composé d’une seule couche de cellules à aleurone et de l’albumen amylicé. La couche à aleurone est fine sur tout l’endosperme et plus épaisse à la jonction de l’embryon et de l’endosperme. Les cellules à aleurone contiennent des gouttelettes de lipide et des corps protéiques. Le contenu des cellules de l’endosperme est constitué de granules d’amidon simples et polyédriques d’environ 10 mm de diamètre. Comme pour le riz ou le maïs, les corpuscules protéiques sont plus abondants en périphérie de l’endosperme et

diminuent vers le centre du grain contrairement au blé où la répartition est davantage continue (Irving et Jideani, 1997).

La composition biochimique du fonio décortiqué a été étudiée par le Cirad (Fliedel et al., 2004).

Plus en détail, en matière de glucides, le fonio décortiqué semble légèrement plus riche en amidon (68% de matière sèche (m.s.) en moyenne) que le sorgho et le mil (61 à 65% m.s.), mais les teneurs peuvent varier de 60 à 75% m.s. selon les variétés. La teneur en amylose est voisine de 24% m.s. La teneur en fibres totales (cellulose, hémicellulose et lignine), proche de 7 à 8% m.s., est équivalente à celle du mil et du sorgho.

Les teneurs respectives en hémicellulose et cellulose sont semblables et proches de 3 à 4% m.s., tandis que la teneur en lignine reste faible à 0,5% m.s. La teneur en sucres libres est voisine de 1% m.s. Les sucres présents sont principalement le saccharose (0,7 à 0,8% m.s.), suivi du glucose et du fructose. La teneur en lipides est comparable à celle du sorgho et légèrement inférieure à celle du mil ou du maïs mais supérieure à celle du riz.

Le fonio décortiqué contient légèrement moins de protéines que le mil, le sorgho ou le maïs mais reste équivalent au riz cargo.

La valeur nutritive du fonio décortiqué comparée à celle d'autres céréales décortiquées est présentée dans le **Tableau II** source (Cruz et al., 2011).

Tableau II : Comparaison de la valeur nutritive des céréales décortiquées

Céréales	Glucides (% m.s)	Protéines (% m.s)	lipides (% m.s)	Matières minérales (% m.s)
Mil	83	12	4,0	1,2
Sorgho	84	11	3,5	1,2
Mais	83	11	4,5	1,3
Riz	86	10	2,5	1,4
Fonio	84-86	9-11	3,3-3,8	1-1,1

m.s.: Matière sèche

I. 10. Importance nutritionnelle du fonio

Le fonio concourt à la sécurité alimentaire pendant les périodes de soudure en milieu paysan car sa récolte est plus précoce (entre août et septembre) que celle des autres céréales de base que sont le mil, le sorgho, le maïs et le riz (Cruz et al., 2011).

Le fonio est une céréale africaine qui n'est pas tellement connue. Bien que très appréciée par sa finesse et ses qualités gustatives, le fonio ne bénéficie guère de la popularité du riz. Cependant, de goût agréable et facilement digeste, il est recommandé dans l'alimentation des enfants et des personnes âgées et dans le traitement des diabétiques et des ulcéreux. Les habitants des régions productrices de fonio semblent prêter à cette céréale de très nombreuses vertus non alimentaires. **(Cruz et al., 2011).**

Le diabète, notamment de type 2, est une maladie qui touche de plus en plus de personnes à travers le monde et singulièrement en Afrique urbaine en raison d'une alimentation déséquilibrée et souvent accompagnée d'un surpoids accentué par la sédentarisation. Le diabétique doit chercher à mieux équilibrer son alimentation en réduisant surtout son apport calorique. Le fonio est essentiellement un aliment calorique au même titre que d'autres céréales. En revanche des premières études réalisées par le Cirad, puis reprises ensuite par l'ONG internationale Santé Diabète, ont néanmoins montré que le fonio avait un index glycémique voisin de 57 (celui de la référence, le pain blanc, est de 100) et donc inférieur à celui des autres céréales (excepté le mil). Ainsi pour les diabétiques, le fonio peut sans doute être préféré à la plupart des autres céréales, mais il doit néanmoins être consommé avec modération en respectant les quantités prescrites par les médecins.

Le fonio procure une satiété relativement courte et il est souvent considéré par erreur par la population comme un aliment léger, peu nourrissant, qui ne contient pas de sucres. Certains diabétiques risquent alors une surconsommation de fonio pouvant générer de fortes hyperglycémies. Une bonne éducation nutritionnelle des malades est indispensable pour éviter de tels risques. Il faut par ailleurs prendre en compte le fait que les plats à base de fonio sont souvent accompagnés de sauces qui jouent également un rôle important dans l'apport glycémique du repas. Des recherches sont encore nécessaires pour parfaire les connaissances sur le fonio et sur son intérêt dans l'alimentation des diabétiques **(Cruz et al., 2011).**

Le fonio est aussi utilisé dans la pharmacopée traditionnelle, dans les régimes amaigrissants et pour traiter le cas d'obésité.

Par ailleurs, d'après une étude de l'OMS, de la FAO et de l'UNICEF en 1962, il a été prouvé que le fonio est exceptionnellement riche en un acide aminé essentiel, la méthionine, qui a une teneur de 5,6mg/100g de fonio et qui est généralement déficiente dans les plantes alimentaires. Ainsi, compte tenu de sa teneur en méthionine, le fonio pourrait contribuer à une supplémentation pour un équilibre nutritionnel.

Les grains de fonio sont utilisés par les consommateurs africains en bouillie et comme couscous ; ils entrent dans la composition du pain et de la bière. Minuscules, ses grains ne

contiennent pas de gluten et sont riches en protéines. Les consommateurs hors de l'Afrique commencent à reconnaître dans le fonio des qualités gustatives et nutritionnelles : il est léger, facile à digérer et peut être inclus dans de nombreuses recettes à base de céréales, ce qui en fait un ingrédient intéressant pour la diététique des personnes présentant une intolérance au gluten. Le milieu médical considère aujourd'hui que la maladie cœliaque (ou liée au gluten) est une des maladies gastro-intestinales les plus fréquentes, touchant plus d'une personne sur mille dans la population générale (**Cruz et al., 2011**).

On peut considérer qu'à l'instar du sorgho et du maïs, le fonio est génétiquement plus proche du mil que du blé ou de l'orge et que, comme eux, il ne présente pas de toxicité pour les personnes intolérantes au gluten (**Cruz et al., 2011**).

Certains auteurs avancent que la valeur nutritive du fonio dépasse celle du riz et ne diffère de celle du blé que par son pourcentage un peu plus faible en matière azotées : 12,35% dans le blé et 8,84% dans le fonio (**Perrot, 1929**).

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

I. OBJECTIFS

L'objectif de notre travail est d'évaluer les effets de l'étuvage sur les propriétés physico-biochimiques du fonio. Cette étude entre dans le cadre du projet du WAAPP (West African Agricultural Productivity Program en français PPAAO Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest), sur l'étuvage des céréales au Sénégal.

De manière plus spécifique, notre travail visait à :

- Etudier les conséquences du décorticage sur la perte en nutriment
- Déterminer les paramètres optimaux de l'opération d'étuvage
- Evaluer l'apport de l'étuvage vis-à-vis du décorticage

II. PRESENTATION DU CADRE DE L'ETUDE

Cette étude a été réalisée à l'Institut de Technologie Alimentaire (ITA) au sein de l'atelier céréales légumineuses et du Laboratoire de chimie alimentaire du 19 juillet 2013 au 6 janvier 2015.

Créé par la loi 63-11 du 05 Février 1963, l'ITA est placé sous la tutelle du Ministère de l'industrie et des PME. Situé à Dakar sur la Route des Pères Maristes, l'ITA est un centre d'excellence fournissant une assistance aux acteurs du secteur alimentaire (publics ou privés) pour une meilleure qualité des produits par la recherche et le contrôle tant sur le plan microbiologique que chimique à travers des analyses fiables, conformes à la réglementation et aussi pour la valorisation des produits alimentaires au Sénégal mais également dans la sous-région. L'ITA est un Etablissement Public à Caractère Scientifique et Technologique (EPCST) dont le but porte sur le secteur de recherche et de développement en alimentation, en nutrition humaine et dans la promotion de PME et PMI dans le domaine de l'agroalimentaire. Il représente une partie intégrante du Système National de Recherche et Agro-Sylvo-Pastorale (SNRAS) qui a connu un essor considérable depuis l'assistance de la Food and Agriculture Organisation (FAO) en 1978.

L'objectif de la valorisation des produits locaux, qui est au centre des préoccupations de l'ITA, a favorisé la création de laboratoires d'analyses et de recherche pour le contrôle de qualité et le développement de produits alimentaires.

L'atelier céréales et légumineuses est au cœur de la mise au point et de l'amélioration technique de la transformation et de la conservation des céréales et légumineuses. Il est de même l'incubateur d'opérateurs économiques de la transformation et de l'utilisation des céréales locales. L'ITA joue un rôle dans l'assistance et l'encadrement technique au

développement de produits et la résolution de problèmes techniques au sein de l'entreprise (amélioration du rendement et de la qualité du produit).

L'objectif de l'ITA vise notamment à contribuer à la valorisation des céréales locales (mil, sorgho, maïs, riz et fonio) en mettant au point un procédé de fabrication de céréales étuvées et de produits à haute valeur nutritionnelle à base de céréales étuvées (ITA, 2014).

III. MATERIEL ET METHODES

III.1. Matériel

➤ Matériel végétale

L'étude a été faite sur une variété semi hâtive de fonio provenant de Kolda (**Photo 5**).



Photo 5 : Echantillon de fonio brut

➤ Matériel d'atelier

Le matériel suivant a été utilisé tout au long de notre étude :

Balance: pour peser le fonio.

Tamis à fine maille : pour éliminer le sable et les particules légères.

Matériel de vannage : afin d'éliminer les particules étrangère.

Humidimètre : pour déterminer la teneur en eau du fonio.

Thermomètre : pour mesurer la température de trempage.

Dispositif d'étuvage : composé d'une marmite, d'un couscoussier et d'un couvercle qui permet le pré cuisson du fonio brut.

Décortiqueur Sanoussi : qui élimine le son.

Claies de séchage : sur lesquelles est étalé le fonio.

Loupe : pour le triage des brisures.

➤ Matériel de laboratoire

L'ensemble du petit matériel que l'on trouve en général dans un laboratoire de chimie alimentaire ont été utilisés en plus de ces équipements :

Chaine de dosage des protéines (bloc minéralisateur, capteur et distillateur de protéines)

Dosage de l'amidon et de la cellulose (dispositif de chauffage à reflux, réfrigérant et plaque chauffante, Fiole à vide et pompe, étuve et four)

Dosage de l'amylose (Spectrophotomètre UV-Visible, extracteur de matières grasses)

III.2. Méthodes

III.2.1. Méthode de détermination des paramètres du trempage

L'opération de trempage a été réalisée à trois températures différentes afin de déterminer la meilleure température.

Le processus de l'étuvage du fonio est décrit par le schéma (**Figure 3**) suivant.

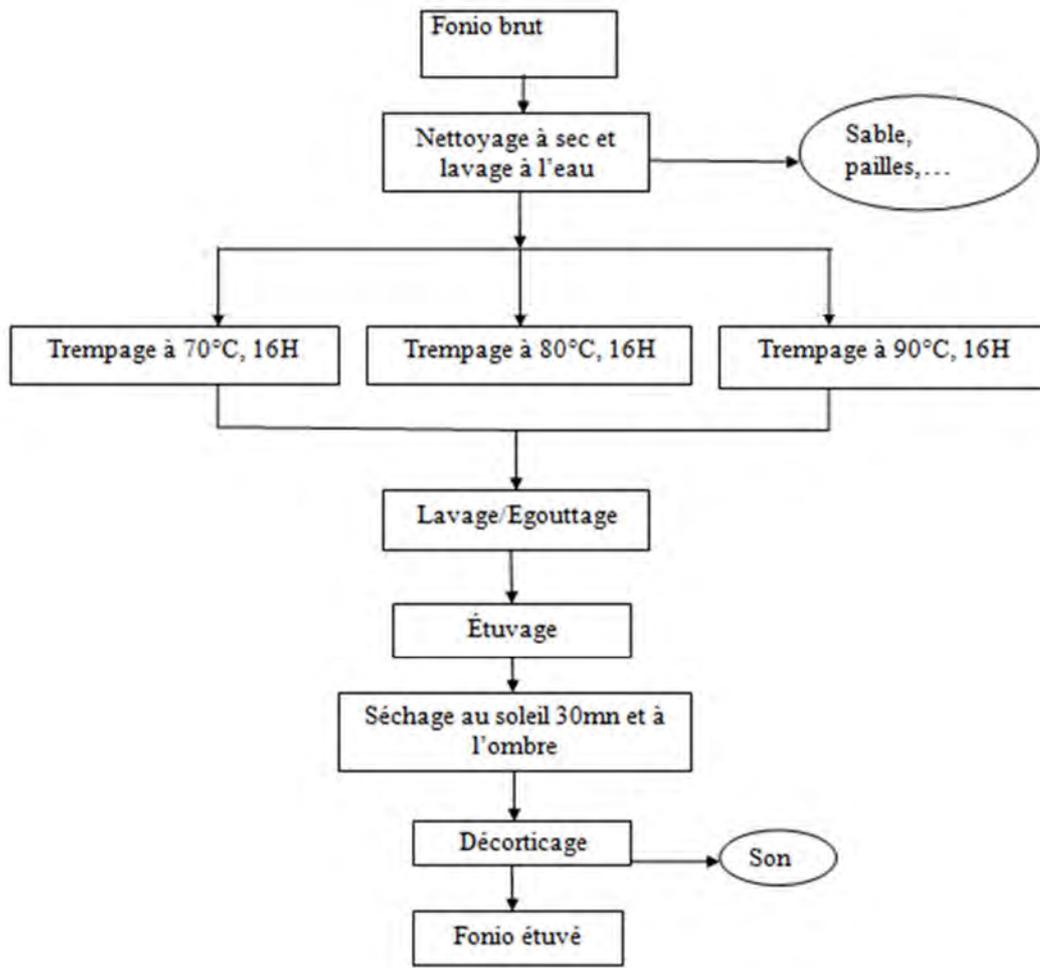


Figure 3 : Procédé d'étuvage du fonio

Ces différentes étapes de ce procédé sont décrites ci-après

III.2.1.1. Nettoyage à sec

Les opérations unitaires ont été effectuées à Kolda.

Le fonio pesé (4kg) est tamisé avec un tamis de fine maille (0,6mm) qui ne laisse passer quasiment que le sable (**Photo 6**). Ensuite on a effectué le vannage (**Photo 7**), à l'aide de grand plateau, qui consiste à éliminer les petites particules étrangères (bâtons, pailles, brindilles) et le sable aussi.



Photo 6: Tamisage du fonio



Photo 7: Vannage du fonio à Kolda

III.2.1.2. Lavage

Le fonio est lavé (**Photo 8**) avec une grande quantité d'eau de robinet dans des bassines puis transvasé dans une autre bassine. Pour venir à bout des dépôts de sable au fond de la bassine, un lavage à grande eau a été nécessaire. Quelques gouttes d'eau de javel ont été ajoutées pour renforcer le lavage du fonio (qui séjourne dans l'eau javellisée pendant deux minutes). Le fonio est ensuite rincé avec une grande quantité d'eau de robinet.



Photo 8 : Lavage du fonio

III.2.1.3. Trempage

Cette étape a consisté à mettre le fonio dans une marmite et à l'immerger totalement (**Photo 9**). L'ensemble est mis à chauffer à une température précise souhaitée. A l'aide d'un thermomètre à sonde, la température de l'eau est vérifiée au cours de l'opération. A l'obtention de la température souhaitée, le fonio et l'eau sont transvasés dans une bassine et l'ensemble est laissé au repos pendant 16H. Dans l'étude, nous avons trempé le fonio à étuver à trois différentes températures 70°C, 80°C et 90°C.



Photo 9 : Trempage du fonio à chaud

III.2.1.4. Etuvage

Après l'étape de trempage le fonio est lavé comme précédemment (**Figure 8**) puis égoutté pendant environ 30 mn avant de procéder à l'étuvage. Le fonio est mis dans l'étuveuse qui est constituée d'une marmite, d'un couscoussier et d'un couvercle (**Photo10**). La marmite est remplie d'eau à moitié. Le fonio placé dans le couscoussier est ainsi précuit par la vapeur d'eau qui se dégage de l'ébullition de l'eau de la marmite. De temps en temps, le fonio est remué avec une écumeuse permettant l'homogénéisation de la pré-cuisson. A la fin de cette opération

(15mn), nous avons constaté une coloration plus dorée du fonio et un début d'ouverture des enveloppes de certains grains de fonio.



Photo 10 : Etuvage proprement dit du fonio

III.2.1.5. Séchage

Il consiste à étaler le fonio sur des claies recouvertes de tissus de coton et à le laisser sécher ainsi sous le soleil chaud 30 mn puis à l'ombre jusqu'à l'obtention de l'humidité avoisinant celui du fonio brut qui est de 10% (**Photo 11**). L'humidité est déterminée à l'aide de l'humidimètre. Le fonio est remué chaque demi-heure pour homogénéiser le séchage.



Photo 11 : Séchage du fonio à Kolda

III.2.1.6. Décorticage

Cette opération a été effectuée avec la décortiqueuse Sanoussi (**photo12**). Les disques abrasifs, en tournant à 1300 tours/mn, produisent par le frottement contre la masse des grains

en mouvement une abrasion des couches extérieures. Ceci permet d'éliminer l'indigestible glucidique et les sons tout en prenant soin d'endommager les grains le moins possible en vue d'obtenir des grains entiers pour préserver l'assise protéique adjacente, la couche à aleurone riche en composés vitaminiques et en minéraux en vue d'obtenir un bon taux de décortilage.

Le temps de séjour des grains dans la trémie d'alimentation du décortiqueur est de 20 mn, ce temps a été nécessaire pour obtenir un grain suffisamment décortiqué.

Au début des années 2000, des essais de fonctionnement de la décortiqueuse Sanoussi ont été réalisés en laboratoire par l'Institut national de recherche agricole du Bénin et par l'institut d'économie rurale au Mali. Les résultats ont montré que les performances de la machine étaient parfois inférieures à celles qui sont annoncées puisque les débits obtenus n'ont été que de 10 à 20kg/h au lieu des 35kg/h supposés. Le rendement de cette machine avait atteint seulement 60% **(Cruz et al., 2011)**.

Aujourd'hui (2013 à 2016) le débit de la décortiqueuse est de 4kg/h au maximum.

Le rendement au décortilage et le taux de brisure sont calculés suivant les formules ci-dessous.



Photo 12 : Décortiqueuse Sanoussi

III.2.2. Méthodes de détermination des paramètres technologiques

➤ Taux de décortilage

Le taux de décortilage (T.D), exprimé en pourcentage, est obtenu en faisant le rapport du poids des grains décortiqués sur celui des grains non décortiqué.

$$\text{T.D}\% = \frac{(\text{poids de l'échantillon après décortilage})}{(\text{poids de l'échantillon avant décortilage})} \times 100$$

➤ Taux de brisures

Le taux de brisures, exprimé en pourcentage, est un des facteurs importants pour évaluer l'aptitude au décortilage. Il est obtenu après calibrage du produit décortiqué. Le T.B correspond au rapport du poids des grains brisés sur celui des grains décortiqués.

$$\text{T.B \%} = \frac{\text{Poids des grains brisés}}{\text{Poids des grains décortiqués}} \times 100$$

III.2.3. Description des échantillons

La caractérisation physico-chimique a été effectuée sur des échantillons de fonio brut, fonio non étuvé et décortiqué (FNED) et des fonio étuvés et décortiqués (FED). Les températures de trempage testées ont été de 70, 80 et 90°C.

Le processus d'échantillonnage est effectué suivant le schéma suivant (**Figure 4**).

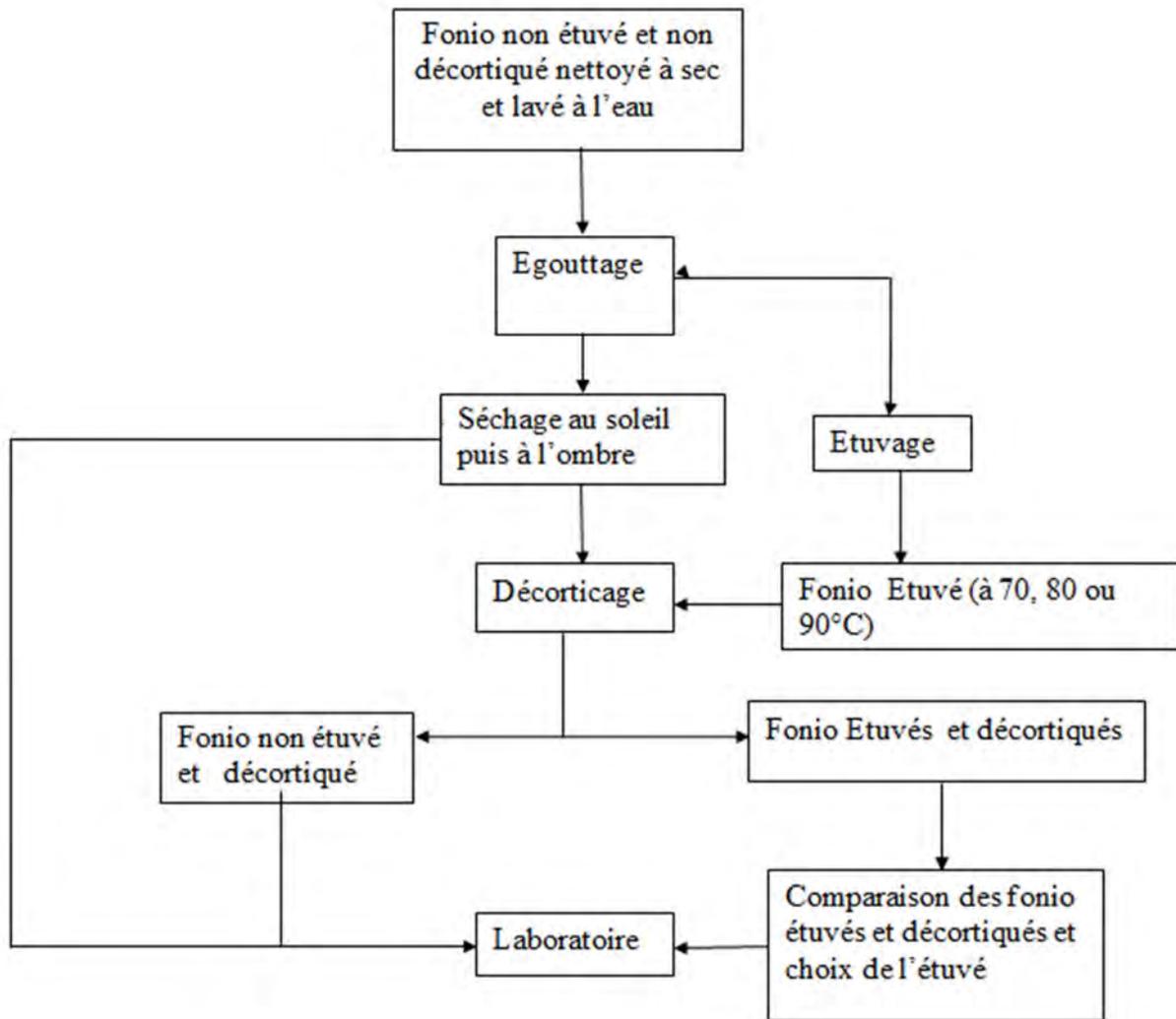


Figure 4 : Schéma d'échantillonnage pour la détermination de la température de trempage du fonio

III.2.4. Méthodes de détermination des paramètres biochimiques

III.2.4.1. Préparation des échantillons

Les échantillons étaient constitués du fonio brut, du (FNED) et du (FED). Chaque produit a été moulu en farine, pour les analyses chimiques, puis subdivisé en trois lots. Les différentes analyses chimiques ont été effectuées et répétées trois fois sur ces différents lots suivant des méthodes classiques (AOAC, 2007) décrites ci-après.

III.2.4.2. Détermination de la teneur en protéines

La teneur en protéines totale est déterminée selon la méthode Kjeldahl qui consiste à doser l'azote des protéines.

L'analyse se fait en trois étapes : la minéralisation, la distillation et la titration.

Il s'agit au préalable d'une minéralisation de la matière organique contenue dans la prise d'essai PE (0,5g) par action de l'acide sulfurique concentré 96% (15ml) en présence de catalyseur et à chaud. Ce procédé se fait sous hotte pendant 1 heure. Ainsi, l'azote moléculaire est libéré à l'état d'ammoniac qui, en présence de l'excès d'acide se retrouve sous forme de sulfate ammonium qui est distillé.

La soude est ajoutée en excès afin de changer le pH acide en un pH basique, ce qui a pour effet d'obtenir de l'ammoniac. L'ammoniac est entraîné par la vapeur d'eau par distillation. Les vapeurs d'ammoniac sont condensées au contact d'un réfrigérant et recueillies dans une solution contenant 2 indicateur coloré (rouge de méthyle et bleu de bromothymol) et de l'acide borique (25ml). L'acide borique va retenir l'ammoniac sous sa forme acide. La troisième étape est le titrage de l'ammoniac par une solution titrée d'acide sulfurique (0,1N). La solution est titrée jusqu'à équivalence par le virage de l'indicateur coloré, le rouge de méthyle (couleur rose rouge). L'acide borique est un acide faible, il ne libère que faiblement les ions H⁺ et n'interfère donc pas avec le pH. La teneur en azote N en g pour 100g de produit est obtenue et convertie en teneur en protéines par un facteur de conversion d'après la formule suivante:

$$\%N = \frac{(N \times V \times 14 \times 100)}{PE \times 1000} =$$

$$\%P = \frac{(\%N \times V \times 14)}{(PE \times 10)} \times F$$

N : normalité de H₂SO₄

PE : prise d'essai (g) : 0,5g farine de fonio

F : facteur de conversion de l'azote en protéines 6,25

14 : masse molaire de l'azote en g/mol

V : volume H₂SO₄

P : pourcentage de protéines

III.2.4.3. Détermination de la teneur en amidon

Elle est déterminée par la méthode de Luff Schoorl.

Après élimination des sucres directs facilement solubles, l'amidon subit une hydrolyse acide 2 heures (HCL : 200ml) et à chaud. La liqueur sucrée est oxydée à chaud par une solution cupro-alcaline (5ml) 5mn et l'oxyde cuivreux formé est oxydé par l'iode provenant d'une solution d'iodure de potassium 30% (3ml) après jonction d'acide (H₂SO₄ ; 6N : 3ml). L'iode

en excès est titré par une solution de thiosulfate de sodium 0,1 N en présence d'empois d'amidon.

La différence de volume en millilitre de thiosulfate entre le blanc et l'essai correspond à une quantité en milligrammes de glucose qui sera converti en amidon.

La teneur en amidon est exprimée en pourcentage :

$$\% \text{ en amidon} = \frac{(X \times 250 \times 100)}{(PE \times V_p \times 1000)} \times 0,95$$

0,95 : facteur de conversion des sucres en amidon.

X : quantité de sucre correspondant à la différence de volume de thiosulfate ($V_{\text{blanc}} - V_{\text{échantillon}}$) lu sur le tableau.

250 : volume final

V_p : Volume prélevé

PE : prise d'essai (g)

III.2.4.4. Détermination de la teneur en amylose

Le fonio est broyé en fines particules en vue de détruire la cristallisation de l'amidon, de façon à permettre une complète dispersion et une gélatinisation, suivies d'une délipidation. Une prise d'essai (0,1g) est mise en suspension dans une solution d'hydroxyde de sodium (9ml) avant addition d'une solution d'iode (2ml) à une partie de l'échantillon et mesuré par spectrométrie de l'absorbance à 620 nm, du complexe coloré formé. La teneur en amylose, exprimée en pourcentage est donnée directement par la courbe d'étalonnage. Un étalonnage externe a été effectué en utilisant l'amylose comme étalon.

III.2.4.5. Détermination de la teneur en cellulose

Les fibres constituent le résidu insoluble de la matière alimentaire. Après deux hydrolyses acide et basique de l'échantillon suivies d'une complexation par l'EDTA, le résidu est filtré et séché à l'étuve à 130°C puis calciné au four à 400°C. La différence de poids entre les deux étapes (étuve et four) donne la teneur en fibres (%C).

$$\%C = \frac{(\text{Masse creuset après étuve} - \text{Masse creuset après four})}{(\text{prise d'essai})} \times 100$$

III.2.5. Analyses statistiques

Les résultats obtenus en comparant les différents échantillons de fonio brut, de FNED, et des FED sont traités avec le logiciel XLSTAT, sous ANOVA. L'analyse des différences entre les groupes a été faite par le test de Fisher avec un intervalle de confiance à 95%.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Détermination de la température d'étuvage

Pour déterminer la meilleure température d'étuvage, nous avons considéré l'opération unitaire du trempage en fixant le temps à seize heures et en faisant varier la température à 70, 80 et 90°C. L'effet de l'étuvage sur les caractéristiques technologiques et les constituants biochimiques du fonio a été étudié.

IV.1.1. Effet de l'étuvage sur les caractéristiques technologiques

Pour juger de la meilleure température de trempage, les indicateurs de rendement au décortiquage et le taux de brisures ont été déterminés.

➤ Taux de décortiquage

Les résultats obtenus sont présentés sur la **figure 5**.

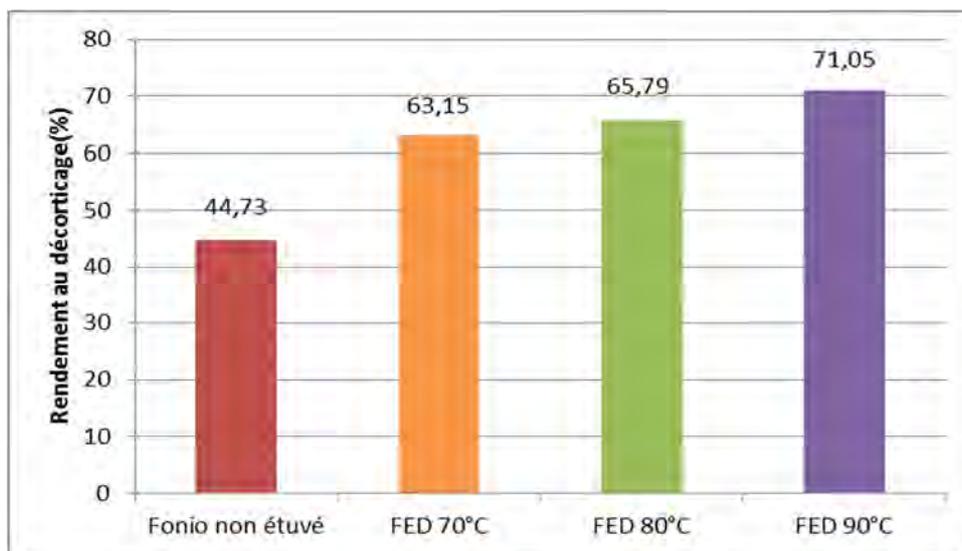
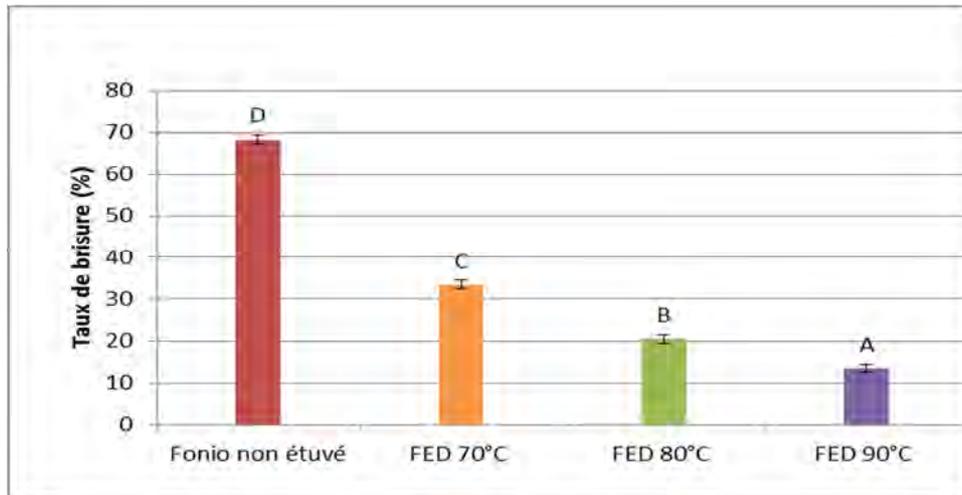


Figure 5 : Rendement au décortiquage des différents échantillons de fonio décortiqué

L'analyse de ces résultats laisse apparaître que tous les échantillons étuvés ont un rendement au décortiquage supérieur à celui du FNED. Il s'y ajoute qu'entre échantillons étuvés, le FED 90°C possède le meilleur rendement au décortiquage. Ce rendement est de 71,1% contre 65,8% et 63,2% respectivement pour le FED 80°C et le FED 70°C. Le rendement au décortiquage augmente donc avec la température de trempage.

➤ Taux de brisures

Les résultats obtenus sont présentés sur la **figure 6**.



A, B, C et D représentent les groupes qui ont une différence significative statistiquement
 N : 3 (nombre de répétition)

P value : 0,05

Figure 6 : Taux de brisure des différents échantillons de fonio décortiqués

Les échantillons de fonio étuvés ont des taux de brisures significativement plus faibles que celui du FNED. En effet, le taux de brisure est 68,4% ; 33,48% ; 20,5% et 13,46% respectivement pour le FNED, le FED 70°C, le FED 80°C et le FED 90°C. Considérant tous les échantillons de FED, nous constatons que le taux de brisures diminue lorsque la température de trempage augmente. Ainsi, le FED 90°C présente nettement le plus faible taux de brisure.

Dans nos travaux le FNED a un rendement moyen au décortiquage de 44,7% ce qui est inférieur à celui trouvé par **Fliedel et al. (2004)** qui été de l'ordre de 61,4% et un taux de brisure de 68,4% qui est supérieur à celui trouvé par cette dernière de l'ordre de 17%. Cette différence peut être due aux conditions de décortiquage (spatules et lames du décortiqueur usées et nécessitant un temps de séjour très long) et au type de variété de fonio étudié car nous avons utilisé le même décortiqueur Sanoussi.

Les travaux faits par **Cruz et al. (2011)** au Mali sur le fonio étuvé ont donné un rendement au décortiquage de l'ordre de 83,0% avec un taux de brisure de 0,64% comparé au rendement du fonio brut décortiqué qui été de l'ordre de 82% avec un taux de brisure de 0,03%. Ces résultats confirment les nôtres car ils montrent une augmentation du rendement au décortiquage et une baisse du taux de brisure après étuvage. Toutefois la différence de rendement entre le FED et le FNED est beaucoup plus marquée dans le cas de notre étude, cela pourrait être dû

au temps de trempage plus long (16 heures au lieu de 3 heures) et aux températures plus élevés (70, 80 et 90°C au lieu de 65°C).

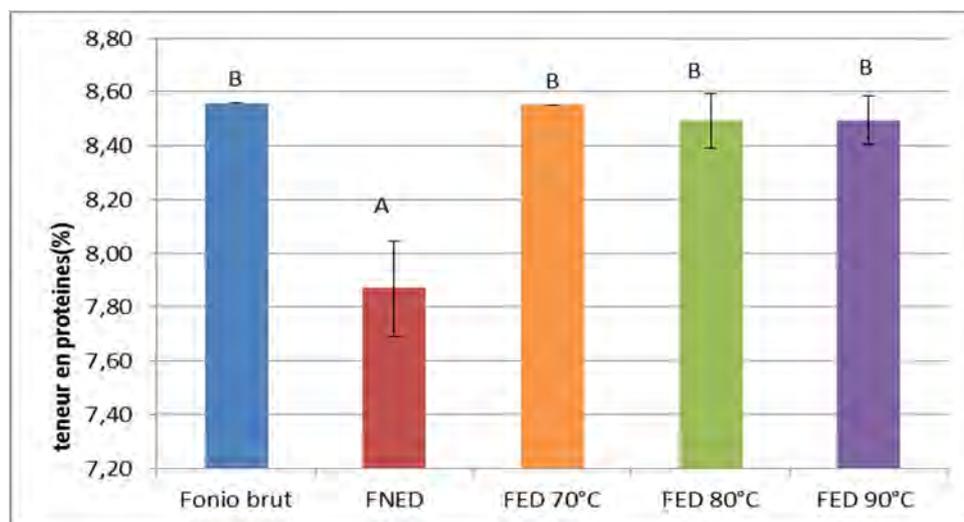
Au cours de l'étuvage, les grains de fonio se gonflent, l'enveloppe se fend ; les fissures internes observables sur ces grains de fonio sont causées par la cuisson à la vapeur et sont refermées au cours de la gélatinisation (le stade de gélatinisation c'est quand l'absorption d'eau croît avec la température et les granules d'amidon s'effondrent, ce qui permet la solubilisation de l'amylose et de l'amylopectine pour former une solution colloïdale d'après **FAO (1998)**, ce qui assure une faible proportion de brisure de grains pendant le décortiquage et accroît le rendement du produit au décortiquage. En effet, il y a une protection renforcée de l'albumen après l'étuvage due à la gélatinisation puis à la cristallisation de l'amidon suite au séchage jusqu'à une humidité comprise entre 10 et 13% rendant ainsi le grain plus dur et résistant aux chocs abrasifs du décortiquage (**Guengané, 2015**). En effet, pour les autres céréales de façon générale, la température de gélatinisation de l'amidon varie entre 60° et 75°C (**FAO, 1998**). Cependant, la petite taille du fonio et sa dureté la différencient un peu des autres céréales, ce qui pourrait expliquer la température de gélatinisation de son amidon plus élevée, peut être voisine de 90°C.

IV.1.2. Effet de l'étuvage sur les constituants biochimiques

Les résultats des analyses chimiques des différents échantillons de fonio étudiés sont présentés sur les **figures 7 à 10**. Ces analyses concernent les teneurs en protéines, cellulose, amidon et amylose du fonio brut, du FNED et des FED.

➤ Effet de l'étuvage sur la teneur en protéines

Les résultats de la teneur en protéines sur les échantillons de fonio étudiés sont présentés ci-dessous.



A et B représentent les groupes qui ont une différence significative statistiquement

N : 3 (nombre de répétition)

P value : 0,05

Figure 7 : Teneur en protéines des différents échantillons de fonio

Nous avons constaté l'effet négatif du décortiquage sur la teneur en protéines. En effet, cette valeur passe de 8,6% pour le fonio brut à 7,8% pour le FNED et confirme les travaux de **Fliedel et al. (2004)** dont les valeurs varient entre 9 à 11% pour le fonio brut et 7 à 9% pour le FNED. Par ailleurs, tous les échantillons de fonio étuvés avant d'être décortiqués ont une teneur en protéines assimilable mais légèrement inférieure à celle du fonio brut.

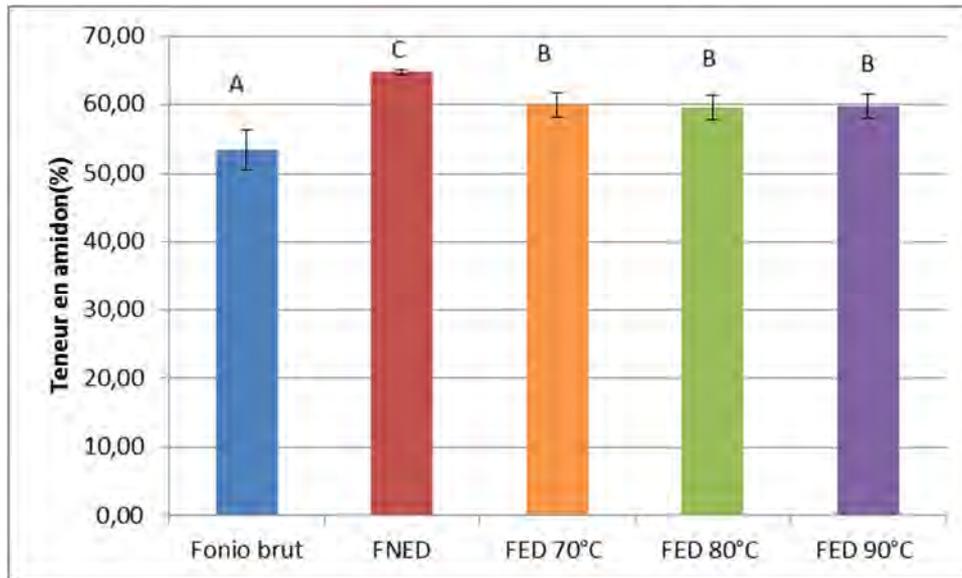
Généralement, les couches externes des céréales (péricarpe et testa) sont caractérisées essentiellement par leur teneur non négligeable en protéines (7% pour les céréales) qui sont éliminées avec le son lors du décortiquage d'après **Favier (1989)**.

La différence entre la teneur en protéines du FNED et des FED montre que l'étuvage du fonio avant son décortiquage permet de réduire significativement les pertes en protéines survenues lors de cette opération. En effet, une bonne partie de ces protéines ont pu migrer lors du trempage à chaud vers l'intérieur du grain.

L'amélioration du taux de décortiquage par l'étuvage favorise également cette préservation des protéines. La couche d'aleurone riche en protéines, se lie plus à l'albumen cristallisé et éviterait d'être entraînée dans le son avec ses protéines du fait de l'étuvage. Ceci permettrait de diminuer l'effet abrasif du décortiquage.

➤ **Effet de l'étuvage sur la teneur en amidon**

La teneur en amidon des différents échantillons de fonio étudiés sont présentés sur la **figure 8**.



A, B et C représentent les groupes qui ont une différence significative statistiquement

N : 3 (nombre de répétition)

P value : 0,05

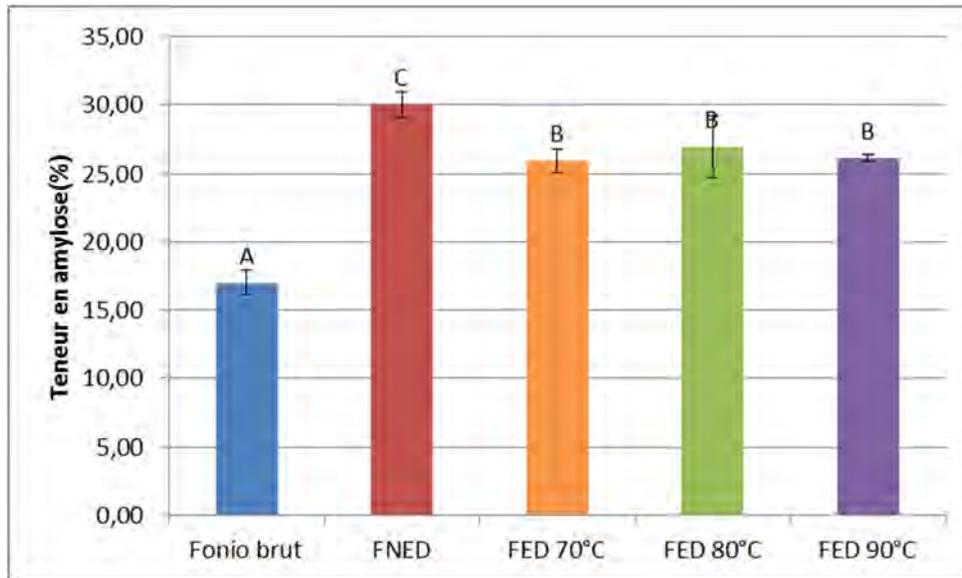
Figure 8 : Teneur en amidon des différents échantillons de fonio

Tous les échantillons de fonio décortiqués ont une teneur en amidon (64,74% ; 59,91% ; 59,62% et 59,69% respectivement pour le FNED, FED 70°C, FED 80°C et FED 90°C) supérieure à celle du fonio brut (53,38%). Le décortilage améliore ainsi la teneur en amidon. En effet, lors du décortilage, le grain est débarrassé de ses enveloppes alors que l'albumen où se concentre l'amidon reste intact. L'albumen est la partie du grain la plus importante en volume et en poids (60 à 90%), et contient principalement de l'amidon (Favier, 1989). Ainsi, le rapport amidon/grain qui est le pourcentage en amidon d'un échantillon augmente avec le décortilage puisque le volume du grain diminue.

Les résultats permettent de constater également que l'étuvage réduit la teneur en amidon pour les échantillons décortiqués. En effet, durant l'étuvage, une partie de l'amidon s'est gélatinisée diminuant ainsi le volume d'amidon et par conséquent le ratio amidon/grain.

➤ **Effet de l'étuvage sur la teneur en amylose**

Les résultats de la teneur en amylose sont présentés sur la **figure 9**.



A, B et C représentent les groupes qui ont une différence significative statistiquement

N : 3 (nombre de répétition)

P value : 0,05

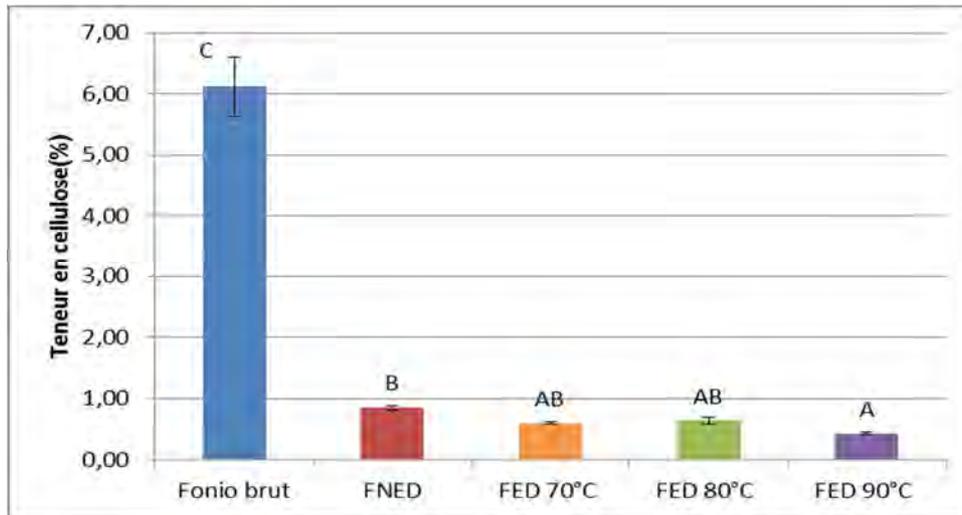
Figure 9 : Teneur en amylose des différents échantillons de fonio

L'analyse statistique révèle trois groupes : le fonio brut avec une teneur en amylose faible (19,8%) puis les FED (25,88%, 26,92% et 26,11) et enfin le FNED (29,26%) avec la plus grande valeur.

Nous constatons que ces valeurs suivent la même tendance que celles obtenues pour l'amidon. L'amylose étant un constituant de l'amidon, les hypothèses émises auparavant restent valables quant à l'effet du décorticage d'une part et de l'étuvage d'autre part. L'amidon est composé de l'amylose en minorité et de l'amylopectine en majorité (Schoch, 1945).

➤ **Effet de l'étuvage sur la teneur en cellulose**

Les résultats sur la teneur en cellulose sont présentés sur la **figure 10**.



A, B, C et AB représentent les groupes qui ont une différence significative statistiquement

N : 3 (nombre de répétition)

P value : 0,05

Figure 10 : Teneur en cellulose des différents échantillons de fonio

L'analyse statistique révèle trois groupes avec des différences significatives : le fonio brut (6,12%) qui est de loin le plus riche en cellulose suivi du FNED (0,85%) et des FED 70°C (0,60%), 80°C (0,64%) et 90°C (0,43%).

Ces résultats prouvent encore une fois l'effet abrasif du décortilage sur le grain de fonio mais aussi que l'étuvage facilite le décortilage.

La cellulose est le principal constituant de la paroi externe des cellules végétales ; elle n'est pas digérée par l'homme, mais est utile au bon fonctionnement des intestins sous forme de fibres végétales. L'analyse statistique montre que la teneur en cellulose du fonio brut est nettement supérieure à celles du FNED et du FED. Ceci est dû au décortilage dont le but est d'enlever les couches externes (péricarpe et testa) du grain qui contiennent surtout des fibres, et parfois des tanins, dont la présence dans la farine affecte la qualité de cuisson, le goût et la texture de l'aliment. Par ailleurs, nous constatons que la teneur en cellulose du FNED est supérieure à celle des FED. Cette différence est liée au processus d'étuvage qui améliore, le décortilage. En effet, durant l'étape de pré-cuisson, les enveloppes des grains de fonio sont fendues et commencent à se détacher de l'albumen. Cette situation rend ainsi le décortilage et donc l'élimination des fibres présentes dans ces enveloppes plus facile contrairement au cas du FNED où ces enveloppes adhèrent plus à l'albumen rendant ainsi leur élimination plus difficile lors du décortilage.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le fonio est une céréale longuement délaissée mais qui, ces dernières années, connaît un regain d'intérêt.

Notre étude, réalisée à l'ITA, consistait en une évaluation des effets de l'étuvage et du décortilage sur le fonio. Ces deux opérations sont couramment pratiquées dans la production d'autres céréales tel le riz.

Tout d'abord, les effets de l'opération et de la température de l'étuvage sur le rendement du décortilage et le taux de brisure du fonio ont été évalués.

Puis, l'influence du décortilage et celle de l'étuvage à diverses températures sur la teneur en protéines, amidon, amylose et cellulose du fonio ont été étudiées.

Les résultats de cette étude montrent que :

- Le décortilage réduit les teneurs en protéines et cellulose mais augmente les teneurs en amidon et amylose du fonio.
- L'étuvage permet de réduire le taux de brisures et d'améliorer le rendement au décortilage. Le trempage à 90°C donne des résultats plus intéressants comparativement aux deux autres températures (70°C et 80°C).
- Comme pour le riz, l'étuvage permet de réduire les pertes en protéines occasionnées par le décortilage du fonio.
- A l'exception de la teneur en cellulose, la variation de la température de trempage n'a pas d'effet sur leurs teneurs en protéines, amidon et amylose.

Ainsi en considérant l'effet de l'étuvage sur les paramètres physiques, 90°C serait la température de trempage optimale.

Ainsi, l'étuvage peut être considéré, pour le fonio, comme un moyen de réduire les pertes en rendement au décortilage et le taux de brisures. Il diminue également les pertes en nutriments dues au décortilage.

A la suite de ce travail il pourrait être intéressant :

- d'élargir la gamme de températures de trempage dans cette intervalle 65 et 95°C afin de déterminer la température de gélatinisation du fonio ;
- d'évaluer les effets de l'étuvage sur d'autres paramètres tels que les minéraux, acides aminés, gluten, indice glycémique pour le fonio étuvé décortiqué.
- d'étudier la cinétique du temps de trempage par rapport à la migration des composants chimiques ;
- de vérifier si la présence de son dans le grain n'inhibe pas l'hydrolyse de l'amidon.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **AOAC, 2007.** Official Methods of Analysis of AOAC International 18th Ed 2005; Rev 2007; volume I, 91p.
2. **Badiane M., 2006.** Agronomie de la culture de fonio. Document de synthèse et de formation, Direction générale de l'ANCAR à Kolda/Sénégal, 10p.
3. **Béavogui F., Cissé S., Friebel M., Pedelahore P., 1992.** Suivi de culture : le fonio, document multigraphié, Irag, Cra, Kankan, Guinée, 18p.
4. **Cirad,** (<http://aval-fonio.cirad.fr/projet/problematique>). Consultée en 2015.
5. **Cirad,** (http://fonio.cirad.fr/technologies_post_recolte/battage). Consultée en 2015.
6. **Cruz J.-F., 2001.** Le fonio, Montpellier : CIRAD-CA, 24p.
7. **Cruz J.-F., 2006.** Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio en Afrique de l'Ouest, Cirad, Montpellier, France, 64p.
8. **Cruz J.-F., 2009.** Le fonio, une céréale ancestrale remise au goût du jour. Travaux et Innovations (La revue des agents du développement agricole et rural), 163p.
9. **Cruz J.-F., Béavogui, F.,** édition Quae, sept-2011. le fonio, une céréale Africaine ; 175p.
10. **Cruz J.-F., Rivier M., Fliedel G., 2009.** Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio en Afrique de l'Ouest dans l'étude de l'étuvage du fonio et essais expérimentaux, 35p.
11. **Diallo T. A., 2003.** Connaissances endogènes sur le fonio en Guinée ; dans : Actes du premier atelier sur la diversité génétique du fonio (*Digitaria exilis stapf*) en Afrique de l'Ouest (S.R. Vodouhè, A. Zannou et E. Achigan Dako, eds), Conakry, Guinée, IPGRI, Rome, 70p.
12. **Dramé D., Cruz J.-F., 2002.** Amélioration des technologies post-récolte du fonio, rapport de mission au Bénin et au Sénégal, Coraf (Conseil Ouest et Centre Africain pour la recherche et le développement agricoles), 24p.
13. **Fall C.A., Fofana A., 2003.** Collecte des ressources phylogénétiques des fonios (*Digitaria exilis Stapf*) cultivé au Sénégal : perspective de développement de la culture. Rapport de mission ISRA Dakar/Sénégal, 26p.
14. **FAO, 1998.** <http://www.fao.org/>, le sorgho et les mils dans la nutrition humaine. consulté en 2015.
15. **FAOSTAT, 2013.** <http://www.fao.org/>, Pays producteurs de fonio dans le monde. Consultée en 2014.
16. **Favier J.C., 1989.** Eds jonh libbey eurotext, Paris ; Valeur nutritif et comportement des céréales au cours de leur transformation, Pages 285-297.

17. **Fliedel G., Ouattara M., Grabulos J., Dramé D. et Cruz J. F., 2004.** Effet du blanchiment mécanique sur la qualité technologique, culinaire et nutritionnelle du fonio, céréale d'Afrique de l'Ouest. Actes 2ème Atelier International, Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles, Ouagadougou (Burkina Faso) **2003**, Pages 599-600.
18. **Guengané R., 2015.** Améliorer l'étuvage du riz au Burkina : Approches et technologies, presse académique francophone, 120p.
19. **Irviing D.W., Jideani I.A., 1997.** Microstructure and composition of *Digitaria exilis* Stapf (acha): a potential crop. *Cereal chemistry*, 74, pages 224-228.
20. **ITA :** <http://www.ita.sn>. Consulté en 2014.
21. **Jideani I.A., Owusu R.K., Muller H.G., 1994.** Proteins of acha (*Digitaria exilis* Stapf): Solubility fractionation, gel filtration, and electrophoresis of protein fractions. *Food Chemistry*, 51, pages 51-59.
22. **Kanfany, G., 2008.** Diagnostic agronomique du fonio (*Digitaria exilis* Stapf dans des parcelles paysannes en Casamance et au Sénégal oriental), 36p.
23. **Manful J., Houssou P., Diack S., Médard M., Kromah A., Fandohan P., Sarr F., Nahemiah D., Coulibaly S.,** édition Coraf/Wecard **2011.** Initiative globale de réponse à la sécurité alimentaire, 48p.
24. **Perrot E., 1929.** Sur les productions végétales indigènes ou cultivées de l'Afrique Occidentale Française, rapport de mission, Office national des matières premières végétales, Paris, 468p.
25. **Protères R., 1955.** Les céréales mineures du genre *Digitaria* en Afrique et en Europe. *Journal d'Agriculture Tropicale et de Botanique Appliquée*, vol. 2, pages 349-386.
26. **Schoch, T. J., 1945.** *Advances in Carbohydrate Chemistry*. Ed. W.W. Pigman, M.L. Wolfrom, Acad. Press. Inc, vol.1, pages 247-277.
27. **USAID, 2008.** Chaîne de valeur fonio Sénégal; 94p.
28. **Vodouhe R., Adoukonou-Sagbadja H., Dansi A., Akpagana K., 2006.** Indigenous knowledge and traditional conservation of fonio millet (*Digitaria exilis*, *Digitaria iburua*) in Togo. *Biodiversity and Conservation*; 1, pages 2379-2395.

ANNEXE

Paramètres déterminés (moyennes et écart type en pourcentage)

	Teneur en protéines	Teneur en amidon	Teneur en amylose	Teneur en cellulose	Taux de brisure
Fonio brut	8,55 ± 0,001	53,38 ± 2,9	17,02 ± 0,90	6,11 ± 0,48	-
FNED	7,86 ± 0,179	64,73 ± 0,33	30,006 ± 0,96	0,85 ± 0,04	13,46 ± 2,5
FED 70°C	8,55 ± 0,001	59,9 ± 1,78	25,93 ± 0,82	0,60 ± 0,02	20,5 ± 0,98
FED 80°C	8,49 ± 0,10	59,62 ± 1,78	26,92 ± 2,25	0,641 ± 0,05	33,48 ± 3,9
FED 90°C	8,49 ± 0,09	59,69 ± 1,79	26,11 ± 0,24	0,42 ± 0,02	68,40 ± 5,59