Projet CFC/IGG - (FIGG/02)

Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio

CIRAD-IER-IRAG-IRSAT

Analyse des caractéristiques technologiques et culinaires du fonio

Rapport de synthèse

Genevieve FLIEDEL
CIRAD, Montpellier - France

Djibril DRAME,
IER, Bamako - Mali

Juin 2004

SOMMAIRE

	Pages
Préambule	
1. Introduction	**2**
2. Objectifs spécifiques	**2**
3. Démarche suivie	**2**
4. Technologies traditionnelles de transformation du fonio	**3**
4.1. Décorticage et blanchiment traditionnels du fonio	3
4.2. Préparation du fonio et modes de consommation	3
5. Mise au point des protocoles d'analyse de la qualité	**5**
5.1. Le nettoyage des grains paddy	5
5.2. Le décorticage des grains de fonio paddy	5
5.3. Le blanchiment des grains décortiqués	6
5.4. Le lavage des grains	7
5.5. La cuisson du fonio blanchi	7
5.6. La qualité culinaire du fonio cuit	7
6. Résultats et discussions	**8**
6.1. Caractéristiques physiques, technologiques et histologiques du fonio	8
6.2. Analyse de la qualité technologique des fonios blanchis traditionnellement	9
6.3. Analyse de la qualité technologique des fonios blanchis par divers décortiqueurs	9
6.4. Analyse de la qualité culinaire des fonios blanchis traditionnellement et mécaniquement	11
6.5. Composition biochimique du fonio décortiqué et du fonio blanchi	11
6.6. Composition nutritionnelle du fonio décortiqué et du fonio blanchi	12
6.7. Caractérisation variétale	13
7. Conclusions	**14**
Références bibliographiques	**15**
Annexe	

Préambule

Cette synthèse intitulée « **Analyse des caractéristiques technologiques et culinaires du fonio »** a été réalisée dans le cadre du projet CFC/IGG – (FIGG/02) «Amélioration des technologies post-récolte du fonio» financé par le CFC (Common Fund for Commodities), institution financière intergouvernementale autonome établie dans le cadre des Nations Unies. Ce projet régional, supervisé par la FAO/IGG, associe les instituts de recherche nationaux du Mali (IER) de la Guinée (IRAG) et du Burkina Faso (IRSAT) et le Cirad qui en est l'agence d'exécution.

Cette synthèse est le fruit d'une collaboration étroite entre les équipes de recherche des différentes institutions concernées que les auteurs tiennent à remercier.

Mali. IER/Laboratoire de Technologie Alimentaire

- DRAME Djibril : Coordonnateur National
- Mme BERTHE Aïssata BENGALY
- Mme BORE Fanta GUINDO
- Mme DIALLO Fatimata CISSE
- Mme CISSE Oumou TRAORE
- TANGARA Kola, technicien
- MmeTANGARA Adiaratou SIDIBE
- Mme TRAORE Soungalo TRAORE
- Mme KONE Mariam DEMBELE

Guinée. IRAG – Laboratoire de Technologie Alimentaire

- DIALLO Thierno Alimou: Coordonnateur National
- Mlle DIALLO Khanata

Burkina. IRSAT Département Technologie Alimentaire

- Mme OUATTARA Laurencia
- DIAWARA Bréhima

France. CIRAD/CA Laboratoire de Technologie des Céréales

- Mme FLIEDEL Geneviève
- GRABULOS Joël
- Mme OUATTARA Maïmouna
- Mme FALLET Véronique
- Mme MATENCIO Françoise
- CRUZ Jean-François : Coordonnateur Général

1. Introduction

Le fonio, *Digitaria exilis*, aussi connu sous les noms de acha ou hungry rice, est une des plus petites céréales, considérée comme une céréale mineure, appartenant à l'une des 7 espèces de mil. Cultivé dans l'Ouest africain depuis des temps anciens, sa précocité couplée à sa rusticité en font une culture de soudure par excellence [1,2,3]. Son aire de culture se situe entre les 8ème et 14ème parallèles nord, du Sénégal au Lac Tchad[1]. D'après la FAO (FAOSTAT), les principaux pays producteurs sont la Guinée, le Nigeria, le Mali, le Burkina Faso et la Côte d'Ivoire. Aujourd'hui le fonio est parfois délaissé au profit des autres céréales locales, en raison de sa transformation difficile et pénible et de sa préparation lente et laborieuse, dues à la taille minuscule de ses grains. Il véhicule pourtant une connotation valorisante de céréale prisée et rare puisque les plats culinaires dérivés sont très recherchés et appréciés.

Compte tenu de l'intérêt porté au fonio, de sa trop longue durée de préparation et du besoin en milieu urbain d'un produit prêt à l'emploi, des initiatives de mise en place d'unités de production semi-artisanales, encore peu mécanisées, se sont développées depuis peu. Parallèlement, quelques initiatives de mise au point de petits équipements (essentiellement pour le décorticage) ont vu le jour, ici ou là, mais sans vraiment répondre de manière satisfaisante aux besoins des opérateurs.

Le projet régional CFC/IGG–(FIGG/02) portant sur **l'amélioration des technologies post récolte du fonio**, financé par le Common Fund for Commodities (CFC), supervisé par la FAO et qui a regroupé les Instituts de Recherche nationaux du Mali (IER), de la Guinée (IRAG) du Burkina Faso (IRSAT) et le CIRAD en tant qu'agence d'exécution, a eu pour objectif principal de mécaniser les principales étapes de la transformation du fonio afin de réduire la pénibilité du travail des femmes, d'améliorer la qualité du produit fini pour le rendre plus compétitif, d'accroître l'offre en produits transformés sur les marchés locaux et à l'exportation, et de diminuer les coûts de transformation.

Parmi les équipes de chercheurs impliquées au CIRAD et dans les trois pays concernés (machinistes, socio-économistes, sélectionneurs, agronomes, technologues), le rôle des technologues a été principalement d'étudier la qualité des produits transformés par les machines pour la comparer à celle des fonios commercialisés sur les marchés locaux.

2. Objectifs spécifiques

Les objectifs plus spécifiques ont été de :
- mieux connaître la céréale fonio
- comparer le blanchiment mécanique et le blanchiment traditionnel du fonio au point de vue qualité du blanchiment, comportement à la cuisson et valeur nutritionnelle
- caractériser les principales variétés dans chacun des trois pays du projet afin d'identifier la ou les variétés présentant des caractéristiques technologiques et nutritionnelles plus intéressantes que les autres en vue d'une transformation mécanique à l'échelle artisanale.

3. Démarche suivie

La démarche suivie par les technologues pendant ce projet a été la suivante :
- étudier les technologies traditionnelles de transformation du grain
- mettre au point des protocoles d'analyse de la qualité des produits
- caractériser le fonio paddy et décortiqué au point de vue physique, technologique et histologique
- analyser la qualité technologique et culinaire des fonios blanchis traditionnellement et des fonios transformés par les machines
- déterminer la composition et la valeur nutritionnelle du fonio décortiqué et du fonio blanchi par rapport aux autres céréales (mil, sorgho, maïs, riz)
- identifier les variétés aux caractéristiques technologiques intéressantes.

4. Technologies traditionnelles de transformation du fonio

Après la récolte, les tiges coupées à la faucille par les hommes sont assemblées par les femmes en petites gerbes, regroupées en meules et séchées au soleil. Le battage est réalisé sur des nattes, des bâches en plastique ou à même le sol, à l'aide de bâtons ou par foulage au pied. Les grains sont tamisés avec des paniers tressés qui retiennent les impuretés grossières, séchés au soleil puis stockés dans des greniers en attendant d'être transformés[4].

4.1. Décorticage et blanchiment traditionnels du fonio

Les opérations traditionnelles de transformation du fonio paddy en fonio blanchi effectuées par les femmes[5] démarrent en général par un nettoyage grossier des grains paddy à l'aide de deux tamis successifs : le premier d'environ 2 mm d'ouverture de mailles est utilisé pour enlever les grosses particules (pailles, autres grains...) et le deuxième d'environ 1 mm pour enlever la poussière, la terre ou les grains immatures.

Le décorticage et le blanchiment sont réalisés simultanément au moyen de mortiers et de pilons. Cinq pilages successifs suivis chacun d'un vannage sont effectués pour éliminer progressivement les balles, le péricarpe et le germe jusqu'au parfait blanchiment du grain. Le quatrième pilage-vannage correspond au stade auquel le grain est vendu pré-blanchi sur le marché. Les rendements correspondants en pourcentage du paddy sont d'environ 60-68 % après blanchiment complet.

Après le 5ème pilage, commence le lavage du fonio blanchi. Le grain est plongé dans une grande calebasse d'eau et brassé à la main ; l'eau sale contenant la poussière et les sons est éliminée. Cette première opération est répétée cinq fois d'à filée. Ensuite les femmes procèdent à une élimination progressive, minutieuse et totale du sable. Pour cela, elles plongent la calebasse contenant le grain blanchi lavé dans une bassine d'eau propre et commencent par petits mouvements de balancier à faire tomber petit à petit le grain dans l'eau jusqu'à ce que seul le sable reste au fond de la calebasse. Cette opération est reproduite quatre à cinq fois ou plus si nécessaire.

Viennent ensuite les étapes d'essorage et de cuisson du fonio. Les grains sont mis par petites quantités dans un tamis fin ou dans un tissu propre et essorés par mouvements rotatifs du bras ou par torsion du tissu. Le fonio blanchi ainsi lavé et essoré est bien propre, prêt à être cuit à la vapeur ou préparé selon différentes recettes. Il peut être aussi séché ou précuit à la vapeur et séché, puis vendu.

4.2. Préparation du fonio et modes de consommation

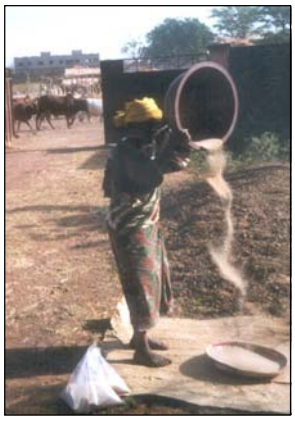
Le fonio blanchi lavé est traditionnellement cuit à la vapeur dans un couscoussier, trois fois 15 min environ. Entre chaque cuisson, les grains sont émottés et réhydratés. Ce couscous de fonio généralement accompagné d'une sauce légume, sauce arachide ou sauce gombo est appelé *foyo* et représente le plat traditionnel de fonio le plus consommé dans les trois pays du projet[6].

Depuis quelques années, certaines transformatrices produisent du fonio précuit, vendu en sachets de 500 g ou 1 kg dans les supermarchés. Ce fonio est précuit par une cuisson à la vapeur dans un grand couscoussier, puis séché au soleil. A la maison, il est cuit avec deux cuissons à la vapeur et consommé comme le *foyo* accompagné d'une sauce.

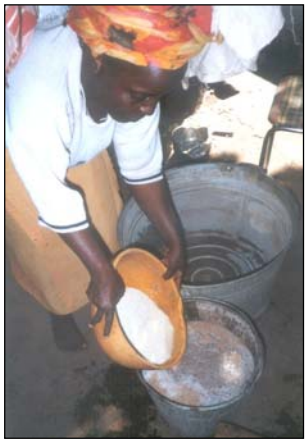
Le fonio peut être aussi consommé selon d'autres recettes qui ont été répertoriées pendant ce projet et rassemblées dans un livret de recettes[7]. Parmi les plus connues ou les plus fréquemment utilisées, citons par exemple le fonio au gras (fonio blanchi cuit dans de l'huile de palme avec de la viande et des légumes), la bouillie de fonio, le tô de fonio (farine de fonio blanchi cuite sous forme de pâte épaisse) ou le déguè de fonio consommé au petit déjeuner délayé dans du lait (farine de fonio blanchi roulée sous forme de gros granules précuits, trempés dans de l'eau bouillante).

1. Nettoyage du grain paddy

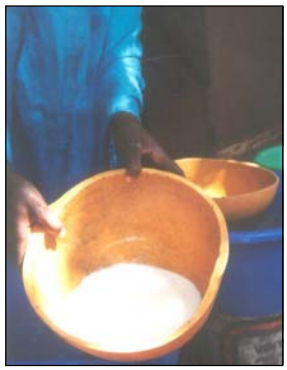
2. Pilage du grain paddy en blanchi



3. Vannage des grains après chaque pilage



4. Lavage du grain blanchi pour éliminer le son



5. Lavage du grain blanchi pour éliminer les sables

Clichés: G. FLIEDEL (Cirad)

Fig. 1. Les étapes de la transformation traditionnelle du fonio

5. Mise au point des protocoles d'analyse de la qualité

Plusieurs protocoles d'analyse de la qualité du fonio ont été mis au point par les technologues pendant le projet afin d'analyser les fonios décortiqués ou blanchis présents sur le marché, d'assister les machinistes dans le suivi de leurs essais d'équipements et de caractériser les différentes variétés d'un point de vue technologique, biochimique, culinaire. La plupart des protocoles ont été décrits en détail dans le fascicule des protocoles[8] de caractérisation de la qualité du fonio mais certains ont été développés après. Voici les principaux résumés ici. Les protocoles utilisés pour l'analyse biochimique et la composition nutritionnelle des grains sont rapportés en Annexe.

5.1. Le nettoyage des grains paddy

Avant toute opération de décorticage et blanchiment, le fonio paddy est nettoyé par tamisage en utilisant deux types de tamiseurs selon les quantités de grains disponibles. Dans les deux cas, il est débarrassé des fines impuretés (grains immatures, sable fin) et des grosses particules (paille, graines étrangères, cailloux) grâce à un jeu de deux tamis.

- *Le tamiseur à courant d'air Alpine type 200 LS*, utilisé pour les quantités inférieures à 1 kg, repose sur un principe de triage aérodynamique des particules. Il est muni d'une buse rotative qui souffle un courant d'air sous un tamis de 20 cm de diamètre et d'ouverture de mailles variable. Cette buse est couplée à un aspirateur, constituant ainsi un système de dégommage très performant et permettant une séparation parfaite des particules. 100 g de fonio sont tamisés 2 min sur un tamis de 1000 µm pour séparer les grosses particules, le passant est récupéré et tamisé sur un tamis de 710 µm qui laisse passer les fines impuretés.
- *Le nettoyeur-calibreur Tripette et Renaud NSL 2000*, utilisé pour les quantités supérieures à 1 kg, fonctionne en continu. Il est constitué de deux tamis superposés vibrants couplés à un système de ventilation et un cyclone. Dans le cas du fonio, la ventilation a été réglée au minimum, et comme le tamisage est moins précis que celui effectué à l'Alpine, les tamis choisis ont été de 1,5 mm pour le tamis supérieur et de 1 mm pour le tamis inférieur. Le dégommage est facilité par la présence de billes inertes à l'intérieur de chaque tamis. Le grain propre est récupéré entre ces deux tamis.

Le tamisage peut être effectué manuellement au laboratoire en utilisant le même protocole que celui utilisé avec le tamiseur à courant d'air Alpine (laboratoire LTA, IER, Mali).

5.2. Le décorticage des grains de fonio paddy

Il a été effectué avec un décortiqueur de laboratoire à rouleaux de caoutchouc Sataké, habituellement utilisé pour le riz et adapté au fonio. Les grains paddy sont décortiqués lors du passage entre deux rouleaux de caoutchouc, tournant en sens inverse à des vitesses différentes (1 : 1,25), avec un écartement entre rouleaux réglable en fonction de la taille des grains. Cette vitesse différentielle provoque un phénomène de friction à la surface des balles qui sont arrachées, puis entraînées dans un cyclone par un système de ventilation. Le grain nu décortiqué est récupéré dans des godets. L'alimentation des grains peut se faire par patch ou en continu grâce à une trémie d'alimentation dont le débit est réglé par une molette. Pour le fonio, les rouleaux de caoutchouc ont été resserrés au contact, la ventilation réglée au minimum, l'alimentation en grains effectuée par lots de 200 g. Deux passages des grains ont été nécessaires pour minimiser la quantité de grains paddy dans les grains décortiqués.

Analyse de la qualité du décorticage

- Le rendement au décorticage : c'est le pourcentage de la masse des grains décortiqués par rapport à celle des grains paddy pesés au départ.
- Le taux de paddy présents : les grains non décortiqués sont séparés manuellement des grains décortiqués à partir d'1 g de grains échantillonnés représentatifs de l'ensemble du lot. Le taux de paddy correspond au pourcentage de la masse des grains paddy rapporté à la masse de l'échantillon après décorticage.

Cliché: J.F. CRUZ (Cirad)

Fig. 2. Décortiqueur de laboratoire à rouleaux de caoutchouc

5.3. Le blanchiment des grains décortiqués

Les grains décortiqués ont été blanchis avec le blanchisseur de laboratoire SATAKE initialement utilisé pour le riz et modifié pour le fonio en réduisant la capacité de la chambre de blanchiment. Le blanchiment se fait par abrasion à l'aide d'un disque abrasif (meule n° 36) tournant autour d'un axe horizontal dans une chambre perforée délimitée par un grillage fin adapté à la taille du fonio. Plusieurs vitesses de rotation sont disponibles, grâce à la présence d'une courroie d'entraînement pouvant se placer sur plusieurs braquets. Au cours du blanchiment, les sons ainsi que les brisures et les petits grains sont éjectés de la chambre au travers du grillage et tombent dans un bac de récupération. Les grains matures restent dans la chambre où ils sont brassés et progressivement blanchis, puis récupérés en fin de blanchiment après ouverture de la chambre. Un blanchiment optimal a été obtenu avec 80 g de grains abrasés pendant 1min 15 à la vitesse maximale.

Analyse de la qualité du fonio blanchi

Après blanchiment, les fractions de sons dans le bac de récupération et de grains blanchis récupérés après ouverture de la chambre sont toutes deux tamisées manuellement avec un tamis de 400 µm pour éliminer les sons puis un tamis de 500 µm pour éliminer les brisures qui passent à travers le tamis et sont donc comprises entre 400 et 500 µm.

- Le taux de brisures correspond à la quantité de brisures récupérées dans chacune des deux fractions, rapportée en pourcentage à la quantité totale de grains blanchis et de brisures.
- Le rendement au blanchiment est le pourcentage de la masse des grains blanchis contenant les brisures par rapport à celle des grains décortiqués pesés au départ. Le taux d'usure est l'inverse de celui-ci.

Cliché: J. GRABULOS (Cirad)

Fig. 3. Décortiqueur de laboratoire à rouleaux de caoutchouc

5.4. Le lavage des grains

Avant cuisson ou analyse biochimique, les grains blanchis ou décortiqués sont séparés des sons, poussières ou terre encore présents par un lavage à l'eau distillée en deux étapes selon la méthode traditionnelle. Les grains placés dans un bécher sont d'abord rincés 3-4 fois et l'eau « sale » chargée de particules en suspension est à chaque fois éliminée. Puis les grains sont plongés dans de l'eau propre et, par des petits mouvements de balancier, ils sont acheminés dans un autre bécher d'eau propre afin de séparer le sable qui, par différence de densité, reste au fond du premier bécher. Cette dernière opération a été répétée deux fois. Les grains sont ensuite étalés sur une serviette et mis à sécher sur la paillasse à température ambiante (20-25°C) pendant 48 h jusqu'à ce que leur teneur en eau avoisine 12 %.

5.5. La cuisson du fonio blanchi

60 g de fonio blanchi, lavé et séché sont préalablement réhydratés avec 18 ml d'eau millipore et laissés reposer 10 min dans une barquette avant d'être cuits trois fois à la vapeur pendant respectivement 10, 12 et 10 min. Les cuissons sont réalisées dans un couscoussier contenant 1,5 l d'eau désionisée portés à ébullition sur une plaque chauffante à 300°C. Entre chaque cuisson, les grains sont émottés, puis réhydratés avec 18 ml d'eau millipore. L'eau désionisée du couscoussier est changée après chaque essai et le linge en coton sur lequel est étalé le fonio dans la passoire est lavé et séché. Deux essais de cuisson sont effectués par échantillon.

5.6. La qualité culinaire du fonio cuit

La qualité culinaire du fonio cuit a été déterminée en évaluant tout d'abord la capacité de gonflement des grains en cours de cuisson et leur consistance.

La capacité de gonflement du fonio en cours de cuisson
Elle a été évaluée par dessiccation d'environ 3 g de fonio cuit dans une étuve à 100°C pendant 24 heures. La pesée différentielle avant et après passage à l'étuve permet de déterminer la quantité totale d'eau absorbée par le fonio pendant la cuisson. Le gonflement est exprimé en g d'eau absorbée pour 100 g de fonio cuit sec.

La consistance du fonio cuit
La consistance du fonio cuit a été mesurée à l'INSTRON (Universal Food Testing Machine type 4300) en effectuant des tests d'extrusion. Juste après cuisson, le fonio est placé dans deux pots hermétiques et maintenu à 35°C dans une étuve thermostatée pendant 1 h. Il est alors rapidement transféré dans la cellule d'extrusion Ottawa préchauffée à 35°C (modèle réduit de 7,5 cm^2 de surface d'extrusion). Au fur et à mesure de la descente du piston à la vitesse constante de 100 mm/min, le capteur de force enregistre tout d'abord une force de résistance à la compression qui augmente jusqu'à un palier correspondant à l'extrusion du produit au travers d'une grille située au fond de la cellule et dont les trous ont 2 mm de diamètre. La force moyenne d'extrusion entre les limites (kgf) a été retenue pour la mesure de la consistance du fonio cuit. Plus le produit est ferme, plus la force d'extrusion est élevée. Deux mesures de consistance ont été effectuées par échantillon de fonio cuit.

Cliché: J. GRABULOS (Cirad)

Fig. 4. Cellule remplie de fonio pour mesure de la consistance à l'Instron

6. Résultats et discussions

6.1. Caractéristiques physiques, technologiques et histologiques du fonio paddy et du fonio décortiqué au laboratoire

Le fonio, monocotylédone glumacée de la famille des graminées, genre *Digitaria,* est une céréale vêtue dont le caryopse après battage reste entouré de glumes et de glumelles (balles). Grâce au décortiqueur de laboratoire Sataké, nous avons pu obtenir séparément le grain décortiqué à partir du paddy après élimination des balles. L'obtention d'un échantillon pur de grains décortiqués ne peut généralement être réalisée qu'en laboratoire car dans la pratique, lorsque le grain est transformé progressivement au pilon, les échantillons obtenus après chaque pilage (sauf le dernier) sont souvent constitués d'un mélange de grains. Les grains paddy, décortiqués et blanchis (traditionnellement ou mécaniquement) ont été observés à la binoculaire.

Des caractéristiques physiques comme le poids de mille grains, la taille des grains ont été mesurées. Le grain paddy est ovoïde, de très petite taille. Il mesure 1,5 mm de longueur, de 0,8 à 0,9 mm de largeur et le poids de 1000 grains est en moyenne de 0,5 g[9]. Les balles représentent 20-25 % du poids du grain et les rendements au décorticage des grains paddy vont de 74-75 % à 80-82 % pour des décorticages effectués respectivement au laboratoire de l'IER[10], Mali et au CIRAD[11], cette différence dépendant essentiellement du réglage du décortiqueur ou de fuites dues au manque d'étanchéité de l'appareil. Le caryopse (grain décortiqué) mesure 1 mm de long et 0,7 à 0,8 mm de large ; il est recouvert d'un péricarpe brillant, de couleur claire (jaune) ou foncée (brun) selon les variétés et possède un germe relativement gros et enchâssé. Lors du blanchiment, les parties périphériques du grain sont éliminées (le péricarpe, tout ou partie du germe et très certainement la partie extérieure de l'albumen).

Fonio paddy

Fonio décortiqué

Fonio blanchi

Clichés : J.F. CRUZ (Cirad)

Fig. 5. Le fonio sous ses différentes formes

Des coupes de grains décortiqués effectuées au laboratoire d'histologie du CIRAD nous ont permis de mieux connaître cette céréale au point de vue microscopique et d'affirmer, grâce à des colorations appropriées, que le grain de fonio, comme celui de toutes les autres céréales, possède un germe qui contient l'essentiel des réserves lipidiques et un albumen riche en réserves amylacées, les protéines étant surtout concentrées à la périphérie au niveau de la couche à aleurone avec un gradient de concentration décroissant vers le centre[12].

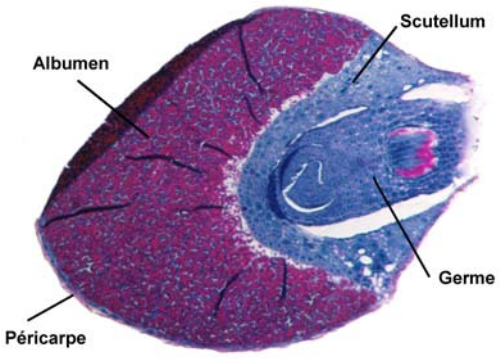


Fig. 6. Coupe du grain de fonio (Cirad)

6.2. Analyse de la qualité technologique des fonios blanchis traditionnellement

Après la mise au point des protocoles d'analyse de la qualité du fonio, il était important d'apprécier la qualité des produits traditionnels présents sur les marchés afin d'avoir une référence pour assister les machinistes dans les essais d'équipements. Plusieurs échantillons de fonio blanchis non lavés, blanchis lavés et précuits ont été collectés au Mali et au Burkina et analysés au point de vue technologique et biochimique[13]. D'une manière générale, tous les produits blanchis lavés ou précuits sont propres (taux d'impuretés inférieur à 0,1 %, avec quelques traces de sable) sauf un échantillon, prélevé auprès des femmes du fleuve à Bamako, qui contenait 0,2 % d'impuretés et jusqu'à 1,8 % de sable, ce qui apparaît comme une exception. Le blanchiment est à la fois minutieux et relativement poussé puisque le taux de paddy est généralement inférieur à 1 % avec un grain très bien dégermé (teneur en lipides en dessous de 1 % m.s). Par rapport à un fonio décortiqué qui contient en moyenne 9-11 % m.s. de protéines et 1-1,1 % m.s. de matières minérales, la teneur en protéines de ces fonios blanchis traditionnellement avoisine 7,4–8,5 % m.s et la teneur en matières minérales n'atteint pas 0,5 % m.s., ce qui signifie que la couche à aleurone en périphérie des grains est attaquée au cours du pilage, le grain est usé, bien blanchi par les femmes.

Ces résultats nous ont permis de préciser que, pour avoir des caractéristiques proches de celles de ces produits traditionnels et être ainsi acceptés par les transformatrices et les consommateurs, le produit issu des décortiqueurs-blanchisseurs adaptés ou développés pour le fonio, devait être propre, avec très peu de paddy et bien blanchi, sans pour autant être trop usé pour une meilleure qualité nutritionnelle et un meilleur rendement.

6.3. Analyse de la qualité technologique des fonios blanchis par divers décortiqueurs-blanchisseurs

Les technologues ont dans le cadre du projet participé aux essais d'équipements en analysant la qualité des produits issus des décortiqueurs-blanchisseurs.

Au début du projet, les équipements de décorticage testés par les machinistes dans les trois pays partenaires, au Mali, en Guinée et au Burkina, étaient des équipements existants, soit déjà utilisés pour décortiquer le riz, le sorgho, le mil ou le maïs, soit pour certains, peu nombreux, spécifiquement utilisés pour le fonio, comme le décortiqueur « Sanoussi » et plusieurs décortiqueurs de type Engelberg en Guinée. Ces machines, qui peuvent fonctionner en continu ou par lots, appartiennent à deux grands types de décortiqueurs : les décortiqueurs qui fonctionnent par abrasion en usant le grain de l'extérieur vers l'intérieur (c'est le cas des types PRL) et les décortiqueurs fonctionnant par friction qui arrachent le son et les balles (c'est le cas du « Sanoussi » et des types Engelberg).

L'analyse de la qualité des produits a montré que, outre un débit trop faible (inférieur à 50 kg/h), aucune de ces machines ne répondait aux attentes des transformatrices. En effet, pour des rendements de décorticage-blanchiment proches des rendements traditionnels (60-68 %), des taux de paddy excessifs (supérieurs à 4 %) ont été trouvés dans les produits. Autre inconvénient : la plupart de ces décortiqueurs ne dégermaient pas le grain au cours du décorticage (teneur en lipides de plus de 1,2 % m.s.) et brisaient beaucoup plus que le pilon (plus de 10 % de brisures) même s'ils arrivaient à blanchir les grains décortiqués. Ces premiers essais ont montré que, même si aucun décortiqueur n'était en mesure de donner satisfaction, les décortiqueurs de type Engelberg semblaient, pour les machinistes, un peu mieux adaptés que ceux de type abrasif pour le décorticage-blanchiment du fonio[14].

Grâce à ces conclusions, un prototype de type Engelberg adapté aux dimensions et aux particularités du grain de fonio a ainsi été développé par les machinistes des quatre pays partenaires. Ce décortiqueur appelé GMBF (Guinée-Mali-Burkina-France) est constitué d'un carter cylindrique horizontal à l'intérieur duquel tourne un rotor métallique équipé de nervures longitudinales. Les grains sont décortiqués par la friction qu'ils exercent les uns sur les autres. Une lame frein, solidaire du carter, permet par son réglage, de freiner la progression des grains et

d'accroître les phénomènes de friction. Des trappes sont placées à l'entrée et à la sortie de la chambre de décorticage pour réguler le débit de la machine. Ce décortiqueur est équipé d'un canal de vannage qui permet l'aspiration des sons à la sortie des grains.

Les performances obtenues en matière de qualité de décorticage sont intéressantes : outre un débit supérieur à 110 kg/h et un rendement de 66-72 %, le taux de paddy ne dépasse pas 0,5 %, le taux de brisures 5 % et le taux de dégermage est voisin de celui obtenu avec le pilon (teneur en lipides inférieure à 1 %). La qualité technologique du produit issu de ce décortiqueur GMBF apparaît proche de celle du fonio blanchi traditionnellement par les femmes.

Pour confirmer ces résultats, un même fonio paddy en provenance du village de Fingoloni au Mali a été blanchi à la fois avec le décortiqueur-blanchisseur GMBF, mais aussi traditionnellement au pilon et enfin au laboratoire en utilisant d'abord le décortiqueur Sataké puis le blanchisseur abrasif Sataké. Les résultats ont montré que les taux de brisures des fonio blanchis mécaniquement, aussi bien à la GMBF qu'au Sataké, étaient équivalents et voisins de 0,3 % alors que les cinq pilages traditionnels brisaient d'avantage les grains. De plus, la machine GMBF qui utilise le système de friction arrive à bien dégermer le fonio avec des caractéristiques de blanchiment tout à fait proches de celles du produit traditionnel[15]: la teneur en lipides dans le fonio blanchi traditionnellement et à la GMBF est plus basse que dans celui blanchi par abrasion au laboratoire, respectivement de 0.9, 1 et 1,6 % m.s.

Tableau 1. Qualités technologiques et culinaires du fonio Fingoloni issu du blanchiment traditionnel et du blanchiment mécanique

Fonio Fingoloni blanchi	Rendement au blanchiment (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% m.s.)	Gonflement (g d'eau pour 100 g)	Force d'extrusion (kgf)
Blanchiment traditionnel	90	1,9	0,9	173,1	42,5
Blanchiment par la GMBF	90	0,3	1	182	38,8
Blanchiment au Sataké	89	0,3	1,6	137,1	52,1

Cliché: D. DRAME (IER)

Fig. 7. Analyse de la qualité du fonio au Laboratoire de technologie alimentaire de l'IER

6.4. Analyse de la qualité culinaire des fonios blanchis traditionnellement et mécaniquement

Dans le cadre du projet, il nous est apparu essentiel, à nous technologues, que le produit fini issu des techniques modernes ait au moins les mêmes qualités organoleptiques que le fonio existant déjà sur les marchés locaux. Selon les enquêtes de consommation réalisées au début du projet, les premiers critères de qualité portaient sur l'absence de sable dans le produit blanchi lavé, sa blancheur mais aussi sa capacité d'absorption d'eau pendant la cuisson.

A partir du même fonio paddy en provenance du village de Fingoloni au Mali, les grains blanchis traditionnellement au pilon et les grains blanchis au décortiqueur-blanchisseur GMBF ont été analysés au point de vue qualité culinaire et comparés à ceux obtenus au blanchisseur abrasif de laboratoire. La machine GMBF donne un produit aux caractéristiques culinaires proches de celles du produit traditionnel. Les taux de gonflement des grains après cuisson sont plus élevés (respectivement 182 et 173 g d'eau pour 100 g de fonio cuit sec) avec des forces d'extrusion plus basses (respectivement 38,8 et 42,5 kgf) par rapport au produit du laboratoire (137 g d'eau pour 100 g de fonio cuit sec et 52,1 kgf). Ce qui veut dire que les deux produits issus du blanchiment traditionnel et de la GMBF ont un dégermage plus poussé, gonflent plus et sont plus moelleux[13]. Il semblerait que la qualité du blanchiment et notamment le dégermage soit une caractéristique importante dans la qualité culinaire du produit. L'élimination du germe faciliterait l'absorption d'eau par les grains donc la consistance moelleuse désirée par le consommateur. Ces hypothèses restent à être confirmées.

6.5. Composition biochimique du fonio décortiqué et du fonio blanchi traditionnellement et mécaniquement

Après élimination des balles, le grain décortiqué est un grain qui contient moins de protéines (9-11 % m.s.) que le sorgho et le mil (11-12 % m.s.), moins de matières minérales (1,1 % m.s. au lieu de 1,4-1,8 % m.s.) et de sucres (1 % m.s. au lieu de 1,4-2,4 % m.s.) et des teneurs équivalentes en fibres totales (6,5-8,5 % m.s.). Les valeurs de lipides (3,6-4,2 % m.s.) sont tout à fait comparables à celles habituellement trouvées chez un sorgho (3,5-4 % m.s) et légèrement inférieures à celle du mil ou du maïs (supérieure à 4-5 % m.s.). Les sucres présents sont principalement le saccharose (2 fois moins que chez un sorgho), suivi du raffinose, glucose et fructose. Il n'y a pas de stachyose. Les fibres totales sont principalement la cellulose suivie des hémicelluloses[5].

Tableau 2. Composition biochimique du fonio décortiqué et blanchi en comparaison à celle d'un échantillon de sorgho, de mil, de maïs et de riz

	Protéines % m.s.		Lipides % m.s.		Matières minérales % m.s.		Glucides % m.s.	
	Entier	Blanchi	Entier	Blanchi	Entier	Blanchi	Entier	Blanchi
Fonio	9 – 11	**7 – 9**	3,6 - 4,2	**0,8 – 1**	1 – 1,1	**0,3 – 0,6**	84 -86	**89 – 91**
Sorgho	11	10	3,5 - 4	1,2	1,2	0,5	84	88
Mil	12	11	4 - 4,5	1,2	1,2	0,8	83	87
Maïs	11	10	4,5 – 5	1	1,3	1	83	88
Riz	-	**8**	-	**0,9**	-	**0,5**	-	**90**

Après blanchiment au pilon ou à la GMBF, les mêmes valeurs de composition, à quelques points près, ont été obtenues entre ces deux produits. Le grain blanchi est « enrichi » en amidon (70-93 % m.s.) et appauvrit en tous les autres constituants : il ne contient plus que 7-9 % m.s. de protéines, 0,8-1 % m.s. de lipides, 0,3-0,6 % m.s. de matières minérales, 4-7 % de fibres et 0,1-0,2 % de sucres. Sa composition est tout à fait comparable à celle d'un riz blanc. Le seul sucre présent est le glucose (0,06 %) qui semble être plus localisé dans l'albumen que dans les parties

plus périphériques du grain ; alors que les quantités de sucres présents chez un sorgho ou un mil après décorticage restent encore très élevées (0,7-1,4 et 2,0 % m.s. respectivement). La cellulose est présente en majorité chez le fonio blanchi alors que ce sont les hémicelluloses que l'on trouve en majorité chez un sorgho ou un mil décortiqué pour des teneurs en fibres totales équivalentes (4-7 % m.s.). Les pentosanes totaux qui sont des polysaccharides pariétaux à caractère visqueux sont en quantité négligeable (0,2-0,1 % m.s.) par rapport aux 1,1 % m.s. présents chez un sorgho ou un mil décortiqués et ne peuvent expliquer l'effet « bénéfique » du fonio sur les diabétiques[16]. Pour aller plus loin dans la compréhension physico-chimique du grain de fonio en relation avec le diabète, nos travaux devraient se poursuivre plus vers une étude de la structure et de la digestibilité de l'amidon de fonio ou la présence de certains facteurs antinutritionnels.

6.6. Composition nutritionnelle du fonio décortiqué et du fonio blanchi traditionnellement et mécaniquement

Pour le fonio décortiqué, comme pour le sorgho et le maïs grain entier, l'élément minéral majoritaire est le phosphore, puis le potassium, le soufre, le magnésium et ensuite le calcium alors que pour le mil grain entier, c'est le potassium qui est prépondérant suivi du phosphore et des autres éléments minéraux. Après blanchiment du fonio et du riz ou décorticage du sorgho, du mil et du maïs, les valeurs chutent considérablement suite très certainement à l'élimination d'une grande partie de la couche à aleurone, les éléments minéraux étant, pour la plupart, concentrés dans la périphérie du grain. Seul le soufre résiste et semble plus interne à l'albumen que les autres éléments minéraux. Le fonio est la céréale grain entier la plus riche en soufre (0,16 % m.s.) et en magnésium (0,13 % m.s.), en zinc (33,4 ppm) et en manganèse (21,6 ppm), le maïs en phosphore (0,34 % m.s.) et le mil en potassium (0,34 % m.s.). Après blanchiment, le fonio reste le plus riche en soufre (0,15-0,16 % m.s.), et en zinc avec le mil[13] (21,4-21,8 et 28,7 ppm respectivement).

La proportion d'acide gras dans les lipides du fonio décortiqué est pratiquement la même que dans les lipides du fonio blanchi, qu'il soit blanchi au pilon ou à la GMBF, alors que l'on passe respectivement de 3,7 à 0,8-1 % m.s. de lipides. Cette remarque est valable pour les autres céréales quel que soit le degré de dégermage. 74 à 80 % des acides gras présents sont des acides gras insaturés, et ceci quelle que soit la céréale (pour le riz la proportion est de 72 %). L'acide gras insaturé majoritaire est l'acide linoléique en C18 :2 suivi de l'acide oléique en C 18 :1.

Le grain de fonio décortiqué contient surtout de la vitamine B1 (0,48 mg pour 100 g m.s.). Après un blanchiment au pilon ou à la GMBF qui dégerme bien le grain, ce taux chute considérablement (0,06 mg pour 100 g m.s.) tout comme pour le riz (0,06 mg pour 100 g m.s.) alors que le mil, le sorgho et le maïs en conserve un tout petit peu plus après décorticage au pilon (0.22, 0.17, 0.10 mg pour 100 g m.s. respectivement).

La composition en acides aminés apparaît équilibrée mis à part une déficience en lysine (0,12-0,13 % m.s.) comme pour toutes les autres céréales (0,14-0,21 % m.s.). Il faut noter cependant que cette céréale, même après blanchiment, est plus riche en acides aminés soufrés que les autres, notamment en méthionine (0,36-0,42 % m.s.), pratiquement deux fois plus riche que le mil ou le maïs (0,22-0,23 % m.s.) et 3 fois plus que le riz (0,15 % m.s.). Cette richesse en acides aminés soufrés avait déjà été soulignée dans la littérature[17]. Les protéines plus riches en méthionine présenteraient, pour la même quantité, une meilleure efficacité protéique, auraient un rôle bénéfique sur le taux de lipides, de cholestérol et de triglycérides sanguins et participeraient à la détoxification métabolique des tannins contenus dans le bol alimentaire. Le grain de fonio blanchi au pilon ou à la GMBF apporte plus d'acides aminés insulino sécréteurs (valine, leucine, isoleucine) (1,81-1,89 % m.s.) que le riz blanchi (1,22 % m.s.) ou le mil décortiqué (1,53 % m.s.) mais moins que le sorgho (3,11 % m.s.) ou le maïs (2,09 % m.s.). Cependant, même en quantité moindre, ces acides aminés devraient être plus biodisponibes et être bénéfiques pour les consommateurs diabétiques.

6.7. Caractérisation variétale

Les technologues ont participé à l'analyse technologique et culinaire de 12 variétés sélectionnées par les agronomes pour leur bonne qualité agronomique (rendement, cycle végétatif) et cultivées dans les trois pays du projet sous forme d'essais multilocaux[11]. L'objectif de cette étude était l'identification de la variété qui pourrait être recommandée au niveau régional pour une transformation mécanisée à l'échelle artisanale. Sur 39 échantillons prévus (12 variétés et un témoin par lieu), seuls 23 sont parvenus au CIRAD en juin 2003 (13 de Guinée, 9 du Mali et 1 du Burkina compte tenu des conditions climatiques particulièrement difficiles).

Cliché: D. DRAME (IER)

Fig. 8. Essais variétaux au Centre de Recherches Agronomiques de Bareng (Guinée)

L'analyse technologique et culinaire des fonios issus des essais multilocaux a mis en évidence l'importance du lieu sur la qualité et le comportement des grains au cours du blanchiment et de la cuisson. Les conditions sahéliennes que l'on trouve au Mali confèrent aux grains un caractère cassant (3,1 % de brisures) ce qui provoque une diminution du rendement au blanchiment (88,1 %) et un mauvais dégermage (teneur en lipides de 1,45 % m.s.), avec une teneur en protéines et matières minérales presque inchangée (10,1 et 1,3 % m.s. respectivement), comme si l'usure était plus interne après brisures des grains. Ces grains semblent plus durs, plus vitreux et ont du mal à gonfler pendant le traitement à la vapeur, leur consistance reste plus ferme (157,8 g d'eau pour 100 g m.s. et 41,7 kgf respectivement). A l'opposé les conditions plus humides en Guinée donnent des grains plus tendres, moins cassants (peu de brisures : 0,87 %), qui ont un blanchiment plus homogène (rendement en grains blanchis plus élevé : 89,9 %), et un meilleur dégermage (teneur en lipides de 0,75 % m.s.), moins de protéines (9,3 % m.s.) et de matières minérales (0,8 % m.s.), comme si l'usure des grains par abrasion était plus régulière et plus externe. Ces grains absorbent plus d'eau pendant la cuisson (164,9 g d'eau pour 100 g m.s.) et sont plus moelleux (36,2 kgf).

On a pu distinguer une différence variétale au point de vue aptitude au blanchiment mais aucune différence au point de vue consistance et gonflement des grains cuits à la vapeur. Si l'on voulait citer 2 variétés parmi les 6 analysées sur les deux lieux, on pourrait opposer la variété Fonhon qui présenterait une meilleure aptitude au décorticage (rendement au décorticage plus élevé : 79,9 et 82,6 % respectivement à l'IER et au CIRAD) et au blanchiment mécanique (taux de brisures de 1,2 %) que Hotia (rendement au décorticage de 75,8 et 78,9 % respectivement à l'IER et au CIRAD, taux de brisures de 2,2 %). Mais les 12 variétés n'étaient pas disponibles en quantité suffisante sur les trois lieux et une telle expérimentation devrait être renouvelée une deuxième année pour pouvoir recommander une variété au niveau régional au point de vue technologique.

7. Conclusions

Après les quatre années du projet, nous avons une meilleure connaissance de la céréale fonio au niveau physique, biochimique, technologique et culinaire, et nutritionnel. Cette céréale à grains minuscules et vêtus a une structure similaire à celle de toutes les autres céréales avec un albumen contenant les réserves protéiques et amylacées, un germe gros et enchâssé riche en lipides et une enveloppe périphérique, le péricarpe. Sa composition est similaire à celle du riz, avant et après blanchiment. Sa particularité réside en une richesse en soufre, en acides aminés soufrés, notamment la méthionine, et en acides aminés insulino sécréteurs, comparé aux autres céréales locales, qui pourrait expliquer en partie le rôle joué par le fonio dans l'alimentation des diabétiques en Afrique de l'Ouest. Ces résultats, déjà mentionnés pour certains dans la littérature, mériteraient d'être validés statistiquement sur un plus grand nombre d'échantillons.

Après avoir pris connaissance des technologies traditionnelles de transformation et mis au point des protocoles d'analyse de la qualité spécifique au fonio, nous avons participé aux différents essais d'équipements existants. Nous avons suivi la mise au point du décortiqueur-blanchisseur GMBF réalisé dans le cadre du projet. Nous avons montré qu'il décortique le fonio souvent mieux que le font les femmes au pilon, avec un rendement proche, peu de brisures, peu de grains paddy restants. Le grain blanchi est bien dégermé et gonfle bien pendant la cuisson avec une consistance moelleuse, comme le produit traditionnel. Il a été testé par plusieurs transformatrices qui ont été très satisfaites de ses performances et qui maintenant ne veulent plus piler. Elles considèrent que cette machine allége considérablement la pénibilité de leur travail. Malgré quelques problèmes d'usure en cours de résolution, cette machine est actuellement fabriquée au Mali par la société IMAF.

Notre participation aux essais multilocaux mis en place dans les trois pays partenaires ne nous a pas permis de distinguer une variété aux propriétés organoleptiques particulières. La variété Fonhon présente semble-t-il une aptitude au blanchiment supérieure aux autres, étant entendu que seules 6 variétés ont été cultivées sur uniquement 2 lieux. L'aptitude au blanchiment et le comportement à la cuisson des grains dépendraient essentiellement du lieu de culture du fonio et notamment des conditions climatiques qui donneraient des grains plus durs, plus cassants et moins gonflés après cuisson, notamment lorsque la pluviométrie est réduite. Ces résultats mériteraient là encore d'être confirmés sur un plus grand nombre de variétés et d'essais.

Références bibliographiques

1. **Portères R.** 1955. Les céréales mineures du genre Digitaria en Afrique et en Europe. *Journal d'Agriculture Tropicale et de Botanique Appliquée.* 2 : 349-386, 477-510, 620-675.
2. **Jideani I.A.** 1990. Acha, *Digitaria exilis*, the neglected cereal. *Agriculture International*, 42, 132-134+143.
3. **Borlaug N.E., Axtell J., Burton G.W., Harlan J.R., Rachie K.O.** 1996. Fonio in *Lost crops of Africa.* Volume 1: Grains. National Research Council. National Academy Press, Washinton,D.C. 59-75
4. **Cruz J.F.** 2001. Le fonio. CIRAD. Département de Cultures Annuelles. Montpellier. France. 24 p.
5. **Fliedel G., Berthé A., Ouattara L.** 2001. Analyse des caractéristiques technologiques du fonio. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio.* CIRAD. France. 25p
6. **Konkobo-Yaméogo C., Chaloub Y., Kergna A., Bricas N., Karimou R., Ndiaye J.L.** La consommation urbaine d'une céréale traditionnelle en Afrique de l'Ouest : le fonio. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures*. 2004, 13, 1, 125-128.
7. **Dramé D., Boré F., Koncobo-Yaméogo C., Chaloub Y., Fliedel G., Cruz J.F.** 2004. Recettes culinaires à base de fonio. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio*. 35 p.
8. **Fliedel G., Dramé D.** 2002. Protocoles de caractérisation de la qualité du fonio. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio.* 17 p.
9. **Cruz J.F., Dramé D., Diallo T., Son G.** 2004. Rapport annuel n°8/04. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio.* 64 p.
10. **Dramé D., Berthé A. Cissé O. T., Kergna A.O., Dembélé K., Rico V., Cruz J.F.** 2000. Rapport annuel. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio.* IER. Bamako. 21 p.
11. **Dramé D., Fliedel G.** 2004.Caractéristiques technologiques et culinaires du fonio – Analyse des variétés issues des essais multilocaux. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio.* 16 p.
12. **Bui-Phong F.** 1998. Le fonio, une plante à part. Caractérisation technologique, physicochimique et histologique des grains de plusieurs variétés. CIRAD-CA. *Mémoire d'ingénieur de l'Institut de Sciences et Technologies de l'Université Pierre et Marie Curie*. 52 p.
13. **Fliedel G., Ouattara M., Grabulos J., Dramé D., Cruz J-F.** 2004. Effet du blanchiment mécanique sur la qualité technologique, culinaire et nutritionnelle du fonio, céréale d'Afrique de l'Ouest. *Atelier International : « Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles en Afrique de l'Ouest : le rôle des technologues alimentaires et des nutritionnistes »*, Ouagadougou, Burkina Faso, 23-28 novembre 2003. 17 p.
14. **Cruz J.F., Dramé D., Diallo T., Son G.** 2000. Rapport annuel n°2/00. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio.* 73 p.
15. **Ouattara M., Grabulos J., Fliedel G.** 2002. Blanchiment mécanique et traditionnel du fonio – Effet sur le comportement à la cuisson, comparaison variétale. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio.* 63 p.
16. **Besançon S.** 2000. Etude de la consommation du fonio dans le traitement du diabète sucré au Mali. *Projet CFC/IGG Amélioration des technologies post-récolte du fonio.* 78 p.
17. **De Lumen B.O., Thompson S., Odegard W.J.** 1993. Sulfur amino acid-rich proteins in acha (*Digitaria exilis*), a promising underutilized african cereal. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 41, 1045-1047.
18. **Mestres C., Matencio F., Pons B., Yajid M., Fliedel G.** 1996. A rapid method for the determination of amylose content by using differential scanning calorimetry. *Starch*. 48, 1, 2-6.

Annexe

Analyses chimiques et composition nutritionnelle des grains de fonio décortiqués et blanchis

Avant toute analyse chimique et nutritionnelle, les grains de fonio décortiqués et les grains de fonio blanchis mécaniquement ou traditionnellement ont été lavés et séchés (selon le protocole mentionné p. 4) puis broyés avec le broyeur à marteaux de laboratoire Perten. Il en a été de même pour les grains de sorgho, de mil, de maïs entiers ou décortiqués et pour les grains de riz blanchis.

La teneur en eau

La teneur en eau a été déterminée selon la norme NF V03.707, à partir de 5 g d'échantillon broyé, par pesée différentielle après passage à l'étuve à 130°C pendant 2 h.

La teneur en lipides

La teneur en lipides éthéro-solubles (ou lipides libres) a été déterminée, après dessiccation, par pesée des lipides extraits selon une méthode d'extraction de type Soxhlet qui utilise le distillateur Tecator Soxtec type HT. L'extraction des lipides se fait à 100°C par trempage de 5 g d'échantillon broyé dans de l'éther diéthylique, suivi d'un rinçage de l'échantillon à l'éther diéthylique et d'une évaporation de l'éther. La teneur en lipides est exprimée en pourcentage rapporté à la matière sèche.

La teneur en matières minérales

La matière minérale a été déterminée à partir de 2 g d'échantillon broyé, par pesée différentielle après calcination à 500°C pendant 2 h.

La teneur en différents éléments minéraux

La matière minérale obtenue précédemment contient les éléments minéraux sous forme d'oxydes ou de carbonates. La silice, qui est présente dans les végétaux et peut former des silicates insolubles ou retenir par adsorption les oligoéléments, est éliminée préalablement par de l'acide fluorhydrique qui forme à chaud du fluorure de silicium SiF_4 volatil. Les autres éléments minéraux tels que N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Cu, Mn, Cr sont alors dissous dans de l'acide chlorhydrique en vue de leur dosage par spectrométrie d'émission à plasma (ICP : Inductively Coupled Plasma). La teneur en éléments minéraux exprimée en % ou ppm par rapport à la matière sèche de l'échantillon a été calculée à partir de la concentration en élément dosé dans la solution selon la formule :

$$T = \frac{C \times V}{PE}$$

où

T = teneur en élément en % ou ppm par rapport à la matière sèche de l'échantillon
C = concentration, en élément dans la solution en mg/l
V = volume de la solution en ml (50 ml)
PE = prise d'essai de l'échantillon en g.

La teneur en protéines

La teneur en protéines a été calculée à partir de la teneur en azote total déterminée précédemment en utilisant le facteur de conversion 6,25.

Le dosage du soufre

Le soufre minéral et organique de 200 mg d'échantillon broyé a été oxydé en sulfate au cours de 2 h de minéralisation à 500°C par voie sèche en présence de nitrate de magnésium $Mg(NO_3)_2$. Il a ensuite été dissous dans de l'acide chlorhydrique avant d'être dosé. Le dosage du soufre total s'effectue par turbidimétrie après formation de sulfate de baryum en présence de chlorure de baryum $BaCl_2$ sur un colorimètre à flux continu à la longueur d'onde de 420 nm.

La teneur en sucres (mono et disaccharides)

Les sucres ont été extraits à partir d'1 g d'échantillon broyé par l'éthanol à 80 % à ébullition douce sous reflux, deux fois une heure. Le surnageant contenant les sucres a été récupéré après centrifugation puis l'éthanol évaporé au rotavapor à 45°C jusqu'à l'obtention de 15 à 20 ml d'extrait. L'extrait riche en sucres a été ajusté à 50 ml avec de l'eau pure.

Les sucres ont été ensuite dosés par chromatographie ionique par rapport à des solutions standards de glucose, fructose, saccharose, raffinose, maltose et stachyose en utilisant un gradient d'élution très basique. En effet, en milieu fortement basique (pH > 12), les sucres se comportent comme des acides faibles (pKa entre 12 et 14), sont ionisés et peuvent être séparés par échange d'anions en utilisant une colonne contenant une résine porteuse de groupements d'ammonium quaternaire. La détection se fait par ampérométrie basée sur la mesure du courant d'oxydation des sucres à un potentiel déterminé.
Les concentrations en sucres ont été calculées suivant la méthode d'intégration dite de l'étalon interne. Les résultats sont exprimés en mg/l de solution ou en pourcentage pondéral :

$$\frac{C \times V \times 100 \times dil}{Pe \times 1000 \times 1000}$$

C = concentration en mg/l
V = volume de la fiole jaugée utilisée (50 ml)
dil = facteur de dilution avant dosage chromatographique
Pe = prise d'essai en g.

La teneur en amidon

La teneur en amidon a été déterminée par méthode enzymatique. Une prise de 200 mg d'échantillon broyé est lavée pendant 20 min à température ambiante dans 50 ml d'éthanol à 40 % (v/v) puis rincée deux fois pour éliminer les sucres solubles et les produits solubles de dégradation de l'amidon. Le résidu obtenu par élimination du surnageant après centrifugation et qui contient l'amidon est dispersé dans de l'hydroxyde de potassium 1 N dans un bain marie à 60°C pendant 30 min pour une pré-hydrolyse puis, après neutralisation à l'acide acétique, il est hydrolysé en unités glucose avec de l'amyloglucosidase dans le bain marie à 60°C pendant 30 min. Le glucose libéré est dosé par chromatographie ionique par rapport à une solution standard de glucose selon le principe décrit ci-dessus. Le pourcentage d'amidon a été obtenu par la formule ci-dessous :

$$\%\ \text{amidon} = [\text{glucose}] \times \frac{vf \times 0{,}9 \times dil \times 5 \times 100}{1000 \times pe \times 1000}$$

[glucose] = concentration de glucose en mg/l
vf = volume de la fiole
0.9 = facteur de réaction de l'amidon en glucose
dil = facteur de dilution utilisé
5 = facteur de dilution dû à l'hydrolyse enzymatique
pe = masse en g de la prise d'essai

La teneur en amylose et les températures de gélatinisation

La teneur en amylose et les températures de gélatinisation ont été déterminées par Analyse Enthalpique Différentielle (A.E.D.) ou D.S.C. (Differential Scanning Calorimetry) avec un Perkin Elmer DSC 7 (Perkin Elmer, Norwalk, CT) en utilisant des capsules hermétiques en inox[17]. Son principe repose sur la mesure des différences d'enthalpie entre un échantillon et une référence soumis à une cinétique de chauffage et de refroidissement linéaires.

La capsule de l'échantillon (10-11 mg d'échantillon broyé dans 50 µl de L-α-lysophosphatidylcholine 2 %) et la capsule de référence (50 µl d'eau ultrapure) sont placées dans une enceinte adiabatique et soumis au cycle de chauffage refroidissement suivant : chauffage de 22°C à 160°C à 10°C / min, puis maintien à 160°C pendant 2 min et refroidissement jusqu'à 60°C à 10°C / min. A partir du thermographe enregistré, sont calculées :

- les températures de début, pic et fin de gélatinisation, déduites de la portion endothermique obtenue lors du chauffage entre 60 et 90°C
- l'aire du pic exothermique obtenu au cours du refroidissement entre 91 et 65°C, correspondant à la variation d'enthalpie associée à la formation d'un complexe entre l'amylose et le phospholipide ajouté. Cet exotherme est proportionnel à la teneur en amylose de l'échantillon qui est déterminée par comparaison à un témoin (100 % d'amylose pure de pomme de terre).

La quantité d'amylose (rapportée à la matière sèche) contenue dans l'échantillon est calculée en pourcentage de la variation d'enthalpie obtenue pour le standard d'amylose pure de pomme de terre analysé dans les mêmes conditions :

$$\text{Amylose (échantillon)} = \frac{\Delta H\,(\text{échantillon}) \times 100}{\Delta H\,(\text{amylose pomme de terre})}$$

ΔH (échantillon) = variation d'enthalpie de l'échantillon entre 91 et 65°C en J/g
ΔH (amylose pomme de terre) = variation moyenne d'enthalpie pour deux échantillons d'amylose pure de pomme de terre entre 91 et 65°C en J/g.

La teneur en fibres

Les constituants pariétaux ou résidu organique insoluble ont été obtenus, selon les méthodes préconisées par Van Soest, après traitements successifs au détergent neutre, au détergent acide et à l'acide sulfurique sur des prises d'échantillon broyé de 700 mg. Un prétraitement enzymatique à la Thermamyl, amylase thermosensible, 10 min à 100 °C et à la protéase, 15 min à 38°C é été effectué au préalable pour nos échantillons qui contiennent de l'amidon et des protéines.
Le premier traitement au détergent neutre ou NDS donne, après extraction à 100°C pendant une heure et lavages à l'eau bouillante et à l'acétone, une fraction insoluble qui, séchée à 105°C jusqu'à poids constant, représente la teneur en fibres totales insolubles (NDF) composées de la somme des hémicelluloses, celluloses et lignine.

Cette fraction est ensuite hydrolysée par une solution au détergent acide et après lavage, rinçage et séchage elle donne la teneur en fibres ligno-cellulosiques ou ADF. La différence entre NDF et ADF est une approximation des hémicelluloses.

Cette dernière fraction insoluble est traitée pendant 3 h par une solution d'acide sulfurique à 72 %. Le résidu est lavé, rincé, séché et minéralisé à 525°C. La pesée différentielle avant et après minéralisation donne la teneur en lignine ou ADL. La différence entre ADF et ADL est une approximation de la cellulose.

Les estimations des différentes fractions se font par différence entre la masse du résidu considéré et celle du résidu obtenu après minéralisation :

$$\% \text{ NDF} = \frac{P_1 - P_4}{P_0} \qquad \% \text{ ADF} = \frac{P_2 - P_4}{P_0} \qquad \% \text{ ADL} = \frac{P_3 - P_4}{P_0}$$

P_1 = résidu après traitement au détergent neutre
P_2 = résidu après traitement au détergent acide
P_3 = résidu après traitement à l'acide sulfurique
P_4 = résidu après minéralisation du résidu P_3.

La teneur en pentosanes totaux

Les pentosanes ont été extraits à partir de 100 mg de farine avec 5 ml d'acide sulfurique 2 N pendant 10 min dans un bain marie bouillant. Après centrifugation à 3000 t/min pendant 5 min, le surnageant est récupéré, filtré, dilué au 1/5 et dosé par spectrophotométrie à flux en comparaison avec une courbe étalon.

La teneur en pentosanes solubles

Les pentosanes solubles ont été extraits à partir de 1 g de farine avec 4 ml d'eau millipore à 20°C sous agitation rotative (30 t/min) pendant 15 min. Après centrifugation à 10 000 t/min pendant 15 min à 20°C, le surnageant est récupéré, filtré, dilué et dosé par spectrophotométrie à flux en comparaison avec une courbe étalon.

$$\% \text{ AX} = \frac{[\text{xylose}] \times 10^{-3} \times 0.88 \times D \times V \times 100}{P \times \% \text{ MS}}$$

[xylose] : valeur flux directe (µg/ml)
0.88 : facteur de polymérisation
D : facteur de dilution
V : volume d'extraction (ml)
P : pesée de l'échantillon (mg)
% MS : pourcentage de matière sèche du produit

La composition en acides gras

Après extraction des lipides de l'échantillon broyé avec de l'éther diéthylique et évaporation de celui-ci, 20 mg de lipides ont été additionnés de 4 ml de KOH et mis sous reflux pendant 1 h pour hydrolyse. Les acides gras ont ensuite été transformés en esters méthyliques avec du méthanol BF3 et récupérés avec du pentane avant analyse en chromatographie phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme.

La teneur en acides aminés

Après hydrolyse en présence d'acide méthano-sulfonique pendant 1 h à 150°C sous atmosphère contrôlée (vide, azote), la séparation des acides aminés a été effectuée par HPLC sur une colonne C18 avec une dérivatisation dobsyl et détection UV à 436 nm. Le standard interne utilisé est la carbocystéine.

La teneur en vitamines B1 et B2

4-5 g d'échantillon broyé ont été dispersés dans 50 ml d'H_2SO_4 et autoclavé à 120°C pendant 15 min. A près refroidissement, le pH a été ajusté à 4,5 avec de l'acétate de sodium et la solution complétée à 100 ml avec de l'eau déminéralisée, puis filtrée et homogénéisée. Pour la vitamine B2, le filtrat a été injecté dans une HPLC à détection fluorimétrique. Pour la vitamine B1, le filtrat a été additionné d'une solution oxydante, déposé sur une colonne C18, rincé et élué, avant injection dans l'HPLC à détection fluorimétrique.