2ème Atelier international / *2nd International Workshop*
Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles
Food-based approaches for a healthy nutrition
Ouagadougou, 23-28 / 11 / 2003

Effet du blanchiment mécanique sur la qualité technologique, culinaire et nutritionnelle du fonio, céréale d'Afrique de l'Ouest

Fliedel[1]* Geneviève, Ouattara[1] Maïmouna, Grabulos[1] Joël, Dramé[2] Djibril, Cruz[1] Jean-François

[1] CIRAD-CA, Programme Cultures Alimentaires, Equipe Qualité des Produits commercialisés, TA 70/16, 73 Avenue Jean-François Breton, 34398 Montpellier cedex 5, France.
[2] IER, Laboratoire de Technologie Alimentaire, BP 258, Bamako, Mali.

*Auteur correspondant: *genevieve.fliedel@cirad.fr*

- Résumé -

Le fonio, céréale à grains minuscules et vêtus, est encore de nos jours transformé traditionnellement et consommé le plus souvent sous forme de couscous accompagné d'une sauce. Les critères de qualité recherchés par les consommateurs sont la blancheur du grain, le gonflement et la consistance moelleuse. La mécanisation des opérations post-récolte, notamment le décorticage-blanchiment, peut entraîner des différences de qualités technologique, culinaire et nutritionnelle du fonio blanchi.
Dans le cadre d'un projet financé par le Common Fund for Commodities (CFC) en Guinée, au Mali et au Burkina Faso, l'effet du blanchiment mécanique sur la qualité du blanchiment et le comportement à la cuisson du fonio cuit, a été étudié et comparé à un blanchiment traditionnel au pilon. Plusieurs protocoles d'analyse de la qualité ont été développés au niveau du laboratoire.
Le décortiqueur GMBF, développé dans le cadre du projet, dégerme le grain aussi bien que le pilon: la teneur en lipides du fonio blanchi est respectivement de 1 % m.s. et 0,9 % m.s. Le taux de brisures est même plus faible (0,3 % au GMBF au lieu de 1,9 %). Le taux de gonflement des grains après cuisson est plus élevé après blanchiment au GMBF ou au pilon (182 et 173 g d'eau pour 100 g de fonio cuit b.s.) avec une consistance plus moelleuse (forces d'extrusion plus basses: 38,8 et 42,5 kgf) que pour un produit issu d'un décortiqueur de type abrasif (137 g d'eau pour 100 g et 52 kgf). Le décortiqueur GMBF permet de décortiquer et blanchir le fonio avec des caractéristiques physico-chimiques et culinaires du grain proches de celles du fonio blanchi traditionnellement, ce qui n'est pas le cas d'autres décortiqueurs présents sur le marché.
La valeur nutritionnelle du fonio blanchi est proche de celle d'un riz blanc avec toutefois une teneur plus élevée en soufre et en zinc, même après lavage des grains et élimination totale du sable.
A taux de blanchiment équivalents, des différences de qualité technologique et culinaire ont pu être relevées entre les variétés. La variété Siragué, en provenance de Guinée, qui est l'une des plus appréciées par les consommateurs, se détache des autres avec une capacité de gonflement plus élevée et une consistance plus moelleuse.

Mots-clés: Céréale – Fonio – Qualité technologique – Qualité culinaire – Valeur nutritionnelle.

- Abstract -

Effect of mechanical milling on technological properties, cooking quality and nutritional value of fonio, a West African cereal

Fonio, a cereal from West Africa with tiny and paddy grains, is still nowadays traditionally processed and most often consumed as a couscous accompanied with a sauce. Quality criteria requested by consumers are whiteness, swelling power and soft consistency of cooked grain. The mechanisation of post-harvest operations, mainly dehusking and milling, may induce differences in technological, cooking and nutritional qualities of milled fonio.

During a project funded by CFC (Common Funds for Commodities) in Guinea, Mali and Burkina Faso, we have studied the effect of the mechanical dehulling on milling and cooking properties of fonio, compared to the traditional pounding. Several analytical procedures were developed at the laboratory level on fonio quality.

The GMBF dehuller, developed during the project, removes the germ as well as by pounding: lipid content of milled fonio is respectively of 1% d.b. and 0.9% d.b. Percentage of brokens is lower (0.3% with GMBF and 1.9%). Swelling power of cooked grains is higher when fonio is milled traditionally and by using GMBF (173 and 182 g of water for 100 g of cooked fonio d.b.) with a softer consistency (lower extrusion forces: 42.5 and 38.8 kgf) than for a product milled with an abrasive dehuller (137 g of water for 100 g d.b. and 52 kgf). GMBF can dehusk and mill fonio with physicochemical and cooking grain characteristics similar to those of a traditionally milled fonio.

Nutritive value of milled fonio is closed to that of milled rice with however a higher content of sulphur and zinc even after washing the grain and removing all the sand.

Differences of technological and cooking qualities were noticed among the varieties analysed, with an equivalent whiteness. The variety Sirague from Guinea, which is one of the most liked by consumers, is far from the others with a higher swelling power and a softer consistency.

Key words: Cereal – Fonio – Technological properties – Cooking quality – Nutritional value.

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 fait 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]. Les principaux pays producteurs sont: la Guinée, le Nigeria, le Mali, le Burkina Faso et la Côte d'Ivoire. Aujourd'hui délaissé au profit des autres céréales locales, il doit son abandon à une pénibilité de transformation et de préparation lente et laborieuse, due 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 d'un produit prêt à l'emploi en milieu urbain, des initiatives de mise en place d'unités de production semi-artisanale peu mécanisée ont émergé depuis peu. Parallèlement, des initiatives de conceptions de petits équipements (essentiellement pour le décorticage) ont vu le jour. Par contre, les quelques essais de semi-industrialisation des opérations de décorticage et de pré-cuisson se sont révélés infructueux.

Dans le cadre de la promotion des céréales en Afrique de l'Ouest, le Common Fund for Commodities (CFC) a financé des travaux portant sur l'amélioration des technologies post-récolte du fonio. Ce projet régional, qui a démarré en 1999, est supervisé par la FAO et regroupe les Instituts de Recherche nationaux du Mali (IER), de la Guinée (IRAG) du Burkina Faso (IRSAT) et le CIRAD, qui en est le maître d'œuvre. L'objectif principal de ce projet est de mécaniser toutes les 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;
- de diminuer les coûts de transformation.

Pour atteindre ces objectifs quatre équipes de chercheurs ont été impliquées au CIRAD et dans les trois pays concernés:

- des machinistes pour mettre au point des équipements adaptés aux besoins des petites entreprises ou des groupements villageois;
- des technologues pour étudier la qualité des produits issus des machines;
- des socio-économistes pour réaliser les enquêtes de consommation et des études de marché afin de promouvoir cette céréale;
- des sélectionneurs pour cataloguer les principales variétés.

Objectif de l'étude

Selon les enquêtes de consommation réalisées, les premiers critères de qualité portent sur la blancheur, l'absence de sable, le gonflement à la cuisson et la consistance moelleuse du grain. Il est essentiel que le produit issu des techniques modernes ait au moins les mêmes qualités technologiques, organoleptiques et nutritionnelles que le fonio existant sur les marchés locaux.
L'objectif de cette étude est donc de:

- 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.

Démarche suivie

La démarche suivie par les technologues a été la suivante:
- mieux connaître la céréale fonio;
- étudier les technologies traditionnelles de transformation;
- mettre au point des protocoles d'analyse de la qualité des produits;
- analyser la qualité technologique et culinaire des fonios blanchis traditionnellement et des fonios issus des 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.

Morphologie du grain

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). Le grain paddy est ovoïde, de très petite taille: 1,5 mm de longueur, 0,9 mm de largeur et le poids de 1000 grains est en moyenne de 0,5 g. Les balles représentent 20-25 % du poids du grain. Le caryopse (grain décortiqué) mesure 1 mm de long et 0,7 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).

Des études histologiques ont montré 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[4].

Décorticage et blanchiment traditionnels des grains de fonio

Après le battage, réalisé sur des nattes, des bâches en plastique ou à même le sol, les grains sont séchés au soleil puis stockés dans des greniers en attendant d'être transformés[5].

Les opérations traditionnelles de transformation du fonio paddy en fonio blanchi effectuées par les femmes[6] démarrent en général par un nettoyage grossier des grains paddy à l'aide de deux tamis successifs: le premier d'environ 2mm est utilisé pour enlever les grosses particules (pailles, autres grains...) et le deuxième d'environ 1mm 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'affilée. 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 puis séché et vendu.

Modes de consommation

Le fonio blanchi lavé est traditionnellement cuit trois fois à la vapeur, puis consommé avec une sauce légume, sauce arachide ou sauce gombo. C'est le *foyo* ou couscous de fonio.

Depuis quelques années, certaines transformatrices produisent du fonio précuit, vendu en sachets de 500g ou 1kg 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 par deux cuissons à la vapeur et consommé comme le *foyo* accompagné d'une sauce.

Le fonio peut être aussi consommé selon d'autres recettes:

- 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);
- le *déguè* de fonio (farine de fonio blanchi roulée sous forme de gros granules précuits, trempés dans de l'eau bouillante) qui peut être délayé dans du lait et consommé au cours du petit déjeuner ou encore sous forme de gâteaux ou beignets.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel végétal

L'étude a été faite sur des fonios en provenance du Mali et de la Guinée:

- deux types de fonio paddy: l'un récolté en l'an 2000 et acheté sur un des marchés de Bamako au Mali (Bamako 2000), l'autre en provenance de la région de Koutiala au Mali et récolté dans le village de Fingoloni en 2001 (Fingoloni 2001);
- deux types de fonio blanchis à partir du paddy Fingoloni 2001, l'un traditionnellement par Mme Soumaré, une transformatrice de Bamako au Mali et l'autre au décortiqueur–blanchisseur GMBF (Guinée-Mali-Burkina-France) développé dans le cadre du projet;
- cinq variétés originaires de Guinée produites en 2001: *Kenselen, Siragué, Bolefendé, Mbalia* et *Rané;*
- un échantillon de sorgho, de mil, de maïs grains entiers et de riz blanchi achetés sur un marché à Bamako, Mali. Le sorgho, le mil et le maïs ont ensuite été décortiqués au pilon.

Préparation et analyse technologique des échantillons de fonio au laboratoire

Tous ces protocoles d'analyse ont été développés dans le cadre du projet CFC.

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 200LS, utilisé pour les quantités inférieures à 1kg, permet un triage aérodynamique des particules. 100g de fonio sont tamisés 2min sur un tamis de 1000µm pour séparer les grosses particules, le passant est récupéré et tamisé sur un tamis de 710µm qui laisse passer les fines impuretés;
- le nettoyeur-calibreur Tripette et Renaud NSL2000, utilisé pour les quantités supérieures à 1kg, fonctionne en continu. Il est constitué de deux tamis superposés vibrants (tamis supérieur de 1,5mm et tamis inférieur de 1mm) couplés à un système de ventilation (réglée au minimum pour le fonio) et un cyclone.

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. 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 200g. 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'1g 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 initial après décorticage.

Le blanchiment des grains décortiqués

Les grains décortiqués ont été blanchis avec un blanchisseur de laboratoire Sataké habituellement 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'une meule abrasive tournant autour d'un axe horizontal dans une cage perforée constituée d'un grillage fin adapté à la taille du fonio. Un blanchiment optimal a été obtenu avec 80g de grains abrasés pendant 1min15 à la vitesse maximale.

Analyse de la qualité du fonio blanchi

Après blanchiment, le produit est tamisé manuellement avec un tamis de 400µm pour éliminer les sons puis avec un tamis de 500µm pour séparer les brisures:

- le taux de brisures correspond à la quantité de brisures récupérées 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 (entiers et brisures) par rapport à celle des grains décortiqués pesés au départ.

Le lavage des grains

Avant cuisson ou analyse biochimique, les grains blanchis ou décortiqués sont séparés des sons, poussières ou sable encore présents par un lavage à l'eau distillée en deux étapes selon la méthode traditionnelle. Les grains sont ensuite étalés sur une serviette et mis à sécher sur la paillasse à 20-25°C pendant 48h jusqu'à ce que leur teneur en eau avoisine 12%.

La cuisson du fonio blanchi

60g de fonio blanchi, lavé et séché sont préalablement réhydratés avec 18ml d'eau millipore et laissés reposés 10min dans une barquette avant d'être cuits trois fois à la vapeur pendant respectivement 10, 12 et 10min. Les cuissons sont réalisées dans un couscoussier contenant 1,5l d'eau désionisée portée à ébullition sur une plaque chauffante à 300°C. Entre chaque cuisson, les grains sont émottés, puis réhydratés avec 18ml d'eau millipore. Deux essais de cuisson sont effectués par échantillon.

La qualité culinaire du fonio cuit a été déterminée en évaluant:

- *la capacité de gonflement du fonio en cours de cuisson*: par dessiccation d'environ 3g de fonio cuit dans une étuve à 100°C pendant 24h. Le gonflement est exprimé en g d'eau absorbée pendant la cuisson pour 100g de fonio cuit sec.
- *la consistance du fonio cuit*: qui est mesurée à l'INSTRON (type 4300) en effectuant des tests d'extrusion avec une cellule d'Ottawa (modèle réduit de 7,5cm^2 de surface d'extrusion) munie d'une grille dont les trous ont 2mm de diamètre. Une heure après cuisson, le fonio maintenu à 35°C dans une étuve, est rapidement transféré dans la cellule d'extrusion. Au fur et à mesure de la descente du piston à la vitesse de 100 mm/min, le capteur de force enregistre une force de résistance à la compression qui augmente jusqu'à un palier d'extrusion. 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.

Analyses chimiques des grains décortiqués et blanchis

Les teneurs en eau, en lipides, en protéines (Nx6,25) et en matières minérales ont été déterminées selon les normes françaises ou européennes en vigueur (NF V 03-707, NF V 03-050, NF V 03-610, NF V 03-720 respectivement).

Le dosage des éléments minéraux a été effectué par spectrométrie d'émission à plasma sauf celui du soufre, effectué par turbidimétrie après formation de sulfate de baryum sur un colorimètre à flux continu à 420nm.

Les acides gras transformés en esters méthyliques ont été dosés par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme.

Les acides aminés, après hydrolyse en présence d'acide méthano-sulfonique, ont été séparés par HPLC sur une colonne C18 avec une dérivatisation dobsyl et détection UV à 436nm.

Les teneurs en vitamines B1 et B2 ont été déterminées par HPLC à détection fluorimétrique.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Caractérisation technologique et biochimique du fonio blanchi traditionnellement

Afin de mieux apprécier la qualité des produits traditionnels présents sur les marchés, 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 (tableau 1). 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 contient 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 et bien blanchi par les femmes.

Ainsi les décortiqueurs-blanchisseurs adaptés ou développés pour le fonio devront donner un produit blanchi ayant des caractéristiques proches de celles de ces produits traditionnels pour pouvoir être acceptés par les transformatrices et les consommateurs; ils devront notamment donner un grain propre, avec très peu de paddy, bien blanchi sans pour autant être trop usé, pour une meilleure qualité nutritionnelle et un meilleur rendement.

Tableau 1: Caractérisations technologiques et biochimiques de divers échantillons de fonio blanchis traditionnellement.

Provenance	Echantillon de fonio	Grosses impuretés (%> 900 µm)	Quantité de grains paddy (en %)	Taux de cailloux, sable (en %)	Teneur en lipides (% m.s.)	Teneur en cendres (% m.s.)	Teneur en protéines (% m.s.)
Mme Soumaré Bamako Mali	Blanchi, lavé, précuit	< 0,1	0,06	Trace	0,3	0,3	7,7
Mme Soumaré Bamako Mali	Blanchi, lavé	0,1	0,03	Trace	0,8	0,3	7,8
UCODAL Bamako - Mali	Blanchi, lavé, précuit	< 0,1	0,1	Trace	0,2	0,2	7,4
UCODAL Bamako - Mali	Blanchi, lavé	0,1	0,3	Trace	0,6	0,2	7,7
Femmes du Fleuve Bamako Mali	Blanchi, lavé	0,2	0,5	1,8	0,8	0,3	7,7
ENT.RE.C.E.F - Orodara - Burkina	Blanchi, lavé	< 0,1	1,1	Trace	1,2	0,4	8,5
TOME (grpt de femmes) Ouagadougou - Burkina	Blanchi, lavé	< 0,1	0,04	Trace	0,9	0,2	9,4
LANAYA BoboDioulasso - Burkina	Blanchi, lavé	< 0,1	0,4	Trace	0,7	0,5	7,5
X Burkina	Blanchi, lavé	< 0,1	0,2	Trace	0,6	0,4	8,4
Marché des céréales Bamako - Mali	Blanchi, non lavé	0,7	1,6	1,9	1,8	0,5	9,7

Analyse de la qualité technologique des produits issus de divers décortiqueurs–blanchisseurs mécaniques

Au début du projet les équipements de décorticage existants ont été testés dans les trois pays; la plupart sont déjà utilisés pour décortiquer le riz, le sorgho, le mil, le maïs et certains, peu nombreux, spécifiquement utilisés sur le fonio (décortiqueur «Sanoussi», 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). Le tableau 2 en donne quelques exemples.

Tableau 2: Performance de quelques décortiqueurs-blanchisseurs testés.

Machines	Principe & Fonctionnement	Débit Opération kg/h	Rendement %	Paddy résiduel %	Taux de brisures %	Teneur en lipides % m.s.	Teneur en cendres % m.s.
Décortiqueur Nuhull	Abrasif Continu	40	52,8	4,3		1,3	0,66
Décortiqueur Mini-PRL	Abrasif Semi-continu	32	62,7	8,0	10	1,2	0,50
Décortiqueur Sanoussi	Friction Discontinue (par lots)	20	61,4	50,0	17	2,0	0,77
Décortiqueur « Galama »	Friction Continue	20	70,0	6,0	3	1,3	0,63
Décortiqueur GMBF(essai 1)	Friction Continue	114	71,6	0,4	2,2	1,0	0,40
Décortiqueur GMBF(essai 2)	Friction Continue	118	66,4	0,2	5	0,9	0,40
Décorticage manuel	Friction Discontinue	1 à 3	60 à 68	0,1 à 1	2 à 5	0,7 à 1,2	0,3 à 0,5

Les résultats montrent que la plupart des décortiqueurs testés ont un débit trop faible (inférieur à 50kg/h) pour répondre aux besoins des transformateurs. Pour des rendements de décorticage-blanchiment proches des rendements traditionnels (60-68%), aucun de ces décortiqueurs ne décortique bien le grain puisqu'un taux de paddy excessif (supérieur à 4%) a été trouvé dans les produits. Par ailleurs, la plupart de ces décortiqueurs ne dégerment pas le grain au cours du décorticage (teneur en lipides de plus de 1,2% m.s.) et brisent beaucoup plus que le pilon (plus de 10% de brisures) même s'ils arrivent à blanchir les grains décortiqués (teneur en matières minérales évaluée après lavage des grains qui élimine la majorité des paddy présents). 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.

Un prototype de type Engelberg adapté aux dimensions et aux particularités du grain de fonio a ainsi été développé. Il est le fruit d'une étroite collaboration entre les quatre partenaires. Les solutions techniques répondent aux deux contraintes majeures de ce matériel: la précision dimensionnelle de fabrication imposée par la petite taille des grains de fonio et la possibilité de le construire dans les ateliers ouest africains.

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. La masse de grains qui tombe par gravité de la trémie d'alimentation est mise en pression par la rotation du rotor nervuré. Lors de leur progression dans la chambre de décorticage, 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. La friction doit être suffisante pour décortiquer et blanchir le fonio sans provoquer un échauffement excessif ou générer trop de brisures. 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 sont intéressantes tant en matière de débit (supérieur à 110kg/h), qu'en terme de rendement au décorticage (66-72%) et de qualité de décorticage: 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.

Comparaison du blanchiment mécanique au décortiqueur GMBF et du blanchiment traditionnel

Qualité technologique et culinaire

Il s'agissait de vérifier à partir du fonio paddy Fingoloni si le grain blanchi au décortiqueur-blanchisseur GMBF était comparable au fonio blanchi traditionnellement non seulement au point de vue qualité de blanchiment mais aussi au point de vue qualité culinaire. Tous ces résultats ont été comparés à ceux obtenus avec le même grain blanchi au laboratoire avec le blanchisseur Sataké (tableau 3).

Tableau 3: 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

Les taux de brisures du fonio blanchi mécaniquement, aussi bien à la GMBF qu'au Sataké, sont équivalents et voisins de 0,3%. Par contre, les cinq pilages traditionnellement effectués pour bien blanchir le fonio, brisent davantage les grains. La teneur en lipides est plus basse dans le fonio blanchi traditionnellement et à la GMBF, respectivement 0,9 et 1% m.s., que dans celui blanchi par abrasion au laboratoire. Pour ces deux produits, les taux de gonflement des grains après cuisson sont plus élevés avec des forces d'extrusion plus basses par rapport au produit du laboratoire. 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.

Il est intéressant de noter que la machine GMBF qui utilise le système de friction arrive à bien dégermer le fonio avec des caractéristiques de blanchiment et culinaires

proches de celles du produit traditionnel. 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.

Qualité nutritionnelle du fonio

La composition biochimique du fonio décortiqué et du fonio blanchi au pilon ou à la GMBF (les mêmes valeurs, à quelques points près, ont été obtenues au niveau de ces deux derniers) a été comparée à celle d'un échantillon de sorgho, de mil, de maïs et de riz achetés sur un marché local puis décortiqués ou blanchis (tableau 4).

Le grain de fonio décortiqué contient moins de protéines, moins de matières minérales que les autres céréales et autant de lipides que le sorgho (mais moins que le maïs ou le mil).

Des travaux précédents[6] avaient montré que le grain entier contient 68% m.s. d'amidon, 1% m.s. de sucres et 6,5-8,5% m.s. de fibres totales. Les sucres présents sont principalement le saccharose (2 fois moins que chez le sorgho), suivi du raffinose, du glucose et du fructose.

Après blanchiment, le grain est «enrichi» en glucides et appauvri en tous les autres constituants: il ne contient plus que 7-9% de protéines, 0,8-1% de lipides, 0,3-0,6% de matières minérales. Sa composition est tout à fait comparable à celle d'un riz blanc (tableau 4).

Les travaux précédents[6] ont montré que le fonio blanchi contient 70-93% m.s. d'amidon, 4-7% de fibres et 0,06% de sucres (le seul sucre présent est le glucose). Les pentosanes totaux sont en quantité négligeable (0,2-0,1%) par rapport aux 1,1% présents chez le sorgho ou le mil décortiqué et ne peuvent expliquer l'éventuel effet bénéfique de la consommation de fonio pour les diabétiques, c'est-à-dire un index glycémique plus faible qu'avec les autres céréales et une réponse post-prandiale plus étalée dans le temps en raison d'une assimilation en sucres plus lente[6].

Tableau 4: 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	3,3 –3,8	0,8 – 1	1 – 1,1	0,3 – 0,6	84 - 86	89 - 91
Sorgho	11	10	3,5	1,2	1,2	0,5	84	88
Mil	12	11	4	1,2	1,2	0,8	83	87
Maïs	11	10	4,5	1	1,3	1	83	88
Riz	nd*	8	nd	0,9	nd	0,5	nd	90

**nd: non déterminé.*

- Eléments minéraux

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 (tableau 5). Après le blanchiment du fonio et du riz ou le 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 à 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 et en magnésium, en zinc et en manganèse, le maïs en phosphore et le mil en potassium. Après blanchiment, le fonio reste le plus riche en soufre, et en zinc avec le mil. Ces résultats confirment ceux trouvés précédemment[6] avec d'autres échantillons de fonio, de sorgho et de mil mais mériteraient d'être validés statistiquement sur un plus grand nombre d'échantillons.

Tableau 5: Composition en éléments minéraux d'un échantillon de fonio décortiqué et blanchi en comparaison à celle d'un échantillon de sorgho, de maïs, de mil et de riz en provenance du Mali.

	Matières minérales % m.s.	P % ms	K % ms	S % ms	Mg % ms	Ca % ms	Na ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm	Cu ppm
Fonio Fingoloni décortiqué	1,02	0,25	0,17	0,16	0,13	0,022	72,3	38,8	33,4	21,6	6,8
Fonio *Fingoloni* blanchi pilon	0,29	0,06	0,02	0,16	0,03	0,012	58,5	27,3	21,8	4,9	3,0
Fonio *Fingoloni* blanchi GMBF	0,37	0,07	0,03	0,15	0,04	0,013	72,6	25,0	21,4	5,8	2,6
Sorgho *Wassa* entier	1,13	0,25	0,25	0,13	0,13	0,014	58,7	94,6	32,6	20,9	6,2
Sorgho *Wassa* décortiqué	0,46	0,12	0,10	0,11	0,06	0,008	53,5	65,0	13,2	8,5	2,1
Maïs *Tiémantié* entier	1,28	0,34	0,33	0,12	0,12	0,012	67,0	33,4	28,7	9,4	2,2
Maïs *Tiémantié* décortiqué	0,18	0,09	0,08	0,12	0,03	0,007	32,7	18,9	7,4	2,5	1,5
Mil *Sanio* entier	1,16	0,23	0,34	0,12	0,11	0,017	102,6	82,5	33,1	13,0	4,9
Mil *Sanio* décortiqué	0,78	0,16	0,20	0,10	0,08	0,014	82,0	59,8	28,5	8,2	3,8
Riz *Gambiaca* blanchi	0,51	0,06	0,03	0,08	0,01	0,012	59,1	23,4	18,6	12,2	1,8

- Acides gras

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 4 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 (tableau 6).

Tableau 6: Composition en acides gras d'un échantillon de fonio décortiqué et blanchi en comparaison à un échantillon de sorgho, de maïs, de mil et de riz en provenance du Mali.

Acides gras (%)	Fonio *Fingoloni* décortiqué	Fonio *Fingoloni* blanchi pilon	Fonio *Fingoloni* blanchi GMBF	Sorgho *Wassa* décortiqué	Maïs *Tiemanté* décortiqué	Mil *Sanio* décortiqué	Riz *Gambiaca* blanchi
C14:0 acide myristique	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9
C16:0 acide palmitique	16,8	18,8	19,2	16,7	15,9	17,9	23,9
C16:1 acide palmitoléique	0,3	0,3	0,3	0,6	0,1	0,2	0,2
C18:0 acide stéarique	4,1	4,4	4,5	2	2,7	5,4	2,6
C18:1 acide oléique	30,6	31,3	33,1	36,9	29,3	25,3	28,9
C18:2 acide linoléique	45,7	43	40,4	41,9	49,7	47,6	40,9
C18:3 acide linolénique	0,8	0,7	0,6	1	0,9	2,4	1,6
C20:0 acide arachidique	1,1	1,2	1,2	0,4	0,7	1	0,8
C22:0 acide béhénique	0,4	<0,1	0,4	0,2	0,3	0,2	<0,1

- Vitamines

Le grain de fonio décortiqué contient surtout de la vitamine B1 (tableau 7). Après un blanchiment qui dégerme bien le grain, ce taux chute considérablement tout comme pour le riz alors que le mil, le sorgho et le maïs en conserve un tout petit peu plus après décorticage au pilon.

Tableau 7: Composition en vitamines B d'un échantillon de fonio décortiqué et blanchi en comparaison à un échantillon de sorgho, de maïs, de mil et de riz en provenance du Mali.

Vitamines B (mg / 100 g m.s.)	Fonio *Fingoloni* décortiqué	Fonio *Fingoloni* blanchi pilon	Fonio *Fingoloni* blanchi GMBF	Sorgho *Wassa* décortiqué	Maïs *Tiemanté* décortiqué	Mil *Sanio* décortiqué	Riz *Gambiaca* blanchi
Vitamine B1 (Thaiamine)	0,48	0,06	0,06	0,17	0,10	0,22	0,06
Vitamine B2 (Riboflavine)	0,05	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,05	<0,02

- Acides aminés

La composition en acides aminés apparaît équilibrée mis à part une déficience en lysine comme pour toutes les autres céréales (tableau 8). Il faut noter cependant que cette céréale, même après blanchiment, est plus riche en acides aminés soufrés que les autres, notamment en méthionine (pratiquement 2 fois plus riche que le mil ou le maïs et 3 fois plus que le riz). Cette richesse en acides aminés soufrés avait déjà été soulignée dans la littérature[7]. 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 cholestérols 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) que le riz blanchi ou le mil décortiqué mais moins que le sorgho ou le maïs. Cependant, même en quantité moindre, ces acides aminés devraient être plus biodisponibles et être bénéfiques pour les consommateurs diabétiques.

Tableau 8: Composition en acides aminés d'un échantillon de fonio décortiqué et blanchi en comparaison à un échantillon de sorgho de maïs, de mil et de riz en provenance du Mali.

Acides aminés % m.s.	Fonio *Fingoloni* décortiqué	Fonio *Fingoloni* blanchi pilon	Fonio *Fingoloni* blanchi GMBF	Sorgho *Wassa* décortiqué	Maïs *Tiemanté* décortiqué	Mil *Sanio* décortiqué	Riz *Gambiaca* blanchi
acide aspartique + asparagine	0,68	0,59	0,58	1,02	0,62	0,73	0,74
acide glutamique + glutamine	2,16	2,39	2,33	3,48	2,25	1,27	1,35
sérine	0,49	0,49	0,48	0,59	0,47	0,37	0,35
thréonine	0,34	0,34	0,33	0,41	0,33	0,11	0,23
glycine	0,08	0,04	0,05	0,07	0,07	0,12	0,11
alanine	1,24	0,98	0,94	1,48	1,29	1,15	1,32
arginine	0,93	1,04	1,00	1,50	0,80	0,63	0,44
proline	0,51	0,58	0,56	1,12	0,88	0,59	0,27
valine	0,52	0,54	0,52	0,68	0,48	0,49	0,43
méthionine	0,34	0,36	0,42	0,24	0,22	0,23	0,15
isoleucine	0,28	0,31	0,29	0,45	0,27	0,28	0,23
leucine	0,91	1,04	1,00	1,98	1,34	0,76	0,56
tryptophane	0,16	0,16	0,13	0,15	0,04	0,11	0,11
phénylalanine	0,47	0,52	0,52	0,68	0,47	0,39	0,35
cystéine	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,04	0,05
lysine	0,19	0,13	0,12	0,14	0,15	0,16	0,21
histidine	0,17	0,18	0,16	0,28	0,26	0,18	0,15
tyrosine	0,23	0,24	0,27	0,38	0,27	0,19	0,21

Comparaison variétale

Cette étude a consisté à comparer l'aptitude au blanchiment et le comportement à la cuisson après blanchiment mécanique de deux types de fonio paddy du Mali et de différentes variétés originaires de Guinée (tableau 9). En raison des petites quantités de grains disponibles pour chacune des variétés, le décorticage et le blanchiment ont été faits dans les mêmes conditions au laboratoire avec le décortiqueur et le blanchisseur Sataké.

La variété *Bolefendé* semble plus dure que les autres avec une usure plus faible et moins de brisures; elle est plus proche des deux vracs maliens. Par contre, la variété *Siragué* a les taux d'usure et de brisures les plus élevés; elle paraît être la plus tendre.

A des taux d'usure, de cendres et de lipides équivalents, il se dégage des différences variétales au point de vue qualité culinaire. La variété *Siragué* et le fonio paddy

Fingoloni 2001 se détachent des autres fonio. La première par une capacité de gonflement plus élevée et une consistance plus moelleuse et le second par une faible capacité de gonflement et une texture plus ferme. Les autres variétés et le fonio paddy Bamako 2000 ont des taux de gonflement variant de 151,7 à 166,7g d'eau/100g avec des forces moyennes de l'ordre de 38kgf. Ces résultats sont confirmés par l'analyse de variance qui montre 4 et 5 groupes homogènes avec le test de Newman–Keuls pour le gonflement et la consistance du fonio cuit respectivement.

Cette variété *Siragué* qui se différencie des autres est celle qui est justement l'une des plus appréciées par les consommateurs guinéens. Des essais multilocaux ont été menés en 2002 dans les trois pays du projet avec 12 variétés sélectionnées par les agronomes pour leur bonne qualité agronomique (rendement, cycle végétatif) dans le but d'identifier la variété la plus adaptée à la transformation mécanique et qui répond aux critères de qualité culinaire. Là encore, la variété *Siragué* retenue parmi les 12, s'est détachée des autres par ses propriétés de gonflement et de moelleux.

Tableau 9: Qualités technologiques et culinaires de différents types de fonio en provenance du Mali et de Guinée.

Variétés	Rendement au blanchiment (degré d'usure) (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% ms)	Teneur en matières minérales (% ms)	Gonflement* (g d'eau pour 100 g)	Force d'extrusion* (kgf)
Fonio Fingoloni	88,4 (11,6)	0,2	1,7	0,5	137,1 **d**	52,1 **b**
Fonio Bamako	87,9 (12,1)	0,4	1,5	0,5	162,7 **b c**	47,6 **a**
Kenselen	85,8 (14,2)	1,1	1,3	0,3	166,8 **b**	38,3 **d**
Siragué	84,1 (16)	1,6	1,2	0,4	182,4 **a**	31,4 **e**
Bolefendé	89 (11)	0,4	1,2	0,4	162,9 **b c**	41,3 **c**
Mbalia	86,6 (13,4)	0,2	1,4	0,6	156,5 **b c**	38,3 **d**
Ravé	84,7 (15,3)	0,5	1,1	0,4	151,7 **c**	38,4 **d**

** Les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.*

CONCLUSION

Le décortiqueur GMBF réalisé dans le cadre du projet CFC a été fabriqué au Mali par la société IMAF et est en cours d'expérimentation dans les trois pays partenaires. Il décortique le fonio aussi bien 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. Elles considèrent que cette machine devrait alléger considérablement la pénibilité de leur travail. Malgré quelques problèmes d'usure en cours de résolution, cette machine devrait être fabriquée localement dans les différents pays pour une diffusion plus large.

La composition du fonio blanchi est similaire à celle d'un riz blanc avec un plus: il est plus riche en soufre et en zinc, en acides aminés soufrés et en acides insulino

sécréteurs. La variété guinéenne *Siragué* retenue par les agronomes se détache des autres par ses propriétés culinaires particulièrement intéressantes.

RÉFÉRENCES

1. Portères R. Les céréales mineures du genre Digitaria en Afrique et en Europe. J Agric Tradit Bot Appl 1955;7-8-9:350-675.
2. Jideani IA. Acha, *Digitaria exilis*, the neglected cereal. J Agric Food Chem 1990;34(2):361-4.
3. Borlaug NE, Axtell J, Burton GW, Harlan JR, Rachie KO. Fonio. In: National Research Council, ed. Lost crop of Africa. Washington, DC: National Academy press,1996:59-75.
4. Bui-Phong F. Le fonio, une plante à part. Caractérisation technologique, physico-chimique et histologique des grains de plusieurs variétés. Mémoire d'ingénieur de l'Institut de Sciences et Technologies. L'Université Pierre et Marie Curie, Paris: CIRAD/CA,1998:52.
5. Cruz JF. Le fonio. Montpellier: CIRAD-CA, 2001:24.
6. Fliedel G, Berthé A, Ouattara L. Analyse des caractéristiques technologiques du fonio. Projet CFC/IGG. Amélioration des technologies post-récolte du fonio. CIRAD/AMIS, 2001:24.
7. Cruz JF, Dramé D, Diallo T, Son G. Rapport annuel n°2/00. Projet CFC/IGG. Amélioration des technologies post-récolte du fonio. 2000:73.
8. de Lumen BO, Thompson S, Odegard WJ. Sulfur amino acid-rich proteins in acha (*Digitaria exilis*), a promising under-utilized african cereal. J Agric Food Chem 1993;41:1045-7.

***Remerciements**: Nous tenons à remercier le laboratoire CERECO à Garons pour l'analyse du profil d'acides gras, de vitamines B, le laboratoire du Programme Agronomie du CIRAD-AMIS pour l'analyse des éléments minéraux, le laboratoire du Programme Coton du CIRAD-CA pour l'analyse des acides aminés et les laboratoires LTA/IER de Bamako et DTA/IRSAT de Ouagadougou pour leur étroite collaboration.*